



ESCOLA SUPERIOR
DE TECNOLOGIA
E GESTÃO

Politécnico de Leiria
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Eng.^a Eletrotécnica

SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO AVANÇADO PARA
AQUAPONIA

FERNANDO DE JESUS SANTOS PEREIRA

Leiria, Março 2025



Politécnico de Leiria
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Eng.^a Eletrotécnica

SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO AVANÇADO PARA AQUAPONIA

FERNANDO DE JESUS SANTOS PEREIRA
Número: 2212415

Dissertação realizada sob a supervisão do Professor Sérgio Manuel Maciel de Faria,
Professora Judite dos Santos Vieira, e Professor Telmo Rui Carvalhinho Cunha
Fernandes

Leiria, Março 2025

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o meu agradecimento aos meus orientadores, Professores Sérgio Faria e Telmo Fernandes, e à instituição de acolhimento, Instituto de Telecomunicações (financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES: UIDB/EEA/50008/2020) pelas excelentes condições de investigação e recursos computacionais, bem como à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria pelos seus recursos, que foram cruciais para o sucesso desta investigação.

Adicionalmente, agradeço a possibilidade e as condições para realizar o trabalho no Laboratório de Processos de Separação e Reação e Laboratório de Catálise e Materiais (LSRE-LCM), com especial destaque para a unidade de investigação no Instituto Politécnico de Leiria, e um agradecimento especial à Professora Judite dos Santos Vieira, membro integrado do LSRE-LCM – Laboratório de Processos de Separação e Reacção - Laboratório de Catálise e Materiais, suportado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC): LSRE-LCM (DOI: 10.54499/UIDB/50020/2020 and DOI: 10.54499/UIDP/50020/2020), ALiCE, (DOI: 10.54499/LA/P/0045/2020).

Este trabalho foi também apoiado pelo projeto Embalagem do Futuro[®] | + Ecológica + Digital + Inclusiva, no âmbito do subprojeto PPS17 - WWAS - WasteWater Alert System – Sistema Inteligente de Monitorização de Águas Residuais Industriais, 01/C05-i10/2024.PC644931699-00000042, PRR, IAPMEI, NextGenerationEU.

Expresso também o meu agradecimento ao Eng^o Filipe Perdigoto e à empresa Digiwest - Wireless and Embedded Solutions Lda., pelo fornecimento das placas PCB e alguns componentes eletrónicos utilizados neste trabalho.

Por último, gostaria de expressar o meu sincero agradecimento a todos os colegas e familiares que me acompanharam e apoiaram ao longo deste percurso.

RESUMO

A monitorização da qualidade da água em sistemas de aquaponia é essencial para garantir o equilíbrio entre os organismos aquáticos e as plantas nele inserido, permitindo a deteção de variações nos parâmetros essenciais ao bom funcionamento do sistema. Neste contexto, esta dissertação apresenta o desenvolvimento e validação de dois sistemas complementares de monitorização, um para a qualidade da água na estufa e outro para a água fornecida à estufa, ambos recorrendo a sensores e comunicação sem fios para permitir uma análise contínua e remota dos parâmetros monitorizados.

O primeiro sistema, instalado na estufa, integra sensores para a medição da temperatura da água, pH, condutividade elétrica (CE), sólidos dissolvidos totais (TDS) e potencial de oxidação-redução (ORP), garantindo a monitorização das condições da água utilizada na produção. Além disso, foi implementado um sistema de monitorização visual, baseado em ESP32-CAM, para acompanhar o crescimento das plantas e detetar a presença de insetos. O segundo sistema, responsável pela monitorização da água antes da sua entrada na estufa, apresenta uma arquitetura semelhante, mas foi projetado para operar em ambientes externos, exigindo uma caixa à prova de água e comunicação via NB-IoT para transmissão remota dos dados.

Os sensores utilizados foram submetidos a um processo de calibração regular, assegurando medições fiáveis e dentro dos valores recomendados para sistemas de aquaponia. A análise dos dados recolhidos demonstrou que os sistemas apresentam um desempenho estável ao longo do tempo, permitindo a deteção de variações nos parâmetros indicadores da qualidade da água e facilitando a tomada de decisões para a manutenção do equilíbrio do sistema. A integração da monitorização visual mostrou-se uma ferramenta complementar importante, permitindo validar as condições do crescimento das plantas e a presença de pragas de forma remota. Os resultados confirmam a eficácia dos sistemas desenvolvidos, reduzindo a necessidade de intervenções manuais e proporcionando uma solução eficiente e modular para a monitorização de ambientes aquapónicos.

Palavras-chave: Aquaponia, Monitorização da Qualidade da Água, Sensores, ESP32, NB-IoT, Monitorização Visual, Internet das Coisas (IoT), Automação, Sistemas Inteligentes

ABSTRACT

Water quality monitoring in aquaponic systems is essential to ensure the balance between aquatic organisms and plants contained in it, allowing the detection of variations in key parameters necessary for the proper operation of the system. In this context, this dissertation presents the development and validation of two complementary monitoring systems: one for water quality in the greenhouse and another for the water supplied to the greenhouse, both employing sensors and wireless communication to enable continuous and remote analysis of the monitored parameters.

The first system, installed in the greenhouse, integrates sensors for measuring water temperature, pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), and oxidation-reduction potential (ORP), ensuring the monitoring of water conditions used in production. Additionally, a visual monitoring system based on ESP32-CAM was implemented to track plant growth and detect insect presence. The second system, designed to monitor water before entering the greenhouse, follows a similar architecture but was built to operate in outdoor environments, requiring a waterproof enclosure and NB-IoT communication for remote data transmission.

The sensors underwent a regular calibration process, ensuring reliable measurements within the recommended values for aquaponic systems. The data analysis demonstrated that both systems maintain stable performance over time, enabling the detection of variations in the parameters that indicate water quality facilitating decision-making for system maintenance. The integration of visual monitoring proved to be a valuable complementary tool, allowing remote validation of plant growth conditions and pest presence. The results confirm the effectiveness of the developed systems, reducing the need for manual interventions and providing an efficient and modular solution for aquaponic environment monitoring.

Keywords: Aquaponics, Water Quality Monitoring, Sensors, ESP32, NB-IoT, Visual Monitoring, Internet of Things (IoT), Automation, Smart Systems

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Siglas e Acrónimos	xv
1 Introdução	1
1.1 Contexto e Motivação	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
1.4 Contribuições	3
2 Descrição de Sistemas de Aquaponia	5
2.1 A Aquaponia	5
2.1.1 Funcionamento dos Sistemas de Aquaponia	6
2.1.2 Desafios Comuns à Aquaponia	7
2.1.3 Tendências Recentes em Aquaponia	7
2.2 Sistemas Inteligentes na Aquaponia	8
2.2.1 Automação e Monitorização Avançadas	8
3 Sistema Aquapónico	11
3.1 Descrição do Sistema Aquapónico	11
3.1.1 Componentes do Sistema Aquapónico	12
3.2 Monitorização da Qualidade da Água	16
3.2.1 Parâmetros da Qualidade da Água: A chave para o funciona- mento eficiente	16
3.2.1.1 Parâmetros Fundamentais da Qualidade da Água na Aquaponia	16
3.2.2 Pontos de Monitorização da Qualidade da Água	17
4 Arquitetura e Especificação do Sistema de Monitorização Proposto	19

4.1	Topologia Geral do Sistema Proposto	19
4.2	Sistema de Monitorização da Qualidade da Água na Estufa	21
4.2.1	Diagrama de Monitorização da Qualidade da Água	22
4.2.2	Componentes do Sistema	23
4.2.2.1	Sensores	23
4.2.2.2	Microcontrolador ESP32	31
4.2.2.3	ESP32-CAM	34
4.2.3	Transmissão de Dados	37
4.3	Monitorização da Qualidade da Água a Fornecer à Estufa	38
4.3.1	Diagrama do Sistema de Monitorização da Qualidade da Água	39
4.3.2	Componentes do Sistema	41
4.3.2.1	Sensores	41
4.3.2.2	ESP32	42
4.3.2.3	Transmissão de dados	43
5	Dimensionamento e Prototipagem	47
5.1	Dimensionamento do Sistema de Monitorização da Qualidade da Água na Estufa	47
5.1.1	Circuito Elétrico	47
5.1.1.1	Circuito de Alimentação	50
5.1.1.2	Circuito de Ligação do Sensor de Temperatura	51
5.1.1.3	Circuito de Ligação do Sensor de pH	53
5.1.1.4	Circuito de Ligação do Sensor STD	55
5.1.1.5	Circuito de Ligação do Sensor ORP	57
5.1.1.6	Circuito de Ligação do Sensor CE	60
5.1.1.7	Circuito de Ligação do Sensor DHT22	63
5.1.1.8	Circuitos de Ligação dos Componentes FT233RL e Micro-USB	64
5.1.2	Projeto das PCBs	65
5.2	Projeto do Sistema de Monitorização da Qualidade da Água Fornecida à Estufa	68
5.2.1	Circuito elétrico do Sistema de Monitorização da Qualidade da Água Fornecida à Estufa	68
5.2.1.1	Sistema de Controlo ON/OFF	70
5.2.1.2	Circuito de Ligação do Módulo NB-IoT	72
5.2.1.3	Alimentação do Circuito	73
5.2.1.4	Ligação GPS	74
5.2.2	Gestão Energética	75

5.2.3	Projeto da PCB	77
5.3	Prototipagem	78
5.3.1	Protótipos do Sistema de Monitorização da Qualidade da Água	78
6	Resultados e Discussão	83
6.1	Calibração dos Sensores	83
6.1.1	Calibração do Sensor de pH	83
6.1.2	Calibração do Sensor Condutividade Elétrica	85
6.1.3	Calibração Sensor Potencial Oxidação-Redução	86
6.2	Sistema de Monitorização da Qualidade da Água na Estufa	87
6.2.1	Monitorização da Qualidade da Água	88
6.2.1.1	Apresentação e Análise dos Dados	89
6.2.2	Monitorização Visual	95
6.2.2.1	Análise das Imagens e dos Resultados Experimentais	95
6.3	Sistema de Monitorização da Qualidade da Água Fornecida à Estufa	98
6.3.1	Protótipo	99
6.3.2	Visualização e Análise dos Dados na <i>Dashboard</i>	99
7	Conclusões e Trabalho Futuro	101
7.1	Conclusão	101
7.2	Trabalho Futuro	102
	Bibliografia	105
	Declaration	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Estrutura geral do sistema de aquaponia.	6
Figura 2	Diagrama de blocos do ciclo aquapónico.	11
Figura 3	Tanque de criação dos peixes	12
Figura 4	Equipamento de filtragem física : (a) filtro de sólidos. (b) sedimentador.	13
Figura 5	(a) Biofiltro; (b) Enchimento poroso.	14
Figura 6	Cama das plantas.	14
Figura 7	Sump do sistema de aquaponia monitorizado.	15
Figura 8	Arquitetura do sistema de monitorização proposto.	20
Figura 9	Diagrama da monitorização da qualidade da água.	22
Figura 10	Sensor de pH analógico V2 utilizado no sistema (SEN17004).	24
Figura 11	Sensor temperatura utilizado no sistema (DS18B20).	25
Figura 12	Sensor condutividade elétrica utilizado no sistema (SEN08024).	27
Figura 13	Sensor ORP utilizado no sistema (SEN08043).	28
Figura 14	Sensor SDT (SEN08030) utilizado no sistema.	29
Figura 15	Sensor de temperatura e humidade utilizado no sistema (DHT22).	30
Figura 16	Módulo com o microcontrolador ESP32.	32
Figura 17	Código de envio dos dados para a Firebase.	34
Figura 18	Módulo ESP32-CAM, com uma câmara.	35
Figura 19	Formato das mensagens em formato JSON proveniente dos sensores.	37
Figura 20	Formato das hierarquias da câmara.	38
Figura 21	Diagrama do sistema de monitorização da qualidade da água na estufa.	40
Figura 22	Módulo GPS.	42
Figura 23	Circuito do sistema monitorização da qualidade da água na estufa.	48
Figura 24	Circuito da monitorização visual do crescimento das plantas.	49
Figura 25	Circuito do módulo de monitorização visual da presença e quantidade de insetos na estufa.	50

Figura 26	Regulador de tensão : (a) Exemplo do circuito de regulador de tensão. (b) Circuito implementado.	51
Figura 27	Exemplo de configuração do sensor DS18B20 (<i>datasheet</i>).	52
Figura 28	Ligações do sensor de temperatura ao ESP32.	53
Figura 29	<i>Pinout</i> do sensor de pH: (a) Configuração dos <i>conectores</i> . (b) Ligações ao ESP32.	54
Figura 30	Circuito amplificador para o sensor de pH.	55
Figura 31	Circuito STD: (a) Configuração dos conectores ligados ao ESP32. (b) Ligações ao ESP32.	56
Figura 32	Circuito amplificador para o sensor de STD.	56
Figura 33	Circuito do sensor ORP: (a) Configuração dos das ligações do amplificador. (b) Ligações ao ESP32.	58
Figura 34	Circuito amplificador para o sensor de ORP.	59
Figura 35	Circuito elétrico do amplificador para o sensor de ORP.	60
Figura 36	Tensão vs Leitura ADC do ESP32	61
Figura 37	Circuito ORP: (a) Ligações ao microcontrolador ESP32. (b) ADC externo (ADS1115).	62
Figura 38	Circuito elétrico do amplificador para o sensor de CE.	62
Figura 39	Circuito conversor USB para UART.	64
Figura 40	PCB realizada para o sistema de monitorização da qualidade da água na estufa.	65
Figura 41	PCB realizada para os sistemas de monitorização visual.	67
Figura 42	Circuito do sistema de monitorização da qualidade da água.	69
Figura 43	Circuito de controlo ON/OFF com o transístor BD127.	71
Figura 44	NB-IoT: (a) Ligações ao módulo. (b) Ligações ao ESP32.	72
Figura 45	PCB do sistema de monitorização da água inserida na estufa.	77
Figura 46	Base de fixação dos componentes internos do sistema de monitorização da qualidade da água.	79
Figura 47	Caixa do sistema de monitorização da qualidade da água.	80
Figura 48	Tampa da caixa do sistema de monitorização da qualidade da água.	80
Figura 49	Base da caixa das ESP32-CAM.	81
Figura 50	Tampa da caixa das ESP32-CAM.	82
Figura 51	Protótipo final do sistema de monitorização da qualidade da água.	88
Figura 52	Variação dos valores médios diários do pH ao longo do mês de junho e agosto de 2023.	90

Figura 53	Variações do valores de condutividade elétrica em abril, junho e agosto de 2023.	91
Figura 54	Variações do valores de sólidos dissolvidos totais em abril, junho e agosto de 2023.	92
Figura 55	Variações da temperatura em abril, junho e agosto de 2023.	93
Figura 56	Dados do potencial de oxidação-redução.	94
Figura 57	Protótipos ESP32-CAM: (a) Visão Frontal. (b) Visão lateral.	96
Figura 58	(a) Alfaces acabadas de plantar. (b) Folha para captura de insetos.	96
Figura 59	(a) Alfaces prontas para colheita. (b) Folha de insetos.	97
Figura 60	Imagem obtida com lente de melhor qualidade.	98
Figura 61	Protótipo final: (a) Vista detalhada dos módulos. (b) Configuração final com os sensores e as entradas estanques adequadas a ambientes externos.	99
Figura 62	<i>Dashboard</i> do sistema de monitorização da água inserida na estufa.	100

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

API	Application Programming Interface.
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory.
FTDI	Future Technology Devices International.
GPS	Global Positioning System.
HTTP	HyperText Transfer Protocol.
HTTPS	HyperText Transfer Protocol Secure.
IoT	Internet of Things.
JPEG	Joint Photographic Experts Group.
JSON	JavaScript Object Notation.
LTE	Long-Term Evolution.
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport.
NB-IoT	Narrowband Internet of Things.
RTDB	Realtime Database.
SIM	Subscriber Identity Module.

Lista de siglas e acrónimos

XGA Extended Graphics Array.

INTRODUÇÃO

A monitorização da qualidade da água é um fator essencial para garantir a eficiência e sustentabilidade dos sistemas de aquaponia, permitindo um controlo rigoroso dos parâmetros essenciais para o equilíbrio entre peixes e plantas existentes nesse sistema. Com os recentes avanços na Internet das Coisas (IoT) e na automação, a utilização de sensores inteligentes e comunicações sem fios possibilita a recolha e análise de dados em tempo real, otimizando a gestão do sistema.

Nesta dissertação, são desenvolvidos dois sistemas de monitorização distintos: um para o controlo da qualidade da água no ambiente interno da estufa e outro para a análise da água fornecida à mesma. A abordagem integra diferentes tipos de sensores com o objetivo de medir parâmetros críticos da qualidade da água. Este capítulo apresenta o contexto e motivação, os objetivos do estudo e a estrutura da dissertação.

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

Nos últimos anos, a integração de novas tecnologias e sistemas de automação tem revolucionado diversos setores, incluindo a agricultura e a aquacultura. A Aquaponia, como uma inovação na produção agrícola moderna, combina a aquacultura com a hidroponia para fazer face a desafios persistentes como a crescente necessidade de alimentos, o aumento da população global, os custos de mão de obra, a degradação ambiental e a erosão das terras agrícolas. A aquaponia é essencialmente um sistema de ciclo fechado que une o cultivo de plantas sem solo com a recirculação da água da aquacultura, promovendo a reciclagem de recursos e nutrientes, com baixa poluição, alta produtividade e elevada eficiência.

A prática da aquaponia tem vindo a crescer gradualmente em todo o mundo, devido ao seu sistema de ciclo fechado, que torna o processo mais prático e ecologicamente sustentável. No entanto, apesar de se tratar de um sistema de ciclo fechado, a recolha automatizada de dados desempenha um papel fundamental já que permite monitorização da saúde do sistema, garantindo o bem-estar das plantas

e dos peixes, prevenindo eventuais problemas que possam comprometer a eficiência do processo.

A evolução da tecnologia da Internet das Coisas tem desempenhado um papel crucial no aperfeiçoamento dos sistemas de aquaponia. A IoT possibilita a monitorização inteligente, a recolha de dados e o controlo, contribuindo para a optimização do desempenho do sistema. A introdução desta tecnologia visa superar desafios de conectividade entre dispositivos, automatizando os processos e eliminando a necessidade de intervenção humana. Assim, a integração da IoT na aquaponia revela-se essencial para otimizar o funcionamento do sistema, prevenindo problemas que poderiam prejudicar tanto as plantas quanto os peixes, elementos fundamentais para um processo eficaz.

Para garantir a eficácia deste processo, tornou-se imperativo controlar os parâmetros da qualidade da água. Os parâmetros que interessa controlar ou monitorizar são o pH, oxigénio dissolvido, temperatura, potencial de oxidação-redução, condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais.

1.2 OBJECTIVOS

O principal objetivo desta pesquisa consistiu no desenvolvimento um sistema de Monitorização Inteligente da Aquaponia no Laboratório de Sistemas Multitróficos Integrados (Estufa) da Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Neste sistema são monitorizados todos os aspetos mais importantes da qualidade da água e crescimento das plantas. No decorrer do trabalho, foram realizadas as seguintes tarefas para atingir tais objetivos:

- Estudo dos parâmetros importantes na qualidade da água e respetivos sensores.
- Desenvolvimento e implementação de um sistema, baseado em sensores e atuadores, para supervisionar e controlar as características da água no sistema de aquaponia.
- Desenvolvimento e implementação de um sistema de comunicações.
- Desenvolvimento e implementação de uma aplicação informática para monitorização, em tempo real, dos dados adquiridos.
- Desenvolvimento e implementação de um sistema de monitorização baseado em imagens de uma câmara para avaliar o crescimento de plantas na cama hidropónica e auxiliar na deteção de insetos dentro da estufa.

- Testes e avaliação dos resultados.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se organizada em sete capítulos, abordando o desenvolvimento, implementação e validação do Sistema de Monitorização Inteligente aplicado à aquaponia.

No Capítulo 1, é apresentada a introdução ao tema, incluindo o enquadramento do problema, os objetivos da investigação e a relevância do estudo na monitorização da qualidade da água em sistemas de aquaponia. O Capítulo 2 aborda a revisão do estado da arte, explorando os princípios da aquaponia, os parâmetros essenciais para a qualidade da água e as tecnologias utilizadas para a sua monitorização, com destaque para a integração de sensores, comunicação IoT e análise de dados. No Capítulo 3, são apresentados os sistemas aquapónicos, incluindo a sua descrição, os seus componentes e os parâmetros importantes para manter uma correta monitorização da qualidade da água. O Capítulo 4 apresenta a arquitetura dos sistemas desenvolvidos, detalhando os diagramas, os sensores, os componentes utilizados e a forma de transmissão de dados. No Capítulo 5, é abordado o processo de implementação do sistema, incluindo o projeto dos circuitos eletrónicos, o desenvolvimento das PCBs, a conceção dos protótipos físicos e a gestão energética para otimização do consumo de energia em sistemas alimentados por bateria. O Capítulo 6 foca-se na análise dos resultados obtidos durante os testes experimentais, apresentando a validação dos dados dos sensores, a calibração realizada, a fiabilidade das medições e a eficácia da monitorização visual. São ainda discutidas as vantagens do sistema e as suas limitações. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões do estudo, destacando as principais contribuições do trabalho e possíveis melhorias a serem realizadas trabalhos futuros.

1.4 CONTRIBUIÇÕES

Artigos em conferência:

1) D. Ushiña, F. Pereira, F. Sebastião, J. Vieira, S. Faria, T. Fernandes, "Uso eficiente de nutrientes na produção de biomassa vegetal num sistema de aquaponia com monitorização inteligente", 7º Simpósio de Produção e Transformação de

Alimentos em Ambiente Sustentável, Oeiras, 29 de maio de 2024 (Comunicação em Painel).

2) F. Pereira, D. Ushiña, J. Vieira, S. Faria, T. Fernandes, "Sistema Inteligente para Monitorização da Qualidade da Água no cultivo Aquapónico", 36º Seminário RTCM- Rede Temática de Comunicações Móveis, Leiria, 19 de julho de 2024 (Poster).

Protótipos:

1) F. Pereira, D. Ushiña, J. Vieira, S. Faria, T. Fernandes, Protótipo desenvolvido para Embalagem do Futuro® | + Ecológica + Digital + Inclusiva, no âmbito do subprojeto PPS17 - WWAS - WasteWater Alert System – Sistema Inteligente de Monitorização de Águas Residuais Industriais, 01/C05-i10/2024.PC644931699-00000042, PRR, IAPMEI, NextGenerationEU.

DESCRIÇÃO DE SISTEMAS DE AQUAPONIA

A aquaponia é um sistema agrícola inovador que combina a criação de peixes (aquacultura) com o cultivo de plantas sem solo (hidroponia) num sistema saudável e simbiótico. Este capítulo introduz as características e funcionamento de um sistema de aquaponia, as necessidades para se conseguir um sistema eficiente e saudável, os desafios e tendências e a utilização de sistemas inteligentes na aquaponia.

2.1 A AQUAPONIA

Nas últimas décadas, a aquaponia tem emergido como uma técnica de cultivo com crescente notoriedade, devido aos seus consideráveis benefícios ambientais e económicos. A aquaponia é um sistema agrícola inovador que capitaliza a relação simbiótica entre peixes e plantas, como já se referiu anteriormente. Esta abordagem única funde dois ramos distintos da agricultura, criando um sistema fechado que facilita a produção de alimentos para consumo humano [1]. A característica essencial da aquaponia é o seu ciclo fechado, o qual simplifica significativamente o processo de produção de alimentos, enquanto minimiza o desperdício e reduz a necessidade de fertilizante químicos, poupando recursos preciosos[2]. A abordagem integrada da aquaponia oferece uma série de vantagens. Nomeadamente possibilita o cultivo eficiente e sustentável de alimentos frescos, tornando-se particularmente atrativa em contextos urbanos, onde o espaço para a agricultura é limitado. Visto que se baseia num ciclo fechado, torna-se atraente para os utilizadores, uma vez que permite a produção de alimentos sem a necessidade constante de intervenção humana. A própria produção de alimentos traz benefícios economicamente significativos, uma consideração importante nos tempos atuais. Empresas e agricultores também estão a adotar a aquaponia, diversificando as suas produções e reduzindo o impacto ambiental das práticas agrícolas convencionais. Além disso, a pesquisa científica desempenha um papel vital na aquaponia, à medida que os investigadores procuram otimizar os sistemas, tornando-os cada vez mais eficientes e produtivos.

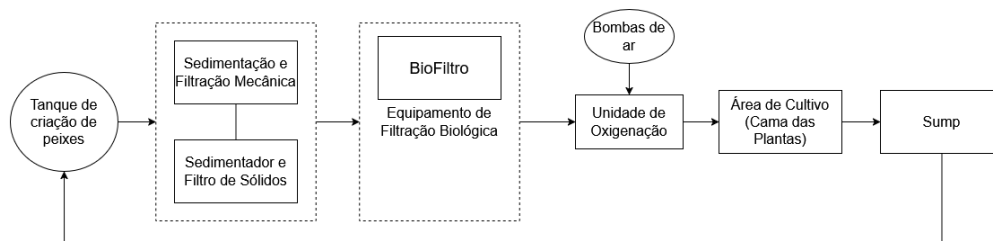
2.1.1 *Funcionamento dos Sistemas de Aquaponia*

Figura 1: Estrutura geral do sistema de aquaponia.

A aquaponia é um sistema agrícola inovador fundamentado em princípios essenciais que estabelecem uma harmonia entre a criação de peixes e o cultivo de plantas. Neste processo integrado, o ciclo do azoto, a recirculação da água e a sustentabilidade desempenham papéis cruciais, interligando-se de maneira profunda. O sistema aquapónico é composto por vários elementos fundamentais, tendo cada um deles um papel distinto. Os principais componentes são as plantas, os peixes e as bactérias. Além disso, elementos essenciais fazem parte do processo do funcionamento, tais como os tanques dos peixes, onde ocorre a criação dos peixes e a produção dos resíduos, nomeadamente amónia, que alimenta o ciclo do azoto, a cama de crescimento das plantas, onde ocorre o desenvolvimento das plantas, as bombas de água, para a circulação da água, e a canalização, que desempenha um papel crucial na circulação. É nas camas de crescimento que as plantas absorvem os nitratos, completando o ciclo do azoto, e onde ocorre a purificação da água, tornando-a segura para os peixes. É possível observar na Figura 1 a estrutura geral dos sistemas de aquaponia.

O ciclo do azoto é o processo fundamental deste sistema, sendo responsável pela produção dos nutrientes necessários para o crescimento das plantas [3]. Na água, a amónia, resultante dos resíduos dos peixes, é convertida em nitritos e posteriormente em nitratos pela ação de bactérias autotróficas. Os nitratos são um dos nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas. Contudo, a estabilidade deste ciclo requer uma monitorização cuidadosa dos parâmetros da qualidade da água, assegurando um sistema eficiente e saudável. A recirculação da água é a essência da eficiência na aquaponia. Neste processo contínuo, a água é reutilizada de forma constante, movendo-se entre o tanque dos peixes e as camas de crescimento das plantas. Este ciclo fechado minimiza o desperdício e reduz substancialmente a necessidade da água. Assim, além de garantir um ambiente sustentável, evita-se o desperdício de um recurso tão valioso, algo de extrema relevância para a preservação do equilíbrio ambiental. A sustentabilidade é um princípio que define a identidade da aquaponia

e sublinha a sua importância. Este sistema agrícola é caracterizado pela redução significativa da necessidade de fertilizantes químicos e pela minimização do consumo de água. Esta abordagem consciente, não apenas, promove a saúde dos ecossistemas aquáticos e terrestres, mas também contribui para a preservação dos recursos naturais, tornando-a uma opção essencial para um futuro sustentável.

2.1.2 *Desafios Comuns à Aquaponia*

Enfrentar os desafios inerentes à aquaponia é essencial para garantir o sucesso desta prática agrícola. Vários desafios comuns surgem, sendo um deles garantir a qualidade da água recirculada no sistema. Este desafio implica manter os parâmetros da qualidade da água dentro das gamas adequadas para evitar desequilíbrios que afetariam a saúde dos peixes e o crescimento das plantas [4]. Embora mais exigente, esta abordagem demonstra eficiência ao proporcionar um crescimento saudável das plantas. Outro desafio significativo é a integração eficiente dos componentes, isto é, harmonizar os diferentes elementos do sistema, desde os tanques dos peixes até às camas de crescimento, para alcançar um equilíbrio ideal. Este processo é essencial para assegurar a coesão funcional do sistema aquapónico como um todo. Dada a sensibilidade da aquaponia a doenças, um terceiro desafio comum é a resistência às mesmas. Isso implica aplicar estratégias eficazes de prevenção e tratamento a doenças tanto nas plantas como nos peixes. Visto que a gestão cuidadosa da saúde destes organismos é crucial para a estabilidade do sistema, como já foi visto anteriormente. Estes desafios, embora complexos, são fundamentais, para impulsionar a inovação na aquaponia, contribuindo para a evolução contínua desta prática agrícola sustentável.

2.1.3 *Tendências Recentes em Aquaponia*

À medida que a popularidade da aquaponia continua a crescer, várias tendências emergem, moldando a forma como esta prática é abordada e implementada. Nesta secção são introduzidas e discutidas essas tendências. Uma destas tendências é a utilização de abordagens sustentáveis, isto é, a busca por métodos mais sustentáveis, incluindo o uso eficiente de recursos e técnicas de cultivo orgânico. Dada a natureza da aquaponia ser baseada num sistema fechado, a aplicação de métodos sustentáveis é crucial para alcançar um sistema equilibrado e funcional sem a necessidade de intervenção humana durante o processo. Outra tendência significativa é a aplicação em ambientes urbanos e em pequena escala. Este fenómeno em ascensão tem

levado à implementação de sistemas de aquaponia em áreas urbanas e em pequenas propriedades, promovendo a produção local de alimentos frescos e sustentáveis. O desenvolvimento de sistemas inteligentes é uma tendência que tem vindo a ter um aumento considerável. Esta abordagem destaca-se, permitindo o controlo do sistema sem a necessidade de intervenção humana direta e possibilitando a monitorização remota do sistema. A integração de tecnologias avançadas, como sensores inteligentes e automação, está a ganhar destaque na resolução de desafios e na otimização do desempenho do sistema. Essas tendências indicam uma mudança notável na forma como a aquaponia é percebida e praticada, oferecendo oportunidades significativas para avanços futuros nesta área. De seguida, aprofunda-se a discussão sobre os sistemas inteligentes na aquaponia, destacando o papel crucial destas inovações na melhoria da eficiência e mitigando alguns dos desafios já referidos anteriormente.

2.2 SISTEMAS INTELIGENTES NA AQUAPONIA

Como foi referido anteriormente, a evolução tecnológica proporcionou a incorporação de sistemas inteligentes em aquaponia, representando um passo significativo em direção à automatização do processo. Neste subcapítulo irá ser explorado de forma detalhada como os sistemas inteligentes estão a fazer evoluir a aquaponia, oferecendo soluções inovadoras para desafios preexistentes e elevando a eficiência global do sistema.

2.2.1 *Automação e Monitorização Avançadas*

A evolução tecnológica tem impulsionado a adoção de sistemas inteligentes na aquaponia, permitindo uma gestão mais eficiente e automatizada dos processos. A integração da Internet of Things (IoT) tem sido um dos avanços mais significativos nesta área, possibilitando a monitorização contínua dos parâmetros do sistema e facilitando a recolha e análise de dados em tempo real. O desenvolvimento de novas infraestruturas de comunicação, aliadas ao aumento da capacidade de conectividade, permitiu a criação de soluções inovadoras que melhoram a eficiência operacional e reduzem a necessidade de intervenção humana [5].

A automação em sistemas aquapónicos é essencial para garantir a estabilidade dos parâmetros da água, tornando possível a deteção e correção de desvios sem necessidade de supervisão constante. Um exemplo desta abordagem foi apresentado por Wang et al., que desenvolveram um sistema baseado em OpenWrt para moni-

torização e controlo remoto através de dispositivos móveis, garantindo a recolha estável e em tempo real dos dados dos sensores [5]. De forma semelhante, Abbasi et al. propuseram um sistema estruturado numa arquitetura IoT de três camadas, onde um microcontrolador, como o *Raspberry Pi 4*, recolhe os dados dos sensores e os transmite para uma plataforma cloud, permitindo uma visualização eficiente através de um dashboard [6]. Estes sistemas demonstram a viabilidade da IoT na monitorização remota e na gestão otimizada dos sistemas aquapónicos.

Para além da automação, a utilização de inteligência artificial (IA) tem sido explorada para prever e regular as condições ótimas do sistema. Rozie et al. desenvolveram um sistema que utiliza algoritmos de aprendizagem automática, incluindo regressão e árvores de decisão, para prever e ajustar parâmetros como temperatura, amónia e total de sólidos dissolvidos, garantindo condições ideais para o crescimento das plantas e a saúde dos peixes [7]. A implementação destas técnicas demonstrou elevada precisão na monitorização, permitindo uma resposta mais eficiente a variações nos parâmetros da água e reduzindo a dependência de monitorização manual.

A conjugação da IoT, da automação inteligente e da inteligência artificial está a transformar a aquaponia numa abordagem mais sustentável e eficiente. Estas tecnologias não só reduzem os custos operacionais como também garantem um maior controlo sobre o sistema, otimizando a produção e promovendo a estabilidade das condições ambientais. A evolução contínua destes sistemas inteligentes poderá, no futuro, contribuir para uma maior escalabilidade e acessibilidade da aquaponia, consolidando-a como uma alternativa viável para a produção sustentável de alimentos.

SISTEMA AQUAPÓNICO

O ciclo fechado da aquaponia é a base do seu funcionamento, integrando a criação de peixes e o cultivo de plantas de forma simbiótica. Neste capítulo, serão descritos em detalhe os componentes principais do ciclo aquapónico, bem como os pontos estratégicos onde serão implementados os sistemas de monitorização inteligentes. A monitorização dos parâmetros da qualidade da água torna-se essencial para garantir a estabilidade da eficiência do sistema, por isso foram utilizados uma série de sensores e sistemas de controlo, distribuídos estrategicamente em pontos críticos do sistema. São estes dispositivos que permitem a monitorização contínua dos parâmetros fundamentais na qualidade da água.

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA AQUAPÓNICO

Na Figura 2 está representado o diagrama de blocos do ciclo aquapónico utilizado e onde foram instalados os sistemas de monitorização inteligentes.

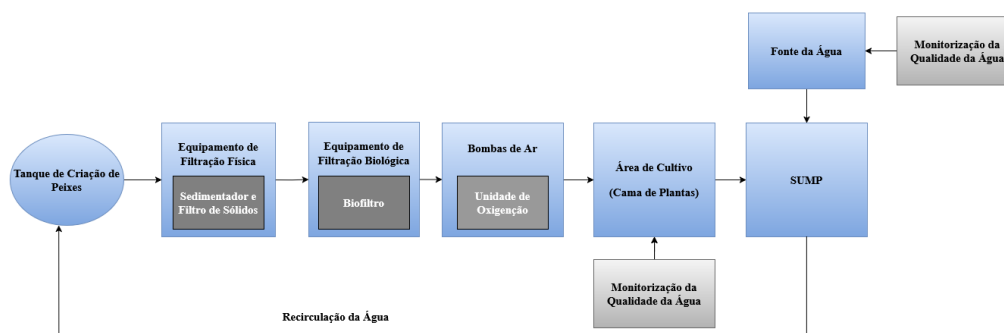


Figura 2: Diagrama de blocos do ciclo aquapónico.

Os principais componentes deste ciclo são o tanque de criação de peixes, o equipamento de filtração física, o equipamento de filtração biológica, as bombas de ar, a área de cultivo, o sump, e a fonte da água. O sistema de monitorização da qualidade da água foi colocada na fonte da água e na área de cultivo, onde foi também colocada a monitorização visual.

3.1.1 Componentes do Sistema Aquapónico

O sistema aquapónico é composto por diversos elementos que garantem o seu correto funcionamento. Cada um desses componentes desempenha um papel crucial para manter o equilíbrio entre a criação de peixes e o cultivo de plantas. A seguir, são descritos os principais componentes do sistema aquapónico utilizado.

O tanque de criação de peixes é o espaço destinado aos peixes ou outros organismos aquáticos, permitindo um controle eficaz sobre parâmetros essenciais na aquicultura. O tanque utilizado no sistema implementado tem uma capacidade de 3,400 l e é de formato circular, como mostrado na Figura 3. Esse formato promove uma circulação ideal da água, garantindo uma distribuição uniforme dos peixes e facilitando a remoção eficiente de sólidos sedimentáveis, além de favorecer a concentração rápida de resíduos [8][9].



Figura 3: Tanque de criação dos peixes

O equipamento de filtração física é composto por dois elementos principais: o sedimentador e o filtro de sólidos. Nos sistemas de aquaponia, os peixes são alimentados com alimento sólido que por não ser totalmente aproveitada, dá lugar à geração de resíduos [8][10]. Para evitar a degradação da qualidade da água, esses resíduos precisam ser removidos. O filtro de sólidos captura partículas maiores, protegendo as raízes das plantas da acumulação de resíduos. Já o sedimentador permite que partículas sedimentáveis se depositem no fundo, removendo-as da água, o que facilita o retorno da água à área de cultivo das plantas, garantindo uma água mais limpa para o sistema. Na Figura 4(a) é possível observar o filtro de sólidos

utilizado no sistema monitorizado, enquanto que na Figura 4(b) é possível observar o sedimentador.

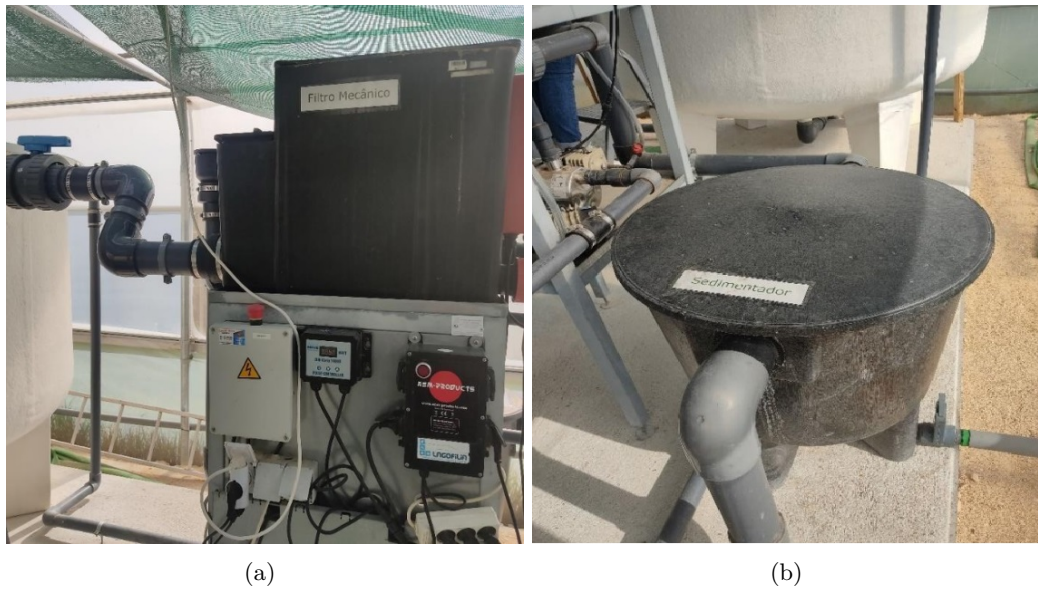


Figura 4: Equipamento de filtragem física : (a) filtro de sólidos. (b) sedimentador.

O biofiltro é responsável por transformar os subprodutos gerados pelos peixes, como a amónia em nitrito, e este em nitrato, uma forma não só menos tóxica mas também aproveitável pelas plantas. Este processo, conhecido como nitrificação, é realizado por bactérias benéficas que se fixam no meio poroso do biofiltro. No sistema utilizado, o biofiltro é composto por um tanque de 300 l com enchimento poroso, como é possível observar na Figura 5, que oferece uma ampla superfície para a fixação dessas bactérias. Com isso, o biofiltro garante a conversão dos resíduos em nutrientes essenciais para as plantas, assegurando a saúde do sistema aquapónico como um todo.



Figura 5: (a) Biofiltro; (b) Enchimento poroso.

A cama das plantas, refere-se à área de cultivo das plantas que, neste sistema, utiliza um método de raízes flutuantes, como é possível observar na Figura 6. As plantas flutuam numa estrutura de suporte, composta por placas perfuradas, onde são colocados pequenos vasos hidropónicos, garantindo o arejamento adequado das raízes para o crescimento saudável e o contacto das raízes com a solução nutritiva. No sistema em questão, são cultivadas principalmente plantas de ciclo curto, como alface, manjeriço e espinafres, que se adaptam bem a este tipo de ambiente, onde o uso de inseticidas e fungicidas químicos é evitado para proteção dos peixes.



Figura 6: Cama das plantas.

O Sump, ou tanque de drenagem, com capacidade de 500 l, é o reservatório final para onde a água do sistema flui por gravidade, sendo colocado na parte final do ciclo aquapónico, como se pode observar na Figura 7. Este tanque funciona como um

reservatório temporário, onde podem ser misturados aditivos químicos ou nutrientes antes de a água ser recirculada para o sistema, caso haja a necessidade de ajustes na qualidade da água. É neste local que há entrada de água proveniente do exterior do sistema (água da rede de distribuição), isto é, o reabastecimento do ciclo, caso haja perdas de água nas transições entre os diferentes componentes do sistema, ou mesmo a sua evaporação. A água da área de cultivo das plantas (cama das plantas) escoar para o sump, de onde é bombeada de volta para o início do sistema através de uma bomba submersível, garantindo a circulação contínua da água.



Figura 7: Sump do sistema de aquaponia monitorizado.

O sistema aquapónico, ao integrar componentes como o tanque de peixes, sistemas de filtração física e biológica, áreas de cultivo hidropónico e o Sump, promove uma simbiose eficaz entre a aquacultura e a produção vegetal. Cada componente desempenha um papel essencial na manutenção do equilíbrio do sistema, garantindo a recirculação eficiente da água e o controle preciso das condições ambientais. Cada componente deste sistema é sujeito a constante manutenção, de forma a evitar qualquer tipo de desequilíbrio. A manutenção e limpeza neste ciclo é essencial para garantir uma boa produção e um funcionamento sem falhas. A utilização de sensores e monitorização inteligente em pontos estratégicos permite a otimização contínua do processo, promovendo sustentabilidade e produtividade tanto na criação de peixes como no cultivo de plantas.

3.2 MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

Como já mencionado, a recirculação da água é a pilar da eficiência nos sistemas de aquaponia. A monitorização contínua da qualidade da água é crucial para garantir o funcionamento adequado do sistema. A precisão e regularidade com que esses parâmetros são medidos determinam a estabilidade do ambiente aquático, assegurando o funcionamento do sistema.

3.2.1 *Parâmetros da Qualidade da Água: A chave para o funcionamento eficiente*

A qualidade da água é um dos principais fatores que influenciam a eficiência de um sistema aquapónico, e é avaliada através de diversos parâmetros essenciais, nomeadamente o pH, a Condutividade Elétrica, o Sólidos Dissolvidos Totais, o Potencial de Oxidação-Redução, a temperatura e o Oxigénio Dissolvido. Cada um destes parâmetros desempenha um papel crucial na manutenção da qualidade da água, sendo imperativo que se mantenham dentro de limites predefinidos para assegurar o correto funcionamento do sistema aquapónico.

3.2.1.1 *Parâmetros Fundamentais da Qualidade da Água na Aquaponia*

Cada um dos seguintes parâmetros tem uma influência direta no desempenho do sistema e, portanto, a sua monitorização constante é fundamental:

- pH: O nível de acidez ou alcalinidade da água desempenha um papel crucial no crescimento das plantas e na saúde dos peixes. Manter um pH equilibrado é essencial para otimizar a absorção dos nutrientes pelas plantas. A gama ideal do pH na aquaponia situa-se, tipicamente, entre 6,8 e 7,2.
- Condutividade Elétrica : A CE mede a capacidade de a água conduzir eletricidade, refletindo a quantidade de sais dissolvidos. Este parâmetro é indicativo da concentração de nutrientes disponíveis para as plantas e da qualidade geral da água. Geralmente, a gama de valores desejada na aquaponia situa-se entre 1 e 2,5 mS/cm .
- Sólidos Dissolvidos Totais: Representa a quantidade Sólidos Dissolvidos Totais na água, incluindo minerais e nutrientes. O SDT e a CE têm relação direta. Normalmente o SDT é 70 % da CE. Controlar o SDT é crucial para evitar

acumulações excessivas que podem prejudicar a saúde dos peixes e das plantas. Recomenda-se uma gama entre 800 e 1200 ppm (partes por milhão).

- **Potencial de Oxidação-Redução:** Este parâmetro indica a capacidade da água suportar processos de oxidação e redução. Manter um ORP adequado é vital para assegurar condições favoráveis aos peixes e às bactérias nitrificantes. Normalmente encontra-se uma gama de 200 a 400 mV, embora neste sistema os valores reportados se tenham situado entre 100 e 200 mV.
- **Temperatura:** A temperatura influencia diretamente o metabolismo dos peixes e o crescimento das plantas. Manter uma gama da temperatura estável é essencial para o equilíbrio do sistema. Normalmente, o intervalo ideal varia entre 22 °C e 28 °C, mas depende também muito da época do ano.
- **Oxigénio Dissolvido:** O nível de oxigénio dissolvido na água é crítico para a sobrevivência dos peixes e para o desempenho eficiente das bactérias nitrificantes. Assegurar níveis adequados de OD é essencial para evitar problemas de saúde nos organismos envolvidos. Recomenda-se uma um valor superior a 5 mgO₂/l.

Manter o valor destes parâmetros nas gamas corretas é crucial para a obtenção de um sistema saudável, já que cada parâmetro influencia diretamente tanto a saúde dos peixes como das plantas.

3.2.2 *Pontos de Monitorização da Qualidade da Água*

Como mencionado anteriormente, os sistemas de monitorização foram instalados em pontos estratégicos para garantir a operação eficaz do sistema. Cada equipamento foi colocado de forma a monitorizar, em tempo real, as variações desses parâmetros, permitindo ajustes imediatos e um controlo eficaz do sistema.

O primeiro sistema de monitorização foi instalado na entrada de água do sistema, ou seja, na fonte de água utilizada para reposição do ciclo aquapónico. Este sistema monitoriza parâmetros cruciais como condutividade elétrica, pH, temperatura, Sólidos Dissolvidos Totais e potencial de oxidação-redução. A monitorização desses parâmetros na fonte assegura que a água de reposição esteja dentro das gamas adequadas, evitando assim qualquer impacto negativo na qualidade de vida dos peixes e no equilíbrio geral do sistema. O segundo sistema de monitorização foi instalado na área de cultivo, mais especificamente na cama das plantas. Este sistema está leva a cabo duas funções: a monitorização da qualidade da água e a

monitorização visual do crescimento das plantas e da quantidade de insetos presentes na estufa. Estes sistemas são descritos a seguir:

- Monitorização da qualidade da água: Este subsistema monitoriza parâmetros como pH, condutividade elétrica, Sólidos Dissolvidos Totais, temperatura e o potencial de oxidação-redução, garantindo que a água utilizada para nutrir as plantas mantenha as condições ideais para o crescimento destas.
- Monitorização visual: Nesta área, foram instaladas duas câmaras com finalidades distintas. A primeira câmara foi posicionada para capturar imagens periódicas das plantas, permitindo uma análise visual do crescimento ao longo do tempo e a deteção de eventuais problemas, como deficiências nutricionais ou doenças. A segunda câmara foi direcionada para uma placa adesiva destinada a capturar insetos, especificamente utilizada para monitorizar a presença e a quantidade de insetos na estufa. Este sistema é essencial para a deteção precoce de pragas, ajudando na implementação de medidas corretivas sem recorrer a inseticidas prejudiciais para o sistema aquapónico.

Cada um destes sistemas de monitorização adquire e processa dados em tempo real. Com a integração destes sensores, é possível identificar rapidamente qualquer desvio nos parâmetros da qualidade da água, permitindo uma intervenção imediata. A monitorização não só melhora a eficiência operacional, como também minimiza o risco de problemas que possam comprometer o equilíbrio do sistema.

ARQUITETURA E ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO PROPOSTO

Neste capítulo, é detalhado o sistema de monitorização proposto, descrevendo a sua arquitetura, o seu funcionamento e as suas especificações técnicas. A implementação de sensores inteligentes, permite a aquisição de dados em tempo real, proporcionando um controlo mais rigoroso e eficaz dos parâmetros do sistema de aquaponia. São abordados os módulos referentes à recolha de dados, processamento, comunicação e à sua aplicação, evidenciando como estes contribuem para a otimização do ciclo aquapónico, assegurando a sustentabilidade do sistema e o bem-estar dos organismos nele envolvidos.

4.1 TOPOLOGIA GERAL DO SISTEMA PROPOSTO

Na Figura 8, encontra-se o diagrama geral do subsistema de monitorização proposto para o sistema aquapónico. Este sistema é composto por quatro módulos principais: o módulo sensorial, o módulo de processamento, o módulo de comunicação e o módulo de alimentação elétrica, além de uma aplicação onde o utilizador pode visualizar, em tempo real, os resultados da monitorização dos parâmetros da qualidade da água.

O módulo de processamento funciona como o “cérebro” do sistema. Equipado com um microcontrolador, este módulo recebe, processa e condiciona os dados enviados pelo módulo sensorial. Neste módulo, os dados são organizados e preparados para serem enviados para a aplicação através do módulo de comunicação. Além disso, o processamento centralizado permite identificar rapidamente qualquer anomalia nos parâmetros monitorizados, possibilitando intervenções eficazes sempre que necessário.

O módulo de comunicação é responsável pela transmissão dos dados processados para a aplicação, que funciona como a interface principal entre o sistema e o utilizador. Através deste módulo, os dados são enviados de forma contínua e em tempo real, permitindo ao utilizador acompanhar de forma prática o estado do sistema aquapónico.

A aplicação é onde o utilizador pode visualizar os resultados da monitorização, permitindo um acompanhamento em tempo real de todos os parâmetros monitorizados. A *interface* da aplicação fornece uma visão clara e acessível dos dados recolhidos, o que facilita a gestão e manutenção do sistema aquapónico, ajudando a manter o equilíbrio necessário para a sustentabilidade do sistema e o bem-estar dos organismos nele envolvidos.

Nos próximos subcapítulos será realizada uma análise detalhada de cada um desses sistemas. Cada sistema proposto possui uma função específica garantindo uma monitorização eficaz e contínua dos parâmetros relevantes.

4.2 SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NA ESTUFA

Neste subcapítulo, é apresentada uma descrição detalhada do sistema de monitorização da qualidade da água na estufa. Este sistema foi projetado para recolher dados na cama das plantas, um ponto crítico no ciclo aquapónico, dado que é aqui que as plantas são nutridas e onde o equilíbrio químico da água influencia diretamente o crescimento das culturas. A monitorização neste local é fundamental, pois permite ajustar e manter as condições ideais de crescimento para as plantas, assegurando um ambiente propício tanto para as plantas como para os organismos aquáticos envolvidos. No subcapítulo [4.2.1](#), será incluído um diagrama específico deste sistema, destacando os sensores e componentes utilizados para a monitorização da qualidade da água na estufa. Este diagrama permitirá uma visão clara da disposição e integração dos componentes e elucidará como os dados são recolhidos e transmitidos para processamento e análise.

4.2.1 Diagrama de Monitorização da Qualidade da Água

Neste subcapítulo está apresentado o diagrama detalhado do sistema de monitorização implementado na estufa, evidenciando os principais componentes e o fluxo de dados entre eles. O objetivo deste sistema é garantir uma monitorização precisa e em tempo real dos parâmetros críticos da qualidade da água, nomeadamente o pH, a temperatura, o sólidos dissolvidos totais, a condutividade elétrica e o potencial de oxidação-redução.

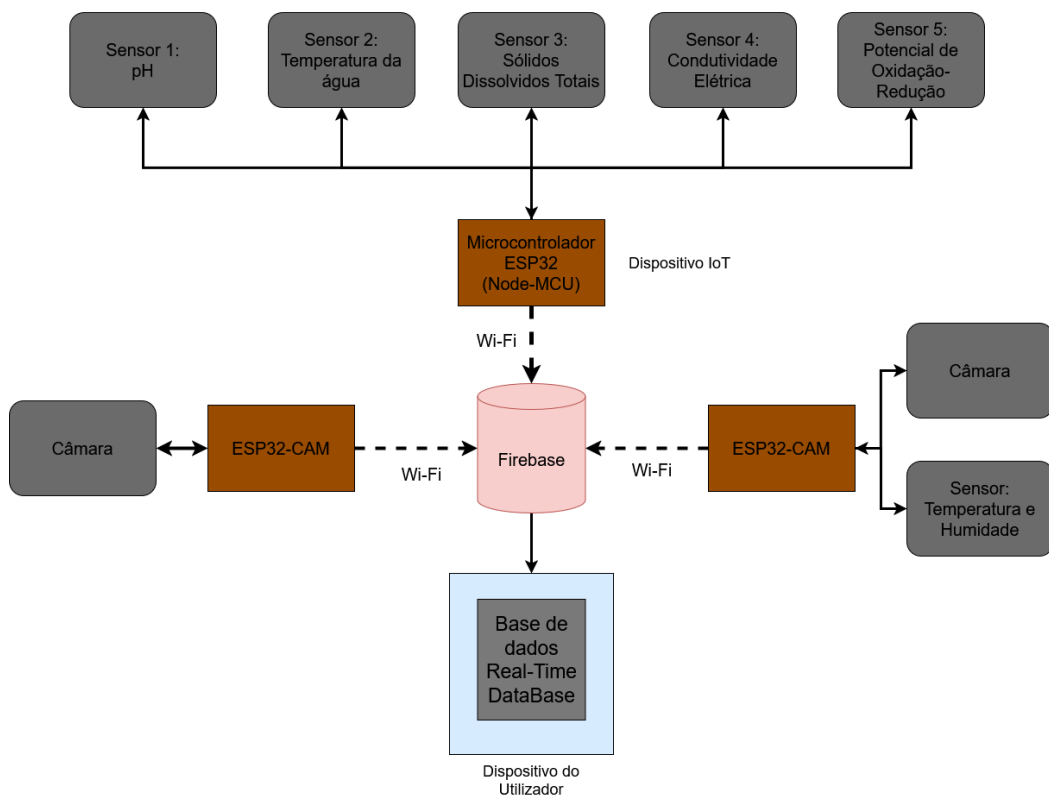


Figura 9: Diagrama da monitorização da qualidade da água.

Conforme ilustrado na Figura 9, o sistema é composto por cinco sensores especializados, cujos dados são recolhidos e comunicados em tempo real a um microcontrolador ESP32, que desempenha o papel de unidade central de processamento e comunicação. O ESP32 realiza a recolha, validação, condicionamento e receção dos dados antes de os transmitir. Este dispositivo IoT estabelece a ligação através de uma rede Wi-Fi, assegurando a transmissão eficiente dos dados recolhidos para a RTDB (Real Time Data Base) da Firebase, uma base de dados em tempo real, garantindo um armazenamento organizado e acessível.

O sistema também incorpora duas ESP32-CAM dedicadas à monitorização visual, que complementam os dados recolhidos pelos sensores. A primeira ESP32-CAM é responsável por capturar imagens regulares do crescimento das plantas, permitindo uma análise visual do seu desenvolvimento ao longo do tempo. A segunda ESP32-CAM monitoriza a presença e quantidade de insetos na estufa, contribuindo para a identificação de possíveis ameaças à saúde das plantas. Ambas as câmaras transmitem as imagens diretamente para a base de dados Firebase, onde ficam organizadas por ordem de envio, possibilitando o acesso remoto e contínuo dos dados visuais. Na RTDB, os dados são estruturados por ordem cronológica e identificados por sensor, permitindo uma consulta clara e eficiente das informações. Embora a aplicação cliente permita ao utilizador aceder aos dados de forma organizada, a análise detalhada, como a construção de gráficos ou relatórios, é realizada manualmente com base nas informações disponíveis.

4.2.2 Componentes do Sistema

Neste subcapítulo serão descritos detalhadamente cada um dos componentes utilizados no sistema de monitorização da qualidade da água na estufa. Cada componente foi selecionado com base na sua fiabilidade, precisão e adequação ao contexto específico deste projeto.

4.2.2.1 Sensores

Os sensores são elementos fundamentais deste sistema, uma vez que permitem a monitorização contínua dos parâmetros críticos que determinam a qualidade da água no sistema aquapónico. Após uma análise rigorosa e fundamentada, foram selecionados sensores específicos para medir pH, temperatura, sólidos dissolvidos totais, a condutividade elétrica e o potencial de oxidação-redução. A escolha destes parâmetros foi justificada e explicada em capítulos anteriores, sendo essenciais para garantir a sustentabilidade e o equilíbrio do sistema. Adicionalmente, foi integrado um sensor de temperatura e humidade numa das ESP32-CAM, com o objetivo de monitorizar o ambiente geral da estufa. Esta informação é particularmente relevante para avaliar as condições climáticas e o seu impacto no crescimento das plantas e também na qualidade da água. Nos próximos pontos, serão apresentados e descritos detalhadamente cada um dos sensores selecionados, destacando as suas características técnicas, funcionamento e a sua integração no sistema.

-SENSOR DE PH: [8]O sensor de pH é responsável pela medição contínua do nível de acidez ou alcalinidade da água. O pH representa a concentração de iões de hidrogénio numa solução e é uma variável fundamental, influenciando diretamente diversos parâmetros no sistema de aquaponia, nomeadamente a disponibilidade de nutrientes para as plantas e a taxa de nitrificação. A escala de pH varia de 0 a 14, sendo que valores inferiores a 7 indicam um meio ácido, caracterizado por uma elevada concentração de iões H_3O^+ , enquanto um valor próximo de 7 representa um meio neutro. Por outro lado, valores superiores a 7 indicam um meio básico ou alcalino, com uma menor concentração de iões H_3O^+ [8][11]. No que diz respeito às plantas, um pH demasiado baixo ($<6,0$) promove uma absorção excessivamente rápida dos nutrientes, podendo resultar em toxicidade por excesso de determinados elementos. Por outro lado, um pH elevado ($>6,5$) reduz a solubilidade dos nutrientes essenciais, podendo levar a deficiências nutricionais e comprometer o crescimento das plantas [8][12]. Relativamente aos peixes, a faixa recomendada de pH situa-se entre 6,0 e 8,5, dependendo da espécie. De forma geral, valores entre 6,0 e 7,0 são considerados ideais para sistemas de aquaponia, garantindo um equilíbrio entre a disponibilidade de nutrientes para as plantas e a saúde dos peixes [8][13]. O sensor selecionado para este projeto foi o sensor de pH analógico V2 (SEN17004), cuja fotografia é apresentada na Figura 10.



Figura 10: Sensor de pH analógico V2 utilizado no sistema (SEN17004).

A escolha deste sensor deve-se às seguintes características:

- Elevada precisão e exatidão na medição dos valores de pH: fundamentais para garantir a estabilidade do sistema aquapónico.
- Compatibilidade com o microcontrolador ESP32: facilitando a recolha e processamento dos dados.
- Resistência e fiabilidade em medições contínuas em ambientes aquáticos.

A integração do sensor com o sistema permite uma monitorização em tempo real, com o envio contínuo dos dados a partir do ESP32 utilizando uma ligação WiFi, para a *Firebase*, assegurando que quaisquer variações nos valores de pH sejam detetadas prontamente.

-SENSOR DE TEMPERATURA: O sensor de temperatura é responsável pela medição contínua da temperatura, sendo este um parâmetro crucial para a produção vegetal, uma vez que tem um impacto mais significativo do que a temperatura do ar. A gama de temperatura recomendada para sistemas hidropónicos situa-se entre 18 °C e 30 °C, uma vez que valores superiores podem restringir a absorção de cálcio pelas plantas. No caso dos peixes, a temperatura varia consoante o clima local e a espécie em questão. Por exemplo, espécies de água fria apresentam uma tolerância entre 10 °C e 18 °C, enquanto espécies tropicais toleram temperaturas entre 22 °C e 31 °C [8][14]. O sensor selecionado foi o DS18B20, cuja configuração pode ser observada na Figura 11.



Figura 11: Sensor temperatura utilizado no sistema (DS18B20).

A escolha deste sensor deve-se às seguintes características:

- Resistência à água: O sensor DS18B20 é fornecido com uma estrutura à prova de água, tornando-o adequado para a medição direta da temperatura no meio aquático.
- Alcance alargado: Vem equipado com cabos de extensão, permitindo a sua instalação em locais específicos do tanque ou sistema de circulação da água.
- Alta precisão, exatidão e estabilidade: O sensor proporciona medições fiáveis da temperatura, com uma margem de erro reduzida ($\pm 0,5$ °C), assegurando que os dados recolhidos refletem a realidade do ambiente aquático.

- Compatibilidade com o microcontrolador ESP32: A integração direta com o ESP32 simplifica a recolha, processamento e envio contínuo dos dados para a base de dados. Este sensor tem tensões de $0 \sim 3,3$ V, verificando a compatibilidade com o microcontrolador.

A comunicação do sensor com o sistema é feita através do microcontrolador ESP32, que processa os dados recolhidos e os envia para a base de dados em tempo real, utilizando uma ligação Wi-Fi com a Firebase. Este fluxo contínuo de dados permite que o utilizador acompanhe remotamente as condições do sistema e tome decisões fundamentadas para a sua manutenção.

-SENSOR DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE): O sensor de condutividade elétrica é utilizado para medir a capacidade de condução de corrente elétrica na água, um indicador essencial para avaliar a concentração de nutrientes dissolvidos no sistema aquapónico. Este é um parâmetro fundamental para garantir o equilíbrio químico necessário para a saúde das plantas e dos peixes. Os valores recomendados para a condutividade elétrica em sistemas de aquaponia variam entre $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$ e $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$, dependendo da cultura cultivada e das condições ambientais. Valores superiores a $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ indicam um excesso de sais dissolvidos, o que pode comprometer a absorção de nutrientes essenciais ao crescimento das plantas. Esse efeito resulta numa redução significativa da percentagem de matéria seca total da parte aérea e das raízes, bem como numa diminuição dos teores de clorofila 'a', 'b' e carotenóides. De um modo geral, uma CE elevada dificulta a absorção de nutrientes ao aumentar a pressão osmótica da solução nutritiva, enquanto uma CE demasiado baixa pode afetar gravemente a saúde e produtividade das plantas devido à deficiência de nutrientes essenciais [8][15].

No que diz respeito aos peixes, é necessário um teor mínimo de cloreto de sódio (NaCl) para manter o equilíbrio osmótico, embora os valores ideais de CE dependam das condições específicas do habitat. A gama recomendada para a maioria das espécies de água doce situa-se entre $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ em águas muito limpas e $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ em águas mais ricas em matéria orgânica [8][16].

Valores excessivamente elevados de CE podem provocar stress osmótico nos peixes, alterando a concentração interna de sais e outros eletrólitos essenciais à sua homeostasia. O aumento da condutividade pode ainda potenciar a acumulação de iões metálicos tóxicos, prejudiciais à saúde dos peixes, bem como interferir na capacidade da água para transportar oxigénio dissolvido, afetando negativamente a respiração aquática. Por outro lado, valores excessivamente baixos de

CE podem comprometer o equilíbrio iónico dos peixes, dificultando a regulação osmótica, tornando-os mais suscetíveis a doenças e afetando o seu crescimento e metabolismo [8][17]. O sensor escolhido para medir a condutividade elétrica foi o Gravity: Sensor analógico de condutividade elétrica (SEN08024), que pode ser observado na Figura 12.



Figura 12: Sensor condutividade elétrica utilizado no sistema (SEN08024).

A escolha deste sensor deve-se às seguintes características:

- Alta precisão e exatidão: Este sensor é capaz de medir com elevada fiabilidade os valores de condutividade elétrica, fornecendo uma leitura exata da quantidade de sais dissolvidos na água.
- Compatibilidade com o microcontrolador ESP32 e Fiabilidade: Permite a integração direta no sistema, possibilitando a transmissão contínua dos dados para a base de dados em tempo real, sem necessidade de intervenção durante grandes períodos de tempo.
- Robustez e resistência: O SEN080244 foi projetado para operar em ambientes aquáticos exigentes, sendo resistente a corrosão e garantindo durabilidade em medições contínuas.
- Compatibilidade com o microcontrolador ESP32: A sua saída analógica facilita a integração com o sistema, permitindo a recolha e envio contínuo dos dados.

-SENSOR DE ORP: O sensor de potencial de oxidação-redução é responsável pela medição contínua da capacidade de oxidação ou redução da água. O sensor selecionado foi o Gravity: Sensor de ORP analógico (SEN08043), possível observar na Figura 13.



Figura 13: Sensor ORP utilizado no sistema (SEN08043).

A escolha deste sensor deve-se às seguintes características:

- Alta precisão: Este sensor é capaz de medir variações mínimas no potencial de oxidação-redução, oferecendo dados fiáveis sobre a qualidade química da água.
- Fácil integração: Projetado para funcionar com microcontroladores como o ESP32, utiliza uma interface analógica que simplifica a comunicação e recolha de dados.
- Resistência e durabilidade: Desenvolvido para aplicações em ambientes aquáticos, o sensor apresenta uma construção robusta que permite medições contínuas sem degradação do desempenho.
- Compatibilidade química: O sensor pode operar numa ampla gama de soluções químicas sem comprometer a sua exatidão, tornando-o ideal para sistemas aquapónicos que utilizem diferentes fertilizantes e compostos orgânicos.

O processo de oxidação-redução, conhecido como redox, desempenha um papel fundamental na biodegradação da matéria orgânica excretada no sistema. O potencial de oxidação-redução reflete a energia química envolvida nestas reações, convertendo-a em energia elétrica. Este valor mede a atividade dos eletrões em relação a um eletrodo de referência, sendo positivo quando predomina a oxidação e negativo quando ocorre redução [8][2]. Este sensor tem bastante importância já que, o ORP é considerado um dos principais indicadores na depuração da água, uma vez que reflete a capacidade do meio para oxidar matéria orgânica. Na aquacultura, a matéria orgânica provém essencialmente das fezes dos organismos e de restos de alimento, entrando em decomposição na presença de oxigénio [8][18]. Em sistemas de aquaponia, baixos

níveis de matéria orgânica correspondem a um maior poder oxidante, enquanto concentrações elevadas reduzem a capacidade de oxidação. O ORP varia consoante a composição e a atividade do meio aquático, sendo recomendado um valor de aproximadamente 250 mV para aquacultura [8][19]. Além disso, existe uma relação estreita entre o ORP e a concentração de ozono dissolvido, um elemento eficaz na desinfecção da água [8][20]. Níveis elevados de ORP indicam uma maior capacidade da água para eliminar microrganismos e contaminantes à base de carbono, contribuindo para um ambiente mais saudável no sistema aquático [8][21].

-SENSOR SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS (SDT): O sensor de sólidos dissolvidos totais é responsável pela medição contínua da concentração de sólidos dissolvidos na água, sendo um parâmetro essencial para avaliar a qualidade da água em sistemas aquapónicos. O sensor utilizado neste sistema é o Gravity: Analog SDT Sensor (SEN08030), que pode ser observado na Figura 14.

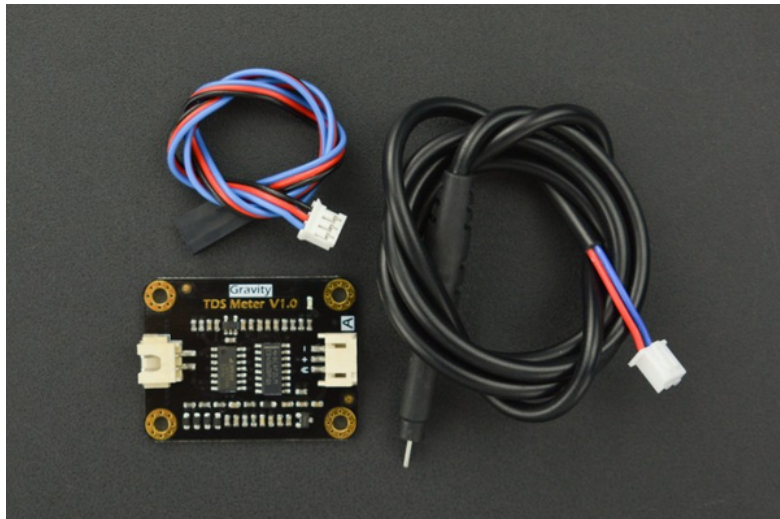


Figura 14: Sensor SDT (SEN08030) utilizado no sistema.

A escolha deste sensor deve-se às seguintes características:

- Alta sensibilidade, exatidão e precisão: Este sensor mede com fiabilidade os níveis de SDT, permitindo avaliar o estado geral da qualidade da água e a concentração de nutrientes dissolvidos no sistema.
- Resistência e durabilidade: A sonda do sensor é projetada para uso em ambientes aquáticos, garantindo medições estáveis mesmo em condições adversas.
- Compatibilidade com o ESP32: Este sensor opera através de sinais analógicos, sendo facilmente integrado ao microcontrolador ESP32 utilizado no sistema.

- Ampla gama de medição: Suporta medições entre 0 e 2000 ppm, cobrindo a faixa ideal para sistemas aquapônicos.

Este sensor funciona através da medição da condutividade elétrica da água, convertendo os valores para sólidos dissolvidos totais, apresentados em partes por milhão (ppm). Valores elevados de SDT podem indicar uma concentração excessiva de nutrientes, enquanto valores muito baixos podem indicar a necessidade de suplementação, ambos fatores críticos para a saúde das plantas e organismos aquáticos.

-SENSOR DE TEMPERATURA E HUMIDADE (DHT22): Este sensor é responsável pela medição da temperatura e humidade relativa do ar, com o propósito de monitorizar as condições ambientais da estufa. Este sensor é colocado numa das ESP32-CAM, complementando a monitorização visual com dados ambientais detalhados. É possível observar este sensor na Figura 15.

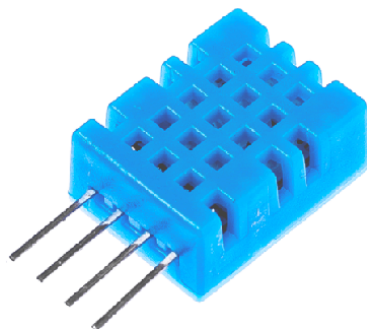


Figura 15: Sensor de temperatura e humidade utilizado no sistema (DHT22).

A escolha deste sensor deve-se às seguintes características:

- Alta precisão e exatidão: Fornece medições exatas de temperatura ($\pm 0,5$ °C) e humidade relativa ($\pm 2-5$ % RH), essenciais para acompanhar variações ambientais significativas na estufa.
- Compatibilidade com o ESP32: O sensor comunica de forma simples utilizando um protocolo digital, facilitando a integração com o microcontrolador.
- Baixo consumo de energia: Ideal para sistemas IoT que requerem eficiência energética.
- Ampla gama de operação: Mede temperaturas entre -40 °C e 80 °C e humidade relativa entre 0 % e 100 %, abrangendo todas as condições possíveis no ambiente de estufa.

A monitorização realizada pelo DHT22 permite identificar alterações ambientais que possam ter impacto no crescimento das plantas. Apesar do seu tempo de atualização ser relativamente lenta (2 segundos por leitura), esta limitação é mitigada pela integração do sensor no sistema de monitorização visual. Como há apenas envio de fotografias de 10 em 10 minutos o sensor tem sempre tempo para realizar a correta leitura. Os valores de temperatura e humidade recolhidos são enviados diretamente para a base de dados Firebase, assegurando um armazenamento organizado e acessível para análise posterior.

A integração de todos estes sensores no sistema de monitorização permite um acompanhamento contínuo e em tempo real, assegurando a manutenção das condições ideais para o equilíbrio do sistema aquapónico.

4.2.2.2 *Microcontrolador ESP32*

O microcontrolador utilizado no sistema é o ESP32 da *Espressif*, que desempenha o papel de "cérebro" do projeto, sendo responsável pelo processamento e comunicação de todos os dados. O ESP32 é amplamente reconhecido pela sua versatilidade, baixo consumo energético e integração nativa com comunicação Wi-Fi e Bluetooth, o que o torna adequado para uma ampla gama de aplicações IoT. A Figura 16 apresenta o módulo ESP32, cuja escolha foi motivada pelo facto de cumprir plenamente os requisitos do projeto, oferecendo um equilíbrio ideal entre desempenho, custo e facilidade de integração com múltiplos sensores, tanto digitais quanto analógicos. Além disso, a familiaridade adquirida ao longo dos anos com este microcontrolador reforçou a decisão pela sua utilização.

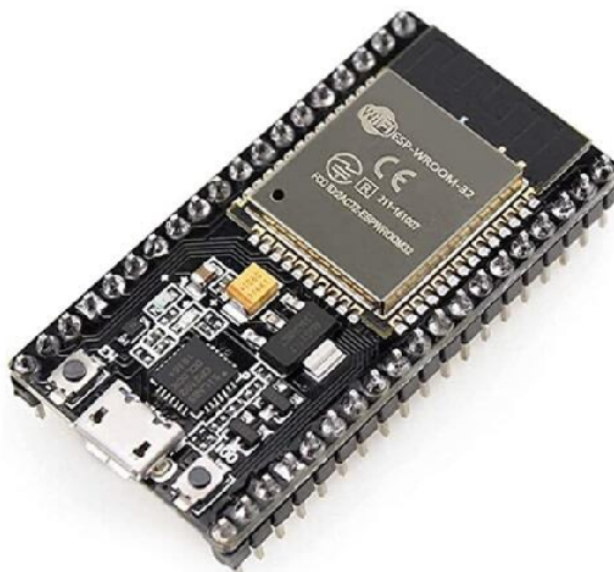


Figura 16: Módulo com o microcontrolador ESP32.

Principais características do microcontrolador ESP32 (desenvolvido pela EspressIF Systems):

- Processador: Xtensa® dual-core 32-bit LX6, com frequência máxima de 240 MHz (também disponível em versões com single-core).
- Memória RAM: 520 kbytes de SRAM interna.
- Memória Flash: Suporte para memórias Flash externas (geralmente 4 MBytes, dependendo do módulo utilizado).
- Wi-Fi: Suporte para IEEE 802,11b/g/n, com modos AP (Access Point), STA (Station) e AP+STA.
- Bluetooth: Bluetooth v4,2 BR/EDR (Basic Rate/Enhanced Data Rate) e BLE (Bluetooth Low Energy).
- Conversor ADC: 12-bit SAR ADC (Successive Approximation Register) com até 18 canais analógicos.
- DAC: 2 canais de conversão digital-para-analógico (8 bits cada).
- Pinos GPIO: Até 34 GPIOs configuráveis para funções digitais e analógicas.
- Comunicações série:
 - 4x SPI (Serial Peripheral Interface).
 - 2x I2C (Inter-Integrated Circuit).
 - 3x UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter).

- PWM: Até 16 canais para controlo de motores, LEDs ou outros dispositivos PWM.
- Tensão de alimentação: 3,3 V.
- Consumo de corrente:
 - Modo ativo: 240 mA (transmissão Wi-Fi) e 100 mA (recepção Wi-Fi).
 - Modem-Sleep: 10–68 mA (Wi-Fi desativado).
 - Deep Sleep: 10 μ A (estado de baixa potência).

O ESP32 centraliza todas as leituras dos sensores integrados no sistema, processa os dados em tempo real e transmite-os para a base de dados em tempo real (RTDB) da *Firebase*. Entre os sensores utilizados, a maioria opera com valores analógicos, enquanto o sensor de temperatura DS18B20 utiliza comunicação digital, destacando a flexibilidade do ESP32 em suportar múltiplos tipos de interface. Adicionalmente, o sistema foi projetado de forma modular, com portas de expansão e uma ligação disponível, permitindo a adição de novos sensores ou funcionalidades complementares no futuro. Esta abordagem garante que o sistema possa ser adaptado a novas exigências, como a inclusão de sensores para monitorização de parâmetros adicionais ou mesmo módulos para automação.

As leituras dos sensores são armazenadas temporariamente em *buffers* e posteriormente enviadas para a *Firebase* de forma organizada e estruturada. Cada sensor possui um caminho específico na hierarquia da base de dados, mas todos estão organizados sob um diretório principal, garantindo clareza e facilidade de acesso aos dados. Para assegurar uma correta ordenação temporal das leituras, cada registo é precedido por uma *timestamp*, obtida a partir da API *OpenWeather*. Esta API foi escolhida pela sua confiabilidade e ampla utilização em aplicações similares. Os dados são enviados à *Firebase* em intervalos regulares de 30 minutos, tendo sido este intervalo definido como adequado para garantir uma monitorização contínua e eficaz do sistema.

A comunicação entre o ESP32 e a *Firebase* utiliza o protocolo HTTP. Este protocolo foi selecionado devido à sua simplicidade e ampla compatibilidade com sistemas baseados em internet. Cada dado enviado é encapsulado em mensagens JSON, garantindo que as leituras sejam armazenadas na *Firebase* de forma clara e hierárquica. A função de envio implementada no ESP32 inclui verificações para assegurar que os dados sejam transmitidos apenas quando a ligação com a *Firebase* estiver operacional. Para proteger os dados e prevenir acessos não autorizados,

a autenticação na *Firebase* requer um utilizador, palavra-passe e um *token* de segurança. A implementação técnica deste envio mostra-se na Figura 17.

```
void sendFirebase(const char* str, String path) {
  json.set(path.c_str(), String(str));
  parentPath = databasePath + "/" + a;
  if (Firebase.ready()) {
    if (Firebase.RTDB.setJSON(&fbdo, parentPath.c_str(), &json)) {

    } else {
      Serial.println("FAILED");
      Serial.println(fbdo.errorReason());
    }
  }
}
```

Figura 17: Código de envio dos dados para a *Firebase*.

Relativamente ao impacto da latência, o sistema foi projetado para minimizar atrasos na comunicação. As funções de envio de dados não incluem *delays*, assegurando que a recolha e envio de dados são realizados de forma independente. Esta abordagem garante que o envio de informações para a *Firebase* ocorra sem interferências das leituras em tempo real dos sensores. A monitorização contínua é, assim, garantida sem interrupções ou atrasos significativos.

Em caso de falha na ligação *Wi-Fi*, o sistema interrompe temporariamente a recolha e envio de dados, aguardando o restabelecimento da conexão antes de retomar as operações. Esta abordagem evita o envio de leituras incompletas ou incorretas, garantindo a fiabilidade do sistema.

O ESP32 é alimentado diretamente por uma fonte de alimentação 230/12 V, eliminando a necessidade de otimizações energéticas adicionais. Esta configuração foi escolhida devido à sua simplicidade e pela exigência de recolha contínua de dados para a manutenção do equilíbrio no sistema aquapónico. Apesar de ser um microcontrolador eficiente em termos de consumo energético, a alimentação constante garante o funcionamento ininterrupto.

4.2.2.3 ESP32-CAM

O sistema de monitorização integra duas ESP32-CAM. Estes módulos microcontroladores com câmaras integradas, são responsáveis pela captura de imagens e pela recolha de dados visuais. Estes dispositivos complementam a monitorização do sistema com informações visuais relevantes sobre o ambiente da estufa, desempe-

nhando um papel essencial na deteção precoce de problemas. É possível observar na Figura 18, um exemplo de um módulo ESP32-CAM, incluindo a sua câmara.



Figura 18: Módulo ESP32-CAM, com uma câmara.

As principais características do ESP32-CAM (desenvolvido pela Espressif Systems), são:

- Processador: Xtensa® dual-core 32-bit LX6 com frequência máxima de 240 MHz.
- Memória RAM: 520 kbytes SRAM interna, com 4 MBytes PSRAM externa para processamento de dados adicionais (como imagens).
- Wi-Fi: IEEE 802,11b/g/n, modos AP (Access Point), STA (Station) e AP+STA.
- Câmara: Módulo OV2640
- Armazenamento: Suporte para cartões microSD (até 4 GB), útil para armazenamento local de imagens ou vídeos.
- GPIOs: Até 9 GPIOs disponíveis (dos 34 do ESP32), devido às funções já atribuídas a módulos integrados.
- Interfaces de comunicação:
 - SPI (Serial Peripheral Interface).
 - I2C (Inter-Integrated Circuit).
 - UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter).
- PWM: Suporte para controlo de LEDs ou outros dispositivos com modulação de largura de pulso.

- Tensão de alimentação: 5 V (entrada através de pinos ou microUSB) com regulador interno para 3,3 V.
- Corrente de operação:
 - Modo ativo com Wi-Fi: 160–240 mA.
 - Deep Sleep: 10 μ A (sem uso de periféricos).
- Placa de desenvolvimento: Inclui suporte para carregamento de *firmware* através de FTDI ou CP2102 (programadores externos).
- Dimensões: Compacta, com cerca de 27 mm x 40,5 mm x 4,5 mm.

Os ESP32-CAM foi configurado para capturar imagens que documentam o crescimento das plantas no sistema aquapónico. Este módulo também inclui um sensor DHT22, que recolhe dados sobre a temperatura e a humidade do ambiente na estufa. Estes parâmetros são cruciais para identificar fatores ambientais que possam influenciar negativamente o desenvolvimento das plantas.

Para a captura de imagens, utilizou-se a câmara modelo OV2640, integrada no ESP32-CAM. As imagens são armazenadas no formato JPEG, que oferece uma boa compressão com preservação aceitável da qualidade visual, sendo o mais adequado para transmissões eficientes. A resolução escolhida foi o formato XGA (1024x768 píxeis), constituindo um equilíbrio entre qualidade e dimensão do ficheiro, com a compressão ajustada para a qualidade máxima suportada pela câmara. Desta forma, cada imagem tem um tamanho médio de aproximadamente 20 kB (kBytes).

O segundo módulo ESP32-CAM é utilizada para monitorizar uma folha adesiva colocada estrategicamente na estufa, que serve como armadilha para capturar insetos. Este método permite a deteção precoce de pragas e facilita a implementação de medidas de controlo direcionadas, minimizando impactos negativos no sistema aquapónico.

Devido à necessidade de maior detalhe para identificar corretamente os insetos capturados, utilizou-se a câmara OV5640, que oferece melhor qualidade de imagem. Embora o formato JPEG e a resolução XGA tenham sido mantidos para compatibilidade e eficiência de armazenamento, a qualidade superior da câmara traduz-se em imagens mais detalhadas, com um tamanho médio de aproximadamente 70 kB por imagem.

Ambas os módulos ESP32-CAM capturam imagens em intervalos regulares, evitando sobrecarga no processamento e comunicação. As imagens capturadas são enviadas para a *Firestore Storage*, onde ficam organizadas cronologicamente. Parale-

lamente, são gerados *links* de acesso direto para cada imagem, que são armazenados na base de dados em tempo real (RTDB) da *Firestore*.

4.2.3 Transmissão de Dados

A transmissão de dados é um elemento central no sistema de monitorização, assegurando que tanto as leituras recolhidas pelos sensores conectados ao ESP32 como as imagens capturadas pelas ESP32-CAM são enviadas de forma eficiente e segura para a *Firestore*. O sistema foi concebido para garantir uma comunicação robusta, escalável e organizada, suportando as necessidades atuais e futuras do projeto.

Os dados recolhidos pelos sensores ligados ao ESP32 são transmitidos através de mensagens em formato JSON, estruturadas para facilitar a organização e análise. Cada sensor possui o seu próprio caminho específico na hierarquia da *Firestore* RTDB, onde as leituras são armazenadas juntamente com uma *timestamp* que permite a consulta cronológica dos registos. Este formato hierárquico é ilustrado na Figura 19. Cada mensagem ocupa aproximadamente 230 bytes, variando ligeiramente conforme os valores recolhidos pelos sensores.

```
"1": {
  "-Timestamp": "2023-11-06 16:05:56",
  "CE": "1.5857 mS/cm",
  "ORP": "150.2636 mV",
  "TDS": "881.916 ppm",
  "WaterTemperature": "18.8°C",
  "pH": "7.92"
}
```

Figura 19: Formato das mensagens em formato JSON proveniente dos sensores.

As ESP32-CAM, por sua vez, enviam imagens capturadas para a *Firestore* Storage. Para evitar a necessidade de aceder diretamente à *Storage*, os *links* para estas imagens são automaticamente gerados e guardados na RTDB. No caso da ESP32-CAM dedicada ao crescimento das plantas, informações complementares como temperatura e humidade ambiente, recolhidas pelo sensor DHT22, são armazenadas no mesmo caminho hierárquico, permitindo um acesso integrado aos dados visuais e às condições ambientais. O formato destas mensagens na RTDB é ilustrado na Figura 20, e cada mensagem ocupa cerca de 200 bytes.

```

"531": {
  "Humidity": "95.00%",
  "Temperature": "23.00°C"
}
"camera": []
"https://firebasestorage.googleapis.com/v0/b/aquaponiaproto.appspot.com/o/historyExt%2FCamera%2F0?alt=media&token=b8ca1f25-5eb4-4580-adce-4c4ccfd0aa92"

```

Figura 20: Formato das hierarquias da câmara.

O sistema foi projetado para lidar com falhas na ligação Wi-Fi. No caso do ESP32, os dados dos sensores são temporariamente armazenados em *buffers* internos até que a conexão seja restabelecida, garantindo que nenhuma leitura seja perdida. As ESP32-CAM adotam uma abordagem semelhante, suspendendo a transmissão de imagens até que a ligação seja restaurada.

Para minimizar a latência, o sistema utiliza comunicação assíncrona, permitindo que os dados sejam processados e enviados de forma contínua e sem interrupções. No caso do ESP32, a recolha e o envio de dados ocorrem sem *delays* desnecessários, assegurando que o sistema mantém a responsividade. As ESP32-CAM seguem um cronograma de captura e envio de imagens em intervalos regulares, ajustados para evitar sobrecarga na rede e na *Firebase*.

A arquitetura modular do sistema permite a integração de novos sensores ou módulos sem comprometer o desempenho. No caso do ESP32, foram deixadas portas adicionais disponíveis para facilitar a conexão de novos sensores no futuro. Já as ESP32-CAM podem ser alteradas a qualidade de imagens de envio a qualquer momento.

A transmissão de dados, tanto do ESP32 como dos ESP32-CAM, é protegida por um sistema de autenticação que utiliza credenciais exclusivas (utilizador, palavra-passe e *token*). O envio dos dados ocorre através do protocolo HTTPS, garantindo encriptação e proteção contra acessos não autorizados, assegurando assim a integridade e a privacidade das informações transmitidas.

4.3 MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA A FORNECER À ESTUFA

Nesta secção, será apresentada uma descrição detalhada do sistema de monitorização da qualidade da água introduzida na estufa. Este sistema foi projetado para avaliar os parâmetros essenciais da água antes de esta ser incorporada no sistema aquapónico, garantindo que cumpre os requisitos necessários para promover um ambiente equilibrado e saudável para as plantas e os organismos aquáticos. A monitorização da água neste ponto é de particular relevância, uma vez que permite a deteção

precoce de potenciais desvios nos parâmetros críticos, assegurando a manutenção da qualidade da água e, conseqüentemente, a eficiência do sistema como um todo.

O diagrama esquemático deste sistema é apresentado na Secção 4.3.1, onde se descreve a disposição dos sensores e outros componentes utilizados na análise da qualidade da água, bem como a integração funcional dos elementos do sistema, nomeadamente a forma como os dados são recolhidos, processados e integrados no sistema de monitorização global.

4.3.1 *Diagrama do Sistema de Monitorização da Qualidade da Água*

Nesta subsecção apresenta-se o diagrama detalhado do sistema de monitorização implementado fora da estufa, evidenciando os principais componentes e o fluxo de dados entre eles. O objetivo deste sistema é garantir uma monitorização precisa e em tempo real dos parâmetros críticos da qualidade da água fornecida à estufa, nomeadamente o pH, a temperatura, o sólidos dissolvidos totais. Foi igualmente previsto um sistema anti-furto. Estes parâmetros foram seleccionados devido à sua influência direta na qualidade da água.

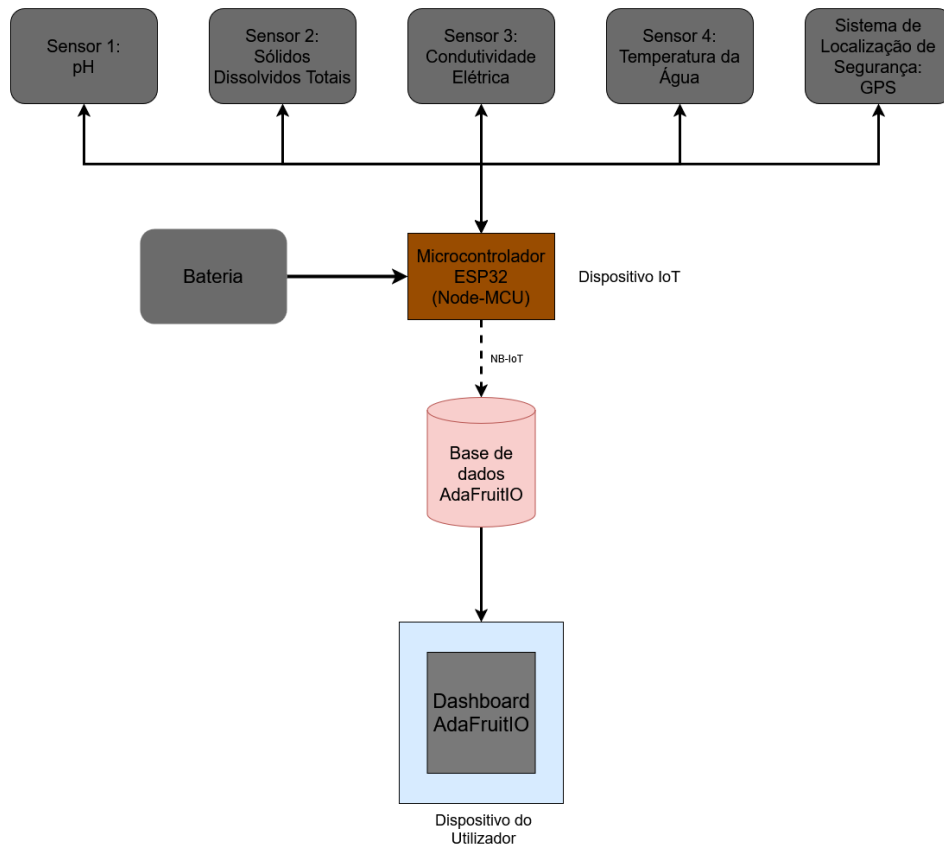


Figura 21: Diagrama do sistema de monitorização da qualidade da água na estufa.

Conforme ilustrado na Figura 21, o sistema é constituído por cinco sensores especializados, responsáveis pela recolha de dados em tempo real, que são transmitidos para um microcontrolador ESP32. Este dispositivo desempenha a função de unidade central de processamento, realizando a aquisição e validação dos dados antes de os transmitir para a base de dados.

Neste sistema, a ligação à rede é estabelecida através de NB-IoT, uma tecnologia de comunicação móvel eficiente e otimizada para dispositivos IoT, permitindo uma transmissão confiável e de baixo consumo energético. Os dados recolhidos pelos sensores são enviados para a base de dados da AdaFruitIO, que atua como um repositório em tempo real, estruturando as informações de forma organizada e acessível.

Após o processamento inicial na base de dados, as informações são disponibilizadas num *dashboard* acessível ao utilizador, permitindo a análise detalhada dos parâmetros monitorizados. A interface da aplicação cliente apresenta gráficos individuais para cada sensor, organizados de forma a facilitar a consulta e interpretação dos dados, assegurando uma experiência intuitiva e eficiente.

Uma característica diferenciadora deste sistema é a sua capacidade de gestão energética eficiente, essencial para aplicações de longa duração alimentadas por bateria. Para tal, foi implementado um circuito de controlo que permite ligar e desligar os sensores (*turn on/off*), reduzindo significativamente o consumo energético quando os sensores não estão em operação.

Esta abordagem modular e organizada não só assegura a funcionalidade essencial do sistema, mas também permite a sua expansão futura, integrando novos sensores ou funcionalidades, sem comprometer a eficiência da transmissão de dados ou a acessibilidade da informação ao utilizador.

4.3.2 Componentes do Sistema

Este sistema de monitorização foi concebido para operar fora do ambiente controlado da estufa, enfrentando desafios ambientais como exposição à água, variações climáticas e riscos de furto. Com estas exigências, houve a necessidade de incluir no seu projeto componentes especificamente adaptados para condições externas, garantindo robustez, fiabilidade e eficiência na recolha e transmissão de dados.

Nesta secção, são apresentados os componentes essenciais do sistema, destacando o papel de cada um no contexto do projeto. Cada elemento foi selecionado com base em critérios de exatidão, precisão, durabilidade e compatibilidade com os requisitos do sistema.

4.3.2.1 Sensores

Os sensores utilizados neste sistema foram escolhidos com base na sua capacidade de medir os principais parâmetros de qualidade da água, nomeadamente o pH, a temperatura, a condutividade elétrica, o oxigénio dissolvido e o sólidos dissolvidos totais. Uma vez que os requisitos para estas medições são idênticos aos do sistema já descrito na Secção 4.2.2.1, optou-se por utilizar os mesmos sensores, cujas especificações técnicas e características já foram detalhadamente apresentadas.

Estes sensores desempenham um papel crítico na recolha de dados fiáveis e na sua integração com o sistema de comunicação baseado em NB-IoT.

SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO COM GPS: Para aumentar a segurança do sistema, foi integrado um módulo recetor GPS, o u-blox MAX-M10S, possível observar na Figura 22.



Figura 22: Módulo GPS.

Este módulo fornece informações de localização em tempo real, e é baseado na tecnologia desenvolvida pela *u-blox*, reconhecida pela sua alta precisão e fiabilidade, e inclui as seguintes características principais:

- Compatibilidade com múltiplos sistemas GNSS: Suporta sistemas de navegação por satélite como GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, assegurando uma cobertura global robusta e precisa.
- Elevada precisão: Oferece uma precisão típica de localização inferior a 2,5 metros, ideal para aplicações de monitorização remota.
- Baixo consumo energético: Projetado para aplicações IoT, apresenta eficiência energética, sendo adequado para dispositivos alimentados por baterias.
- Compatibilidade com interfaces padrão: Utiliza comunicação via UART, I2C ou SPI, facilitando a integração com o microcontrolador ESP32 e outros dispositivos IoT.
- Antena externa: Suporte para antenas externas.

A integração deste módulo GPS no sistema assegura a monitorização precisa da localização do dispositivo, oferecendo uma camada adicional de segurança e adaptando-se aos desafios colocados pela operação fora da estufa.

4.3.2.2 *ESP32*

Neste sistema, optou-se novamente pela utilização do microcontrolador ESP32, que desempenha um papel central no processamento e na comunicação de todos os dados recolhidos pelos sensores e comunicação com a base de dados AdaFruitIO. A escolha deste microcontrolador foi motivada pelas mesmas razões já descritas na Secção 4.2.2.2, onde foram introduzidas as suas principais características.

No entanto, uma das diferenças significativas neste sistema é o método de transmissão de dados. Em vez de Wi-Fi, foi adotada a tecnologia NB-IoT (Narrowband IoT) como meio de comunicação, devido à necessidade de operar em locais fora do alcance de redes Wi-Fi convencionais. Esta escolha foi particularmente relevante, dado o contexto de funcionamento do sistema em ambientes externos e remotos, onde a cobertura NB-IoT oferece uma solução confiável e em termos energéticos eficiente para a transmissão de dados.

Para otimizar o consumo de energia, o ESP32 foi configurado para ativar os sensores apenas durante os períodos de recolha de dados, o que contribui significativamente para a autonomia do sistema.

4.3.2.3 *Transmissão de dados*

A transmissão de dados no sistema de monitorização da água inserida na estufa foi projetada para assegurar um envio eficiente, robusto e escalável de informações recolhidas pelos sensores e pelo módulo GPS. Este sistema distingue-se pelo uso da tecnologia de comunicação NB-IoT (Narrowband IoT), caracterizado pelas seguintes características:

1. Baixo Consumo Energético: O NB-IoT utiliza modos de economia de energia, como o eDRX (Extended Discontinuous Reception) e o PSM (Power Saving Mode), reduzindo significativamente o consumo durante períodos de inatividade.
2. Baixa largura de Banda : Opera em canais de apenas 200 kHz, permitindo comunicações eficientes em frequências licenciadas (por exemplo, bandas LTE).
3. Alta Sensibilidade de Receção: A sensibilidade do NB-IoT é superior a -120 dBm, o que garante uma boa cobertura mesmo em locais de difícil acesso, como zonas rurais ou subterrâneas.
4. Débito de Dados: A velocidade de transmissão varia entre 20 kbps a 250 kbps, sendo ideal para envio de pequenos pacotes de dados, como leituras de sensores.
5. Latência Reduzida: Apesar das otimizações para baixo consumo, o NB-IoT consegue operar com latências na ordem de 1,6 a 10 segundos, dependendo da configuração da rede.
6. Segurança: O NB-IoT utiliza autenticação robusta (*3GPP authentication and key agreement*) e encriptação para garantir a integridade dos dados.

Face às características apresentadas, o NB-IoT revelou-se uma solução ideal para aplicações em ambientes externos, não só pela sua eficiência energética, mas também pela capacidade de operar de forma fiável em locais com cobertura limitada. Esta escolha reforça a adequação tecnológica do sistema às condições e desafios do presente projeto.

O módulo NB-IoT (*SIM7020E NB-IoT HAT*) é configurado utilizando comandos AT, que controlam a ligação à rede e o envio de dados. A correta sequência de execução destes comandos é essencial para o funcionamento fiável do módulo, pois qualquer falha pode comprometer a ligação e, conseqüentemente, a transmissão de dados. Devido à sua importância, o sistema foi concebido para implementar uma estratégia de recuperação automática. Sempre que um comando AT falha ou não é reconhecido, o módulo é reiniciado e reconfigurado, isto é, há a inserção manual da rede, assegurando a continuidade das operações. Este processo garante que não há corrupção ou perda de dados durante falhas temporárias na comunicação. As etapas principais na configuração e operação do módulo incluem:

1. Verificação de Sinal e Rede:

- "+CPIN?: Verificação do cartão 'SIM' e introduzir o pin caso seja necessário.
- "+CSQ: Comando para verificar a qualidade do sinal recebido.
- "+CGACT: Comando para verificar se está à procura de rede automaticamente, neste caso só avança quando liga.
- "+COPS?: Comando para verificar se está ligado à rede certa.

2. Ligação à APN (Access Point Name):

- "*MCGDEFCONT=: Comando para caso haja falha na conexão automática, configurar a ligação à rede manualmente.

3. Estabelecimento de Comunicação MQTT:

- "+CMQNEW: Comando para criar a sessão MQTT, com a necessidade de utilizar o *broker* e o *port* do MQTT.
- "+CMQCON=: Comando para enviar uma solicitação MQTT, onde há a necessidade de inserir as credenciais.
- "+CMQPUB=: Comando para fazer a publicação no MQTT, onde são inseridos os dados dos sensores e enviados para o *AdaFruitIO*.
- "+CMQDISCON=0: Comando para desligar o MQTT.

Cada sensor está associado a um *Feed* específico na AdaFruitIO, onde os dados são armazenados cronologicamente. O histórico de cada *Feed* tem uma capacidade de 1 kB. Como o sistema tem um intervalo de tempo de envio de 30 minutos, a apresentação no histórico tem um armazenamento para uma média de 300 medições, garantindo pelo menos 6 dias de dados no histórico.

Além dos dados dos sensores, o são também enviadas informações sobre a localização com o módulo GPS para a AdaFruitIO. Os dados do módulo GPS (u-blox MAX-M10S) são utilizados para enriquecer as informações do sistema com localização exata. Estes dados são enviados em formato JSON para a AdaFruitIO e integrados em dashboards que combinam os gráficos dos sensores com mapas de localização.

A utilização do NB-IoT neste sistema oferece uma solução técnica robusta e eficiente para ambientes externos. A combinação da tecnologia NB-IoT com a AdaFruitIO garante uma transmissão de dados fiável e uma experiência de utilizadora rica, assegurando que todas as informações relevantes estejam disponíveis de forma clara e acessível.

Após a configuração e estabilização da ligação NB-IoT, os dados recolhidos pelos sensores são transmitidos para a plataforma Adafruit IO, responsável pelo armazenamento e visualização da informação. Esta comunicação é realizada através do protocolo MQTT, compatível com o módulo NB-IoT e perfeito para este tipo de sistemas.

A ligação à plataforma Adafruit IO requer a definição prévia de *feeds*, que correspondem a canais de dados individuais onde cada parâmetro é armazenado cronologicamente. Cada um desses *feeds* é associado a um tópico MQTT, permitindo a publicação dos valores dos sensores de forma separada e organizada.

O protocolo MQTT baseia-se num modelo de comunicação do tipo *publish/subscribe*, onde os dispositivos envolvidos não estabelecem ligação direta entre si, comunicando em vez disso através de um intermediário designado por *broker*. Esta abordagem permite uma maior flexibilidade e escalabilidade na troca de mensagens entre os vários elementos do sistema.

No contexto do sistema desenvolvido, a plataforma Adafruit IO desempenha o papel de *broker*, sendo responsável por receber as mensagens provenientes do módulo NB-IoT e distribuí-las aos *feeds* respetivos. O funcionamento do MQTT pode ser compreendido através dos seguintes componentes principais:

- **Broker:** Servidor central que gere todas as comunicações. Recebe as mensagens publicadas pelos dispositivos emissores e reencaminha-as para os dispositivos subscritores dos tópicos relevantes. No presente sistema, este papel é assumido pela infraestrutura disponibilizada pela Adafruit IO.
- **Tópicos:** Estruturas hierárquicas que funcionam como canais lógicos de comunicação. Cada sensor envia os seus dados para um tópico específico, o que permite organizar a informação e garantir que apenas os subscritores interessados recebem as mensagens correspondentes. Por exemplo, os dados de temperatura são publicados num tópico distinto dos valores de pH ou condutividade.
- **Mensagens:** São os pacotes de dados propriamente ditos, contendo, por exemplo, leituras de sensores. Estas mensagens são publicadas num determinado tópico e ficam imediatamente disponíveis para todos os dispositivos ou serviços subscritos a esse canal.

Este modelo reduz a complexidade do sistema e minimiza o tráfego de rede, uma vez que os dispositivos não necessitam de conhecer previamente os destinatários das mensagens. Adicionalmente, o MQTT suporta níveis de qualidade de serviço (*Quality of Service* – QoS) e mecanismos de autenticação a partir do nome de utilizador e palavra-passe, garantindo fiabilidade na transmissão dos dados, mesmo em contextos com ligações instáveis ou com recursos limitados.

DIMENSIONAMENTO E PROTOTIPAGEM

O presente capítulo apresenta o projeto e prototipagem dos dois sistemas de monitorização desenvolvidos: o sistema de monitorização da qualidade da água no circuito de aquaponia da estufa e o sistema de monitorização da água a fornecer à estufa. Desta forma serão explorados os aspetos técnicos relacionados com o design dos circuitos, a seleção de componentes, as ligações elétricas e alguns cálculos necessários para assegurar o funcionamento correto de cada sistema.

Assim, são descritas de forma detalhada as etapas práticas e as decisões técnicas que sustentaram a implementação dos sistemas de monitorização. O foco principal foi assegurar que os sistemas desenvolvidos cumprissem os requisitos funcionais previamente estabelecidos. As soluções apresentadas foram fundamentadas em abordagens técnicas, criando uma base sólida para a análise e validação dos protótipos nos capítulos seguintes, garantindo uma relação consistente entre o projeto inicial e os resultados obtidos na prática.

5.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NA ESTUFA

Este capítulo aborda o projeto e dimensionamento detalhado do circuito elétrico e das Placas de Circuito Impresso (PCB) do sistema de monitorização da qualidade da água na estufa, com ênfase na justificação técnica das soluções adotadas.

5.1.1 *Circuito Elétrico*

Nesta secção, é apresentado o circuito elétrico desenvolvido para o sistema de monitorização da qualidade da água na estufa, nomeadamente as ligações entre o microcontrolador ESP32 e os sensores, já detalhados anteriormente na secção 4.2.2.1. Adicionalmente, são também apresentados os circuitos elétricos correspondentes às monitorizações visuais, já descritas em secções anteriores.

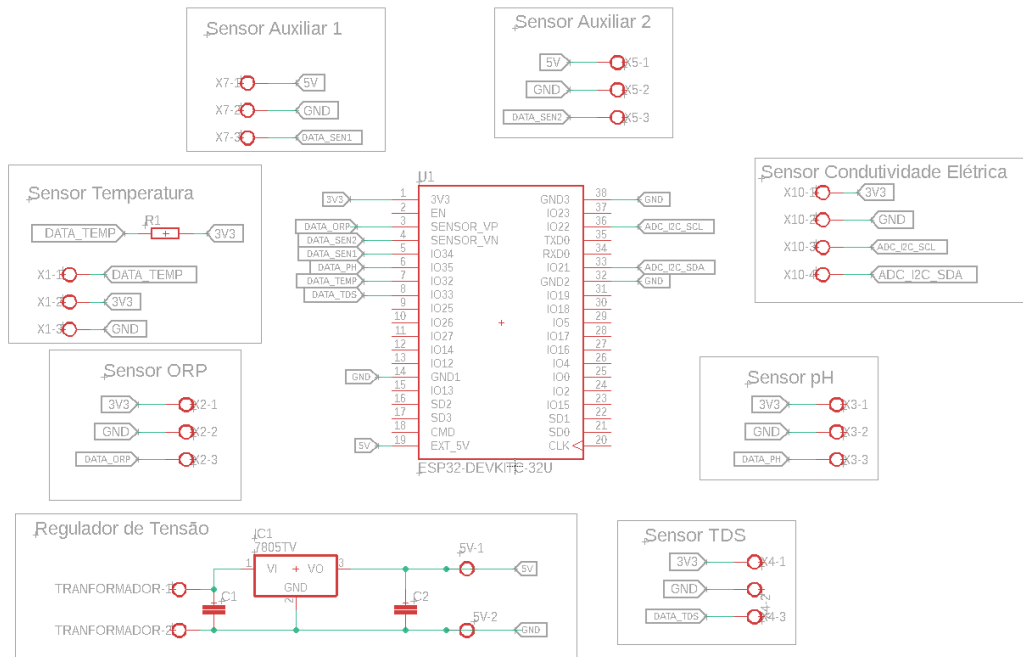


Figura 23: Circuito do sistema monitorização da qualidade da água na estufa.

Na Figura 23, está representado o circuito principal do sistema, no qual o microcontrolador ESP32 desempenha o papel de unidade central de processamento e comunicação. O microcontrolador está ligado a vários sensores especializados através de *conectores* identificados e organizados, que se conectam aos amplificadores associados a cada sensor. Este método foi escolhido para proporcionar uma melhor organização, que se explicará em maior detalhe nas próximas secções. Foram também adicionados alguns pontos de ligação para permitir a integração futura de novos sensores, caso sejam necessários expandir o sistema.

Os sensores integrados neste sistema possuem características que os tornam adequados para a monitorização precisa da qualidade da água. Entre os principais benefícios das configurações utilizadas destacam-se:

1. Alta precisão e fiabilidade: Os sensores foram seleccionados para garantir leituras consistentes e de elevada precisão, assegurando o controlo rigoroso dos parâmetros da água.
2. Proteção contra interferências externas: A utilização de amplificadores com filtros passa-baixa reduz significativamente os ruídos introduzidos nos sinais analógicos, proporcionando mais estabilidade e fiabilidade nas medições.
3. Modularidade e organização: A configuração através de *conectores* facilita tanto a instalação inicial quanto a substituição ou manutenção dos compo-

nentes, minimizando tempos de inatividade do sistema e promovendo uma implementação eficiente.

- Facilidade de expansão: A inclusão de *conectores* auxiliares no circuito permite a adição de novos sensores ou funcionalidades ao sistema, assegurando a escalabilidade e adaptabilidade a futuras necessidades.

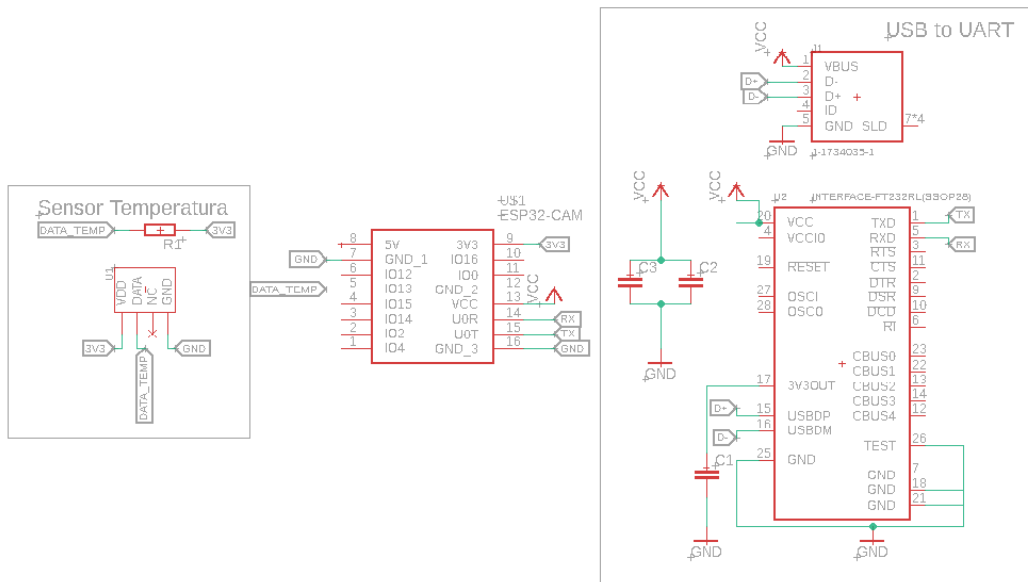


Figura 24: Circuito da monitorização visual do crescimento das plantas.

Na Figura 24, está representado o circuito do módulo de monitorização visual destinado ao acompanhamento do crescimento das plantas. Este circuito inclui um ESP32-CAM equipada com uma câmara OV2640, já detalhada anteriormente, e um sensor DHT22 para medir a temperatura e a humidade do ambiente. Adicionalmente, foi integrado um conversor USB para UART, modelo FT232RL, que utiliza uma ligação micro-USB. Este conversor facilita a programação direta da ESP32-CAM, eliminando a necessidade de recorrer a um conversor FTDI externo, permitindo alterações rápidas no código e maior conveniência no desenvolvimento e manutenção.

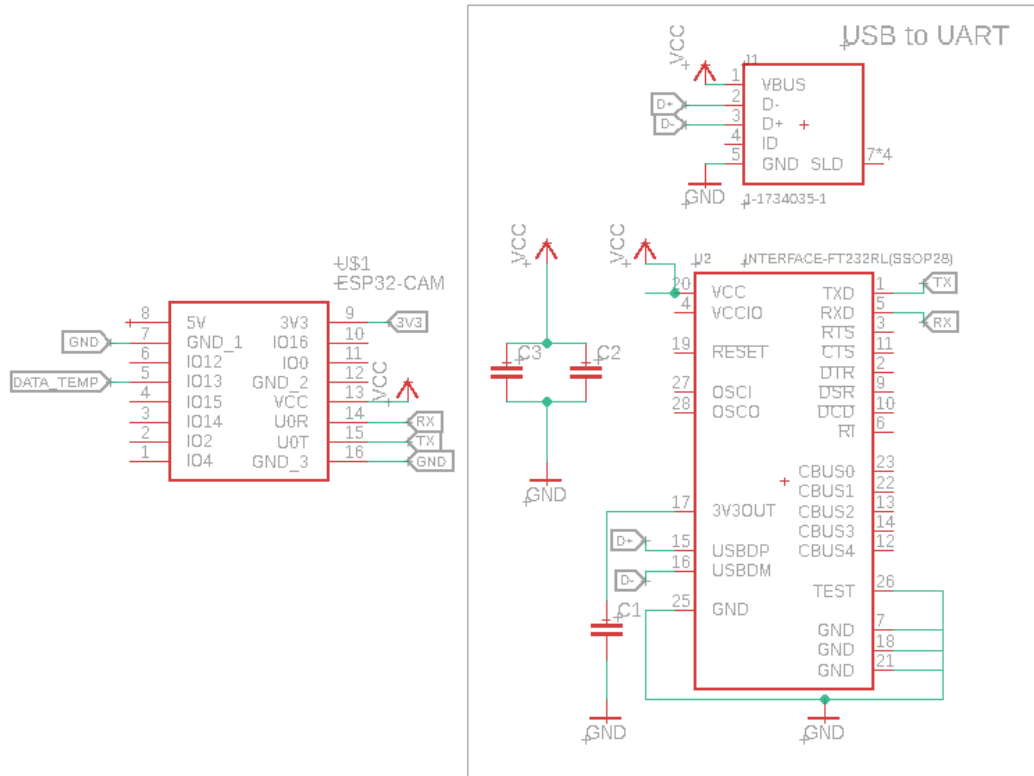


Figura 25: Circuito do módulo de monitorização visual da presença e quantidade de insetos na estufa.

Na Figura 25, está representado o circuito do módulo de monitorização visual para deteção de insetos na estufa. Este circuito também utiliza uma ESP32-CAM, equipada com uma câmara OV5640 para capturar imagens com maior detalhe, e um conversor USB para UART FT232RL, igualmente com ligação micro-USB, para facilitar a programação.

5.1.1.1 *Circuito de Alimentação*

Para garantir uma alimentação estável e segura para o ESP32, foi utilizado um regulador de tensão baseado no componente LM7805, responsável por converter uma tensão de entrada de 12 V para uma saída fixa de 5 V. Este circuito permite alimentar o ESP32 de forma fiável, assegurando a estabilidade do sistema mesmo sob condições variáveis na fonte de alimentação.

O circuito foi construído com base no exemplo "Fixed-output regulator"mostrado em [22], apresentado na Figura 26(a). Na Figura 26(b), é possível observar o circuito implementado no sistema, onde o regulador é alimentado por duas linhas de entrada,

ligados a uma fonte de alimentação de 230/12 V. A saída é utilizada para alimentar diretamente o ESP32.



Figura 26: Regulador de tensão : (a) Exemplo do circuito de regulador de tensão. (b) Circuito implementado.

O circuito do regulador de tensão foi configurado para incluir:

- Um condensador de desacoplamento na entrada ($C1=0,33 \mu\text{F}$), que reduz ruídos provenientes do transformador para garantir uma tensão de entrada estável;
- Um condensador na saída ($C2=0,1 \mu\text{F}$), que assegura a estabilidade da tensão de 5 V e reduz flutuações que possam comprometer o desempenho do ESP32.

Esta configuração segue as especificações recomendadas pelo fabricante, oferecendo uma solução simples e fiável, permitindo a conversão de uma fonte de 12 V para a tensão necessária para alimentar com 5 V o ESP32.

5.1.1.2 Circuito de Ligação do Sensor de Temperatura

A integração do sensor DS18B20 no circuito foi realizada de forma a assegurar a sua compatibilidade com o microcontrolador ESP32 e o protocolo de comunicação *1-Wire*. O circuito foi implementado de acordo com as recomendações do *datasheet*, como se pode ver na Fig. 27. Este circuito utiliza uma resistência *pull-up* de 4,7 k Ω entre a linha de dados (DATA) e a alimentação (3,3V). Esta resistência é fundamental, garantindo que a linha de dados se mantenha em estado lógico alto quando inativa, assegurando a integridade dos sinais.

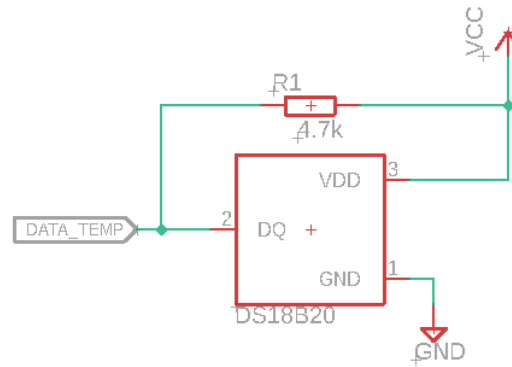


Figura 27: Exemplo de configuração do sensor DS18B20 (*datasheet*).

O DS18B20 é um sensor de temperatura digital de alta precisão, capaz de fornecer medições com uma resolução de até 12 bits, sendo adequado para monitorizar a temperatura em sistemas aquáticos. Este sensor utiliza o protocolo *1-Wire*, que permite comunicação bidirecional através de apenas uma linha de dados (*DATA*). O protocolo *1-Wire* funciona com uma estrutura *Master-Slave*, onde o ESP32 atua como *master* e o DS18B20 como *slave*. Neste caso há apenas um sensor ligado ao barramento, por isso a configuração é designada por "*single-drop*". Durante a inicialização, o ESP32 (*master*) transmite um pulso de inicialização, forçando a linha *1-Wire* para nível lógico baixo durante, pelo menos, 480 μs . Após este período, o ESP32 liberta a linha de dados e muda para modo de receção (RX). Nesta altura, a resistência pull-up de 4,7 k Ω faz com que a linha volte ao nível lógico alto.

Ao detetar o modo de receção, o DS18B20 aguarda entre 15 μs e 60 μs e, em seguida, transmite um pulso de presença, forçando novamente a linha ao nível lógico baixo durante um intervalo entre 60 μs e 240 μs . Este pulso confirma que o sensor está ligado e pronto para receber comandos. De seguida o microcontrolador envia um comando ao sensor, para medir a temperatura e armazenar o valor num registo de 16 bits. A conversão da temperatura pode demorar até 750 ms, por isso, o microcontrolador envia comandos ao sensor para saber se a conversão foi concluída. O sensor responde com o valor lógico 0 enquanto a conversão ainda está em curso e com 1 quando a conversão está concluída, permitindo que o ESP32 leia o valor armazenado. O microcontrolador recebe então os dados, a partir de outro comando, quando a conversão é concluída. A temperatura é armazenada no sensor em 2 bytes, sendo o primeiro byte o menos significativo (LSB) e o segundo o mais significativo (MSB). A leitura destes valores permite calcular a temperatura em graus Celsius através da seguinte equação:

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{\text{LSB} + (\text{MSB} \times 256)}{16} \quad (1)$$

Desta forma, a temperatura é convertida para um formato digital com elevada precisão, permitindo a monitorização precisa da temperatura no sistema aquapónico.

Como é possível observar na Figura 28, a ligação ao ESP32 é efetuada por três condutores.

- DATA_TEMP: Ligado diretamente a uma entrada digital configurada para comunicação *1-Wire*, e diretamente à resistência *pull-up*.
- Alimentação (3,3 V): Garante a tensão necessária para o funcionamento do sensor, ligado também à resistência.
- GND: Ligação à massa.

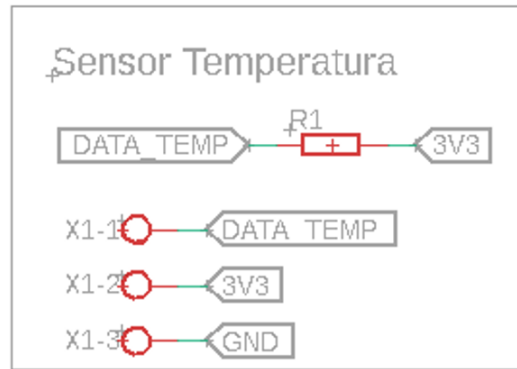


Figura 28: Ligações do sensor de temperatura ao ESP32.

Neste caso, o circuito foi projetado com a utilização de três *linhas* dedicadas, correspondendo aos pinos *DATA*, 3,3 V e GND.

5.1.1.3 Circuito de Ligação do Sensor de pH

O sensor de pH utilizado no sistema é o modelo Gravity Analog pH Sensor V2 (SEN17004), que inclui um módulo de conversão de sinal (*Signal Conversion Board (Transmitter)*) integrado para facilitar a leitura da sonda de pH. Este módulo atua como um amplificador, garantindo que o sinal analógico gerado pelo sensor seja adequado para a leitura do microcontrolador.

Este sensor opera com base no princípio de medição eletroquímica, em que o sensor de pH com base na diferença de potencial entre um eletrodo de referência e um

eletrodo sensível, gerando uma tensão analógica. Este sinal, no entanto, apresenta uma amplitude muito reduzida e é altamente suscetível a interferências externas, tornando indispensável o uso de um amplificador com alta impedância de entrada.

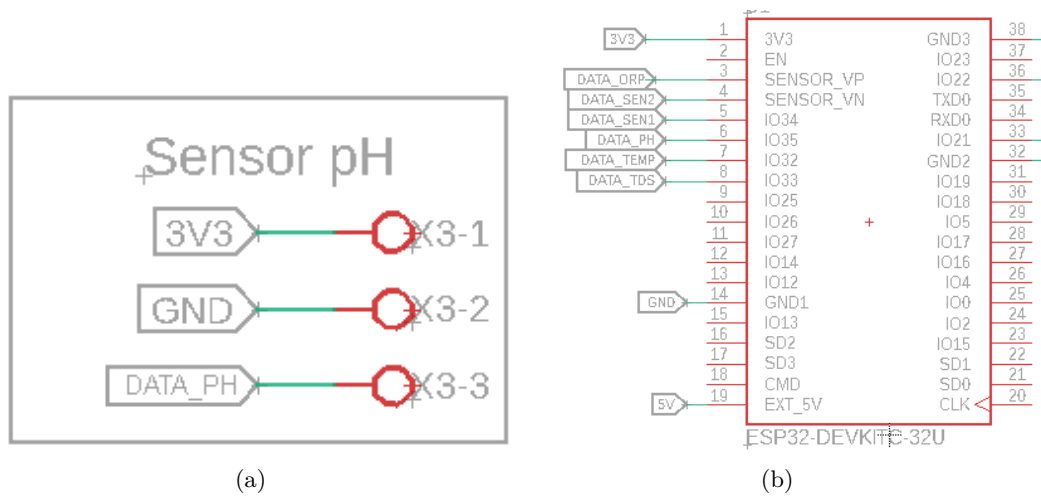


Figura 29: Pinout do sensor de pH: (a) Configuração dos conectores. (b) Ligações ao ESP32.

O amplificador é ligado ao microcontrolador utilizando as linhas referentes aos três pinos da placa que aloja o amplificador — DATA_PH, 3,3 V, e GND — diretamente ao ESP32 e à alimentação do sistema. Na Figura 29 está representado o circuito com as respectivas ligações, enquanto na Figura 29(b) é possível observar as ligações do amplificador ao ESP32.

A Figura 30 apresenta o amplificador utilizado no sensor de pH, contendo três pinos para ligação ao microcontrolador e um conector para ligar ao sensor, e está dividido da seguinte forma:

1. ligação à massa (GND).
2. alimentação (VCC), correspondente a 3,3 V no circuito.
3. saída de sinal analógico (DATA_PH).
4. conector BNC para ligação direta ao sensor de pH.

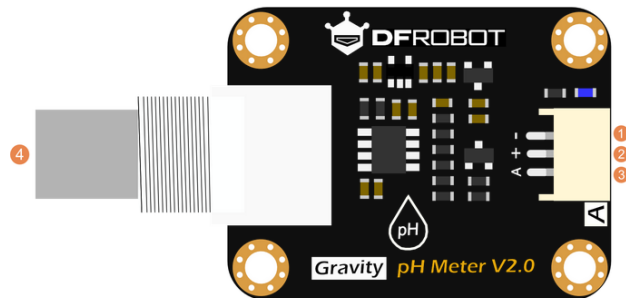


Figura 30: Circuito amplificador para o sensor de pH.

As características deste amplificador são:

- Tensão de alimentação: 3,3 V ~ 5,5 V
- Tensão de saída: 0 ~ 3,0 V
- Conector do sensor: BNC
- Conector do sinal: PH2,0-3P
- Precisão da medição: $\pm 0,1$
- Dimensões: 42 mm x 32 mm

O amplificador utilizado no módulo do sensor de pH é composto pelos circuitos integrados CA3140 e TL081, selecionados pelas suas características de alta impedância de entrada e baixo ruído, assegurando uma leitura precisa do sinal analógico proveniente do sensor.

O CA3140 é um amplificador operacional BiMOS, que combina transístores PMOS na entrada e bipolares na saída. Esta configuração permite obter uma impedância de entrada extremamente elevada, reduzindo significativamente a corrente de polarização necessária para a leitura do sinal do sensor. O TL081 é um amplificador operacional baseado em transístores JFET na entrada, oferecendo um elevado *slew rate* e melhor desempenho em termos de velocidade de resposta. O seu papel principal é amplificar e condicionar o sinal analógico, assegurando que a saída seja compatível com a leitura do sensor antes de ser processada pelo conversor ADC do ESP32. Com a combinação destes dois amplificadores é possível obter valores adequados para a leitura do microcontrolador.

5.1.1.4 *Circuito de Ligação do Sensor STD*

O sensor utilizado para medir o sólidos dissolvidos totais no sistema aquapónico é o modelo Gravity Analog STD Sensor (SEN08030), projetado para medir a

concentração de sólidos dissolvidos na água. Este sensor é fornecido com um módulo transmissor de sinal que funciona como amplificador, condicionando e amplificando o sinal analógico gerado pelo sensor, tornando-o adequado para leitura com um microcontrolador.

Na Figura 31(a), está representado o circuito com as respectivas ligações, e na Figura 31(b), encontram-se representada as ligações do amplificador ao microcontrolador ESP32.

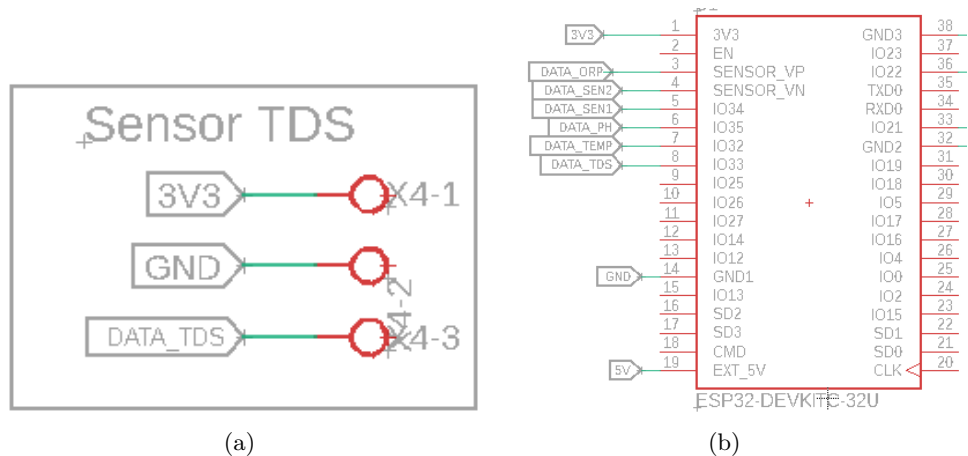


Figura 31: Circuito STD: (a) Configuração dos conectores ligados ao ESP32. (b) Ligações ao ESP32.

A Figura 32 apresenta o amplificador utilizado no sensor de STD, contendo três pinos para ligação ao microcontrolador e um conector para ligar ao sensor, e está dividido da seguinte forma:

1. ligação à massa (GND).
2. alimentação (VCC), correspondente a 3,3 V no circuito.
3. saída de sinal analógico (DATA_TDS).
4. conector para ligação direta ao sensor de pH.

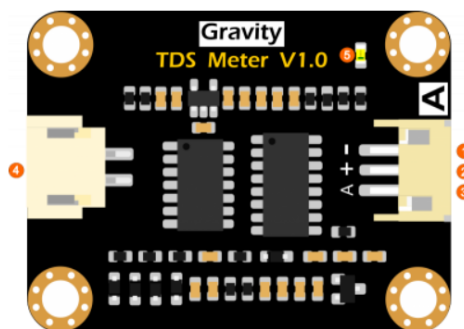


Figura 32: Circuito amplificador para o sensor de STD.

O módulo transmissor de sinal do sensor STD apresenta as seguintes características técnicas:

- Tensão de entrada: 3,3 V ~ 5,5 V
- Tensão de saída: 0V ~ 2,3 V
- Corrente de operação: 3 ~ 6 mA
- Gama de medição de TDS: 0 ~ 1000 ppm
- Precisão da medição de STD: $\pm 10\%$ F,S, (a 25 °C)
- Dimensões do módulo: 42 mm \times 32 mm
- Interface do módulo: PH2,0-3P
- Interface do eletrodo: XH2,54-2P

O amplificador desempenha várias funções essenciais para garantir medições fiáveis dos sólidos dissolvidos totais. O sinal proveniente do sensor de STD apresenta uma tensão muito reduzida, sendo necessário amplificar o sinal para que possa ser processado corretamente pelo microcontrolador. Após a amplificação, o sinal passa por um filtro passa-baixo, que elimina interferências e flutuações indesejadas provenientes do ambiente. Por fim, o sinal de saída é condicionado, assegurando que a amplitude se mantém dentro dos níveis apropriados para a conversão pelo Conversor Analógico-Digital (ADC) do ESP32.

O circuito amplificador é composto por diversos componentes eletrónicos que garantem a estabilidade do sinal e a precisão das medições. O LMV324, um amplificador operacional de baixa corrente de polarização e elevada estabilidade térmica, foi escolhido devido à sua adequação para sensores de baixa amplitude. Além disso, são utilizados díodos de proteção para prevenir danos causados por picos de tensão, condensadores de desacoplamento para minimizar flutuações e ruídos elétricos, e resistências de polarização, essenciais para manter a linearidade do sinal de saída.

A implementação deste amplificador no circuito do sensor STD permite garantir que os valores de sólidos totais dissolvidos da água são medidos com elevada precisão. A amplificação, filtragem e condicionamento do sinal asseguram que os dados recolhidos são fiáveis e adequados para processamento pelo ESP32.

5.1.1.5 *Circuito de Ligação do Sensor ORP*

O sensor utilizado para medir o Potencial de Oxidação-Redução (ORP) no sistema aquapónico é o modelo Gravity Analog ORP Sensor (SEN08043), desenvolvido para

monitorizar a capacidade oxidante ou redutora da água. Este sensor é também fornecido com um amplificador integrado no kit, com a mesma função dos outros de amplificar e estabilizar o sinal analógico gerado pelo sensor de ORP.

Na Figura 33(a), está representado o circuito com as respetivas ligações, e na Figura 31(b), encontra-se representado as ligação do amplificador ao microcontrolador.

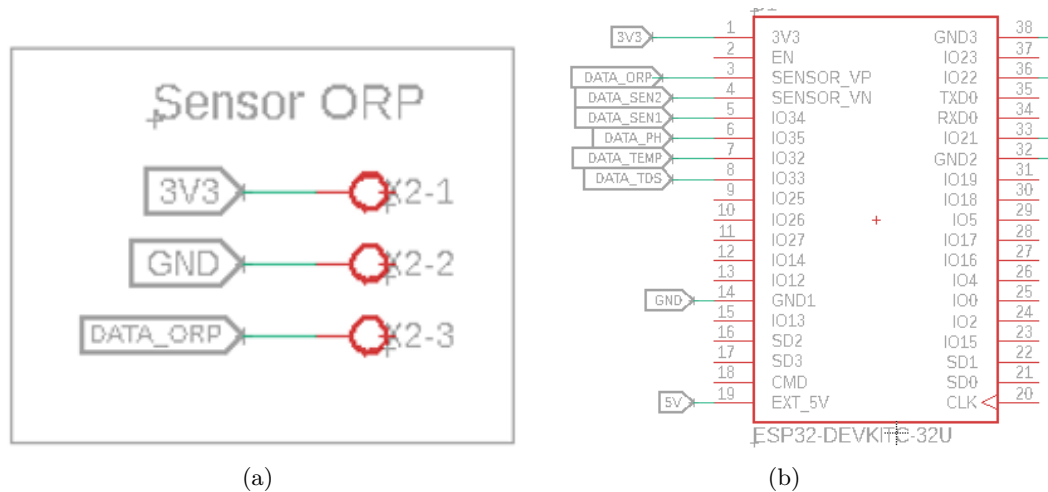


Figura 33: Circuito do sensor ORP: (a) Configuração dos das ligações do amplificador. (b) Ligações ao ESP32.

A Figura 34 apresenta o amplificador utilizado no sensor de ORP, contendo três pinos para que ligam diretamente ao microcontrolador a partir dos pinos anteriormente referidos e um conector para ligar ao sensor, e está dividido da seguinte forma:

1. ligação à massa (GND).
2. alimentação (VCC), correspondente a 3,3 V no circuito.
3. saída de sinal analógico (DATA_ORP).
4. conector BNC para ligação direta ao sensor de ORP.

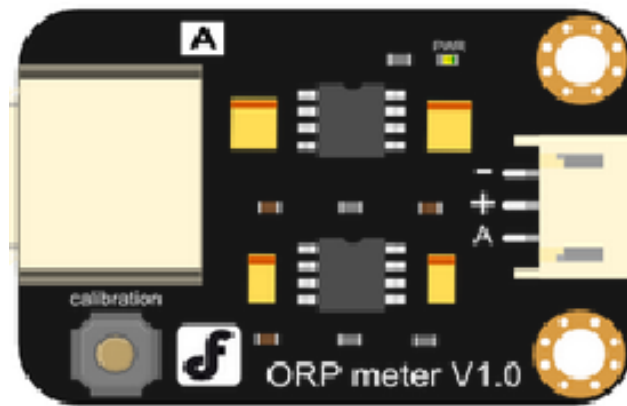


Figura 34: Circuito amplificador para o sensor de ORP.

O módulo amplificador do sensor ORP apresenta as seguintes características técnicas:

- Tensão de alimentação: +5,00 V
- Dimensões do módulo: 40 mm × 27 mm
- Gama de medição de ORP: -2000 mV ~ 2000 mV
- Temperatura de operação: 5 °C ~ 70 °C
- Precisão da medição: ±10 mV (a 25 °C)
- Tempo de resposta: 20 segundos
- Conector da sonda: BNC
- Interface do módulo: PH2,0-3P (conector de 3 pinos) Integrado

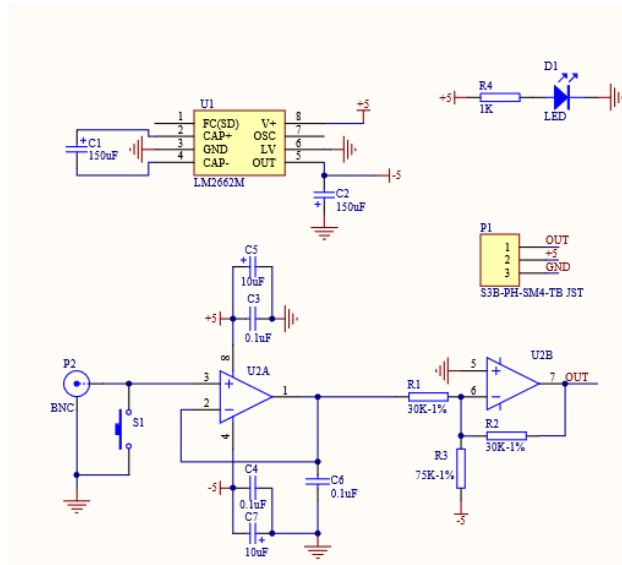


Figura 35: Circuito elétrico do amplificador para o sensor de ORP.

Na Figura 35, é possível observar o esquemático do amplificador do Potencial de Oxidação-Redução (ORP) tirado do [23]. Neste circuito, há a necessidade de um regulador de tensão que permite gerar uma tensão negativa de SIM7020E NB-IoT HAT, essencial para alimentar corretamente o amplificador operacional responsável pelo processamento do sinal do sensor. Esta alimentação bipolar (+5 V e -5 V) é fundamental, pois os valores de medição do sensor ORP operam numa gama de -2000 mV a 2000 mV, e um amplificador alimentado apenas com 0 V e 5 V não conseguiria processar corretamente os valores negativos, limitando a gama de leitura.

Após a geração da tensão de alimentação adequada, o sinal do sensor atravessa duas fases principais. Na primeira fase, o sinal é aplicado à entrada de um amplificador operacional, que amplifica a tensão gerada pelo sensor, ajustando-a para uma gama adequada à leitura pelo microcontrolador. Na segunda fase, um segundo amplificador operacional ajusta o ganho do sinal amplificado, garantindo que a amplitude do sinal de saída seja otimizada para o Conversor Analógico-Digital (ADC) do ESP32. Além disso, o circuito inclui condensadores de desacoplamento, devido à necessidade da redução de ruídos no sinal.

5.1.1.6 Circuito de Ligação do Sensor CE

O sensor utilizado para medir a condutividade elétrica (CE) no sistema aquapónico é o modelo *Gravity Analog Electrical Conductivity Sensor V2 (SEN08024)*. Este sensor opera em conjunto com um módulo de conversão de sinal, responsável por

amplificar o sinal analógico gerado pela sonda de condutividade, garantindo que a saída do sensor seja adequada para posterior conversão pelo Conversor Analógico-Digital (ADC) do sistema.

A medição da condutividade elétrica (CE) no sistema aquapónico exige uma aquisição precisa do sinal analógico proveniente do sensor. No entanto, o Conversor Analógico-Digital (ADC) interno do ESP32, com uma resolução de 12 bits, apresenta erros significativos na leitura de tensões baixas, resultando em medições imprecisas. Na Figura 36, observa-se esta limitação, onde a resposta do ADC do ESP32 evidencia a incapacidade de detetar corretamente valores em tensões muito reduzidas, o que afeta diretamente as medições deste sensor.

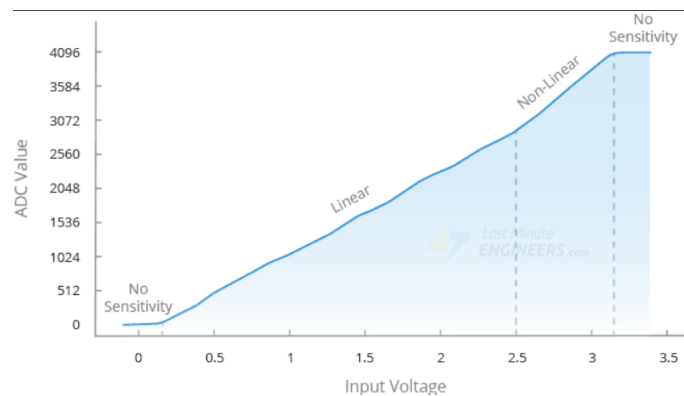


Figura 36: Tensão vs Leitura ADC do ESP32

Para contornar esta limitação, optou-se pela integração de um ADC externo de alta precisão, o ADS1115, ilustrado na Figura 37(b), ideal para capturar variações subtis no sinal analógico gerado pelo amplificador. A ligação entre o ADS1115 e o ESP32 é estabelecida através do barramento I2C (Inter-Integrated Circuit), um protocolo de comunicação serial que utiliza apenas dois fios para a transferência de dados: I2C_SDA (linha de dados) e I2C_SCL (linha de clock), na Figura 37(a) é possível observar estas ligações ao microcontrolador. No contexto desta aplicação, o pino I2C_SDA é responsável pelo transporte dos dados do ADC para o microcontrolador, enquanto o pino I2C_SCL coordena a sincronização das transferências de dados, gerando os sinais de clock necessários para a comunicação.

Este ADC externo é então conectado diretamente ao módulo amplificador do sinal alimentando-o e recebendo o sinal a partir de uma porta analógica.

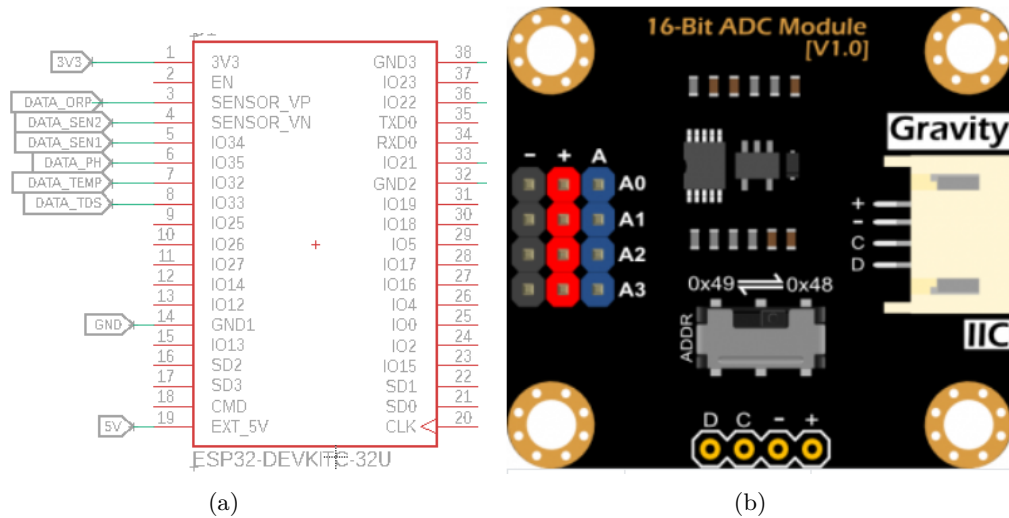


Figura 37: Circuito ORP: (a) Ligações ao microcontrolador ESP32. (b) ADC externo (ADS1115).

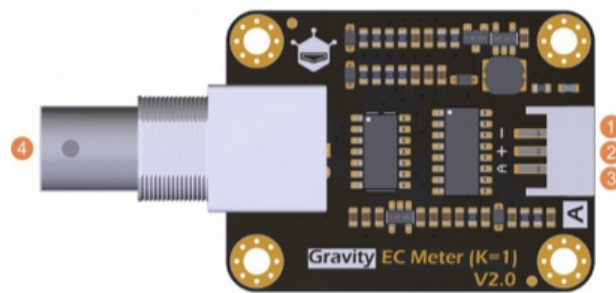


Figura 38: Circuito elétrico do amplificador para o sensor de CE.

A Figura 38 apresenta o amplificador utilizado no sensor de ORP, onde é possível observar as seguintes ligações:

1. ligação à massa (GND).
2. alimentação (VCC), correspondente a 3,3 V no circuito.
3. saída de sinal analógico .
4. conetor BNC para ligação direta ao sensor de CE.

O módulo amplificador do sensor CE apresenta as seguintes características técnicas:

- Tensão de entrada: 3 V ~ 5 V
- Tensão de saída: 0V ~ 3,3 V
- Precisão da medição de STD: ± 5 % F.S

- Dimensões do módulo: 42 mm x 32 mm
- Interface do módulo: PH2,0-3Pin

O amplificador do sensor de condutividade elétrica (CE) desempenha várias funções essenciais para garantir medições fiáveis. O sinal proveniente da sonda de CE apresenta uma amplitude reduzida, sendo necessária a sua amplificação para que possa ser corretamente processado pelo sistema de aquisição de dados.

Após a amplificação, o sinal passa por um filtro necessário para a diminuição de ruído, e há a utilização de condensadores de desacoplamento para minimizar flutuações, e resistências de polarização para manter a linearidade do sinal de saída. Finalmente, o sinal de saída é condicionado, assegurando que a sua amplitude se mantém dentro dos níveis apropriados para conversão pelo Conversor Analógico-Digital (ADC) externo (ADS1115), garantindo uma digitalização precisa e sem perda de informação relevante. O funcionamento deste módulo é semelhante ao do sensor de STD.

A utilização deste amplificador no circuito do sensor de CE assegura que os valores de condutividade elétrica da água são medidos com elevada precisão e estabilidade.

5.1.1.7 *Circuito de Ligação do Sensor DHT22*

O sensor DHT22 foi integrado no circuito com o objetivo de monitorizar a temperatura e humidade ambiente, complementando as informações visuais capturadas pela ESP32-CAM. Este sensor opera utilizando um único pino de dados digital (*DATA_TEMP*), o que simplifica as ligações.

A ligação ao circuito segue o esquema padrão recomendado:

- O pino de dados *DATA_TEMP* foi conectado diretamente a um pino digital da ESP32-CAM, através do *pad* dedicado no circuito.
- Uma resistência *pull-up* de 10 k Ω foi adicionada entre o pino *DATA_TEMP* e o terminal de alimentação de 3,3 V, para assegurar a estabilidade do sinal de comunicação.
- A alimentação do sensor é feita através dos pinos 3,3 V e GND, fornecidos diretamente pela ESP32-CAM.

Esta configuração garante uma comunicação fiável entre o DHT22 e a ESP32-CAM, permitindo a recolha precisa dos dados de temperatura e humidade para envio à Firebase.

5.1.1.8 Circuitos de Ligação dos Componentes FT232RL e Micro-USB

Para facilitar a programação da ESP32-CAM e evitar a necessidade de utilizar um conversor FTDI externo, foi integrado um circuito baseado no FT232RL, um *chip* bastante utilizado para a conversão USB para UART. Este circuito segue a configuração recomendada do datasheet do FT232RL. Na Figura 39 é possível observar o circuito realizado.

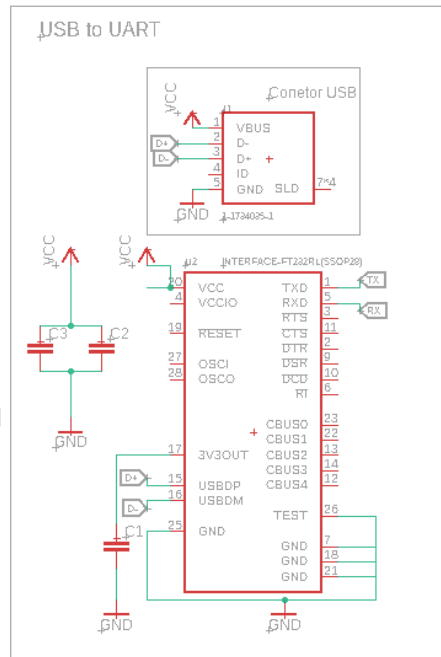


Figura 39: Circuito conversor USB para UART.

A alimentação do circuito é feita através de um conector *micro-USB*, permitindo uma ligação prática e compatível com equipamentos comuns. O sinal de alimentação (VBUS) é estabilizado por dois condensadores em paralelo, um de 100 nF e um de 4,7 μ F, que reduzem os ruídos na fonte de alimentação, assegurando uma tensão estável de 5 V para o funcionamento do sistema. Adicionalmente, o regulador interno do FT232RL converte esta tensão de entrada em 3,3 V, fornecida através do pino de saída de 3,3 V. Para desacoplar e estabilizar esta saída, foi utilizado um terceiro condensador de 100 nF, garantindo a integridade do sinal e o correto funcionamento dos circuitos subsequentes. Os sinais USB, representados pelos pinos D+ e D-, são conectados diretamente às entradas USBDP e USBDM do FT232RL, estabelecendo a comunicação entre o computador e este circuito integrado. Estes sinais são protegidos contra interferências e ruídos, o que assegura uma comunicação fiável durante a programação ou depuração do sistema.

A *interface* UART do FT232RL utiliza os pinos TXD e RXD para transmissão e recepção de dados em série, que são conectados diretamente à ESP32-CAM. Como ambos os componentes estão integrados na mesma PCB, esta configuração permite a programação automática do microcontrolador, eliminando a necessidade de um FTDI externo ou de procedimentos manuais para entrar no modo de programação.

5.1.2 Projeto das PCBs

Para a implementação deste sistema houve a necessidade da realização de três PCB's de acordo com os circuitos já explicados na secção 5.1, cada uma projetada para atender às necessidades específicas de cada subsistema. Este subcapítulo apresenta os detalhes técnicos relacionados com os desenho, as dimensões e as características principais de cada PCB.

Na Figura 40, está representada a PCB desenvolvida para o sistema de monitorização da qualidade da água na estufa. Este esquema foi concebido para integrar os sensores, o microcontrolador ESP32, o acondicionamento e os amplificadores, garantindo uma configuração organizada.

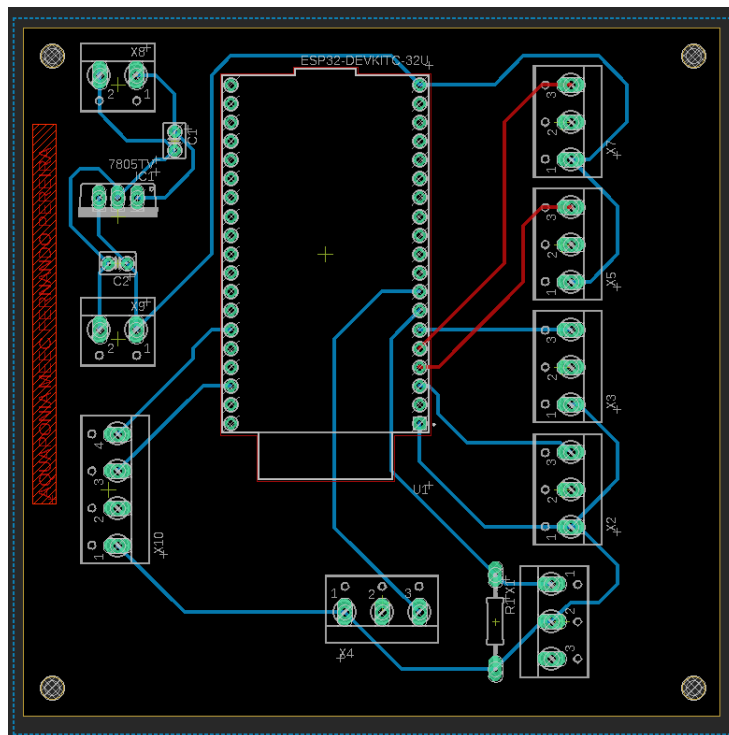


Figura 40: PCB realizada para o sistema de monitorização da qualidade da água na estufa.

A PCB foi fabricada em substrato FR4, um substrato amplamente utilizado na indústria eletrônica devido à sua resistência mecânica, estabilidade térmica, boas propriedades dielétricas e baixo custo. A espessura da PCB e as regras do desenho, como a largura das pistas de 0,5 mm e o isolamento mínimo de 1, definiram-se de acordo com as normas da empresa onde foi fabricada, seguindo práticas padrão na produção de circuitos impressos. Estas especificações garantem um equilíbrio entre integridade dos sinais, fiabilidade elétrica e viabilidade de fabrico.

A disposição dos componentes foi projetada de modo a otimizar a organização da PCB. O ESP32 foi posicionado centralmente, facilitando a ligação aos diversos sensores. Para melhorar a modularidade e simplificar a ligação dos sensores e amplificadores, foram disponibilizados pontos de ligação periféricos, como já referido nas secções anteriores, dispostos de forma a minimizar as distâncias ao microcontrolador. O regulador de tensão foi posicionado num dos extremos da PCB, com o objetivo de facilitar a ligação à fonte de alimentação 230/12 V.

A implementação do plano de massa foi realizada de forma a cobrir o máximo de área disponível, aproveitando os espaços não utilizados para proporcionar um caminho de baixa impedância, reduzindo ruídos elétricos e interferências. Este método é importante para garantir a integridade dos sinais analógicos, melhorando a estabilidade das medições dos sensores e minimizando problemas associados a ruído eletromagnético. Em termos de gestão térmica, foi dada especial atenção ao regulador de tensão, dado que este componente pode gerar calor significativo durante a operação. Desta forma, para evitar sobreaquecimento, foi adicionado um dissipador de calor metálico, permitindo uma dissipação térmica mais eficiente e evitando que o calor se acumulasse no próprio regulador. Esta abordagem assegura um funcionamento estável e prolonga a vida útil do componente.

O resultado é uma PCB compacta e organizada, maximizando o aproveitamento do espaço sem comprometer a eficiência das ligações e a fiabilidade do sistema. A implementação cuidadosa da distribuição de componentes, do plano de massa e da gestão térmica assegura uma operação eficiente, reduzindo interferências e melhorando a robustez geral do sistema.

Para a implementação dos módulos de monitorização visual, foram desenvolvidas PCBs dedicadas para cada ESP32-CAM, garantindo uma integração eficiente dos componentes e facilitando a ligação com a base do sistema. Ambas as placas seguem as mesmas especificações técnicas da PCB principal, incluindo a utilização do substrato FR4, e as mesmas regras do desenho.

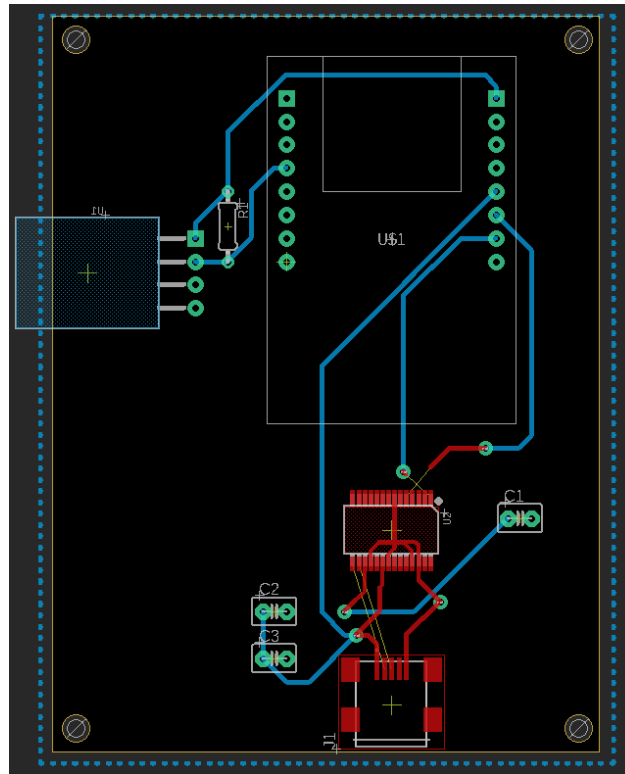


Figura 41: PCB realizada para os sistemas de monitorização visual.

Na Figura 41, pode-se observar o dimensionamento da PCB desenvolvida para a ESP32-CAM responsável pela monitorização do crescimento das plantas. Esta versão inclui um sensor DHT22. Já a segunda PCB, utilizada para a monitorização visual da presença de insetos, apresenta um dimensionamento idêntico, excetuando a ausência do sensor DHT22.

O conversor USB-UART baseado no FT232RL foi integrado diretamente na PCB para permitir a programação das ESP32-CAM, aumentando a facilidade da configuração e manutenção do sistema. O layout foi realizado de maneira a estar organizado de forma a minimizar interferências e otimizar o fluxo de corrente na alimentação do circuito.

A disposição dos componentes foi projetada para reduzir o espaço ocupado, mantendo a organização e modularidade necessárias para facilitar futuras intervenções no sistema.

5.2 PROJETO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA FORNECIDA À ESTUFA

Este capítulo aborda o projeto detalhado dos circuitos elétricos, a gestão de energia e o dimensionamento das placas de circuito impresso (PCB's) do sistema de monitorização da qualidade da água fornecida à estufa. A principal diferença deste sistema em relação ao anteriormente apresentado, deve-se à necessidade de operar num ambiente externo à estufa e, por este motivo, ter adaptações necessárias na autonomia energética e tecnologia de comunicação de dados.

5.2.1 *Circuito elétrico do Sistema de Monitorização da Qualidade da Água Fornecida à Estufa*

Nesta secção, é apresentado o circuito elétrico desenvolvido para o sistema de monitorização da qualidade da água fornecida à estufa, detalhando as ligações entre o microcontrolador ESP32 e os respetivos sensores. Dada a prévia experiência na utilização deste tipo de sensores no sistema de monitorização da qualidade da água na estufa, optou-se por utilizar os mesmos equipamentos, assegurando continuidade na metodologia de recolha de dados e garantindo compatibilidade com o processamento dos valores obtidos. Além disso, este sistema incorpora novos elementos essenciais para a sua autonomia e resiliência, nomeadamente um sistema de alimentação baseado em bateria e um módulo de comunicação NB-IoT, permitindo a transmissão de dados mesmo em locais sem cobertura Wi-Fi.

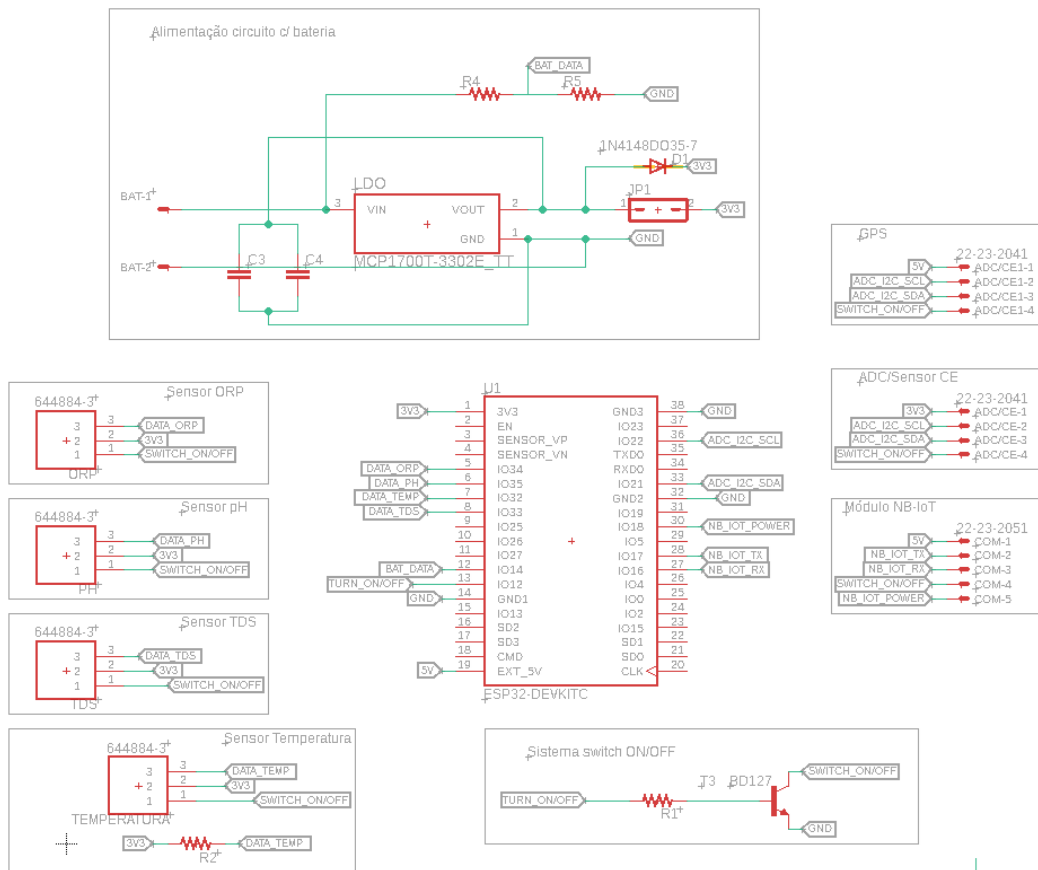


Figura 42: Circuito do sistema de monitorização da qualidade da água.

Na Figura 42, está representado o circuito principal do sistema, no qual o ESP32 desempenha novamente o papel de unidade central de processamento e comunicação. No entanto, ao contrário do primeiro sistema, este não depende de uma fonte de alimentação fixa, sendo alimentado por uma bateria de lítio de 3,7 V, cuja tensão é regulada através de um regulador do tipo (*Low Dropout Voltage Regulator* – LDO), especificamente o MCP1700T, garantindo uma tensão estável de 3,3 V para os componentes eletrônicos. Além disso, devido aos requisitos de determinados componentes, foi necessário incluir uma fonte comutada do tipo *step-up* para 5 V, assegurando a alimentação adequada desses elementos.

Outro aspeto distintivo deste circuito é a introdução de um sistema de controlo ON/OFF, que permite reduzir o consumo energético ao desligar os sensores quando não estão em utilização, reduzindo o consumo de energia, e consequentemente prolongando a autonomia da bateria.

A comunicação de dados é assegurada através do módulo NB-IoT, permitindo a transmissão das leituras para a base de dados sem necessidade de ligação Wi-Fi.

Esta escolha justifica-se pelo facto de este sistema estar implementado em ambiente exterior, onde a cobertura Wi-Fi pode ser insuficiente ou inexistente.

Os sensores e componentes eletrónicos utilizados no sistema foram organizados na placa de forma a facilitar a modularidade, mantendo a robustez necessária para um ambiente exterior. Entre os principais benefícios desta configuração destacam-se:

1. Autonomia energética: A utilização de uma bateria recarregável permite a operação sem necessidade de ligação à rede elétrica.
2. Eficiência no consumo: A inclusão de um sistema de controlo ON/OFF e um regulador de tensão eficiente minimiza o desperdício de energia.
3. Comunicação fiável: A adoção do NB-IoT garante a transmissão de dados mesmo em locais sem infraestrutura Wi-Fi.
4. Modularidade e expansão: O design baseado em ligações aos módulos através de conetores permite futuras expansões e integrações de novos sensores ou módulos.

Dado que este sistema partilha grande parte dos sensores e da configuração elétrica do sistema de monitorização da qualidade da água na estufa, as ligações desses sensores não serão novamente detalhadas. No entanto, nas próximas secções serão abordadas as especificidades das novas ligações e componentes introduzidos neste sistema, nomeadamente o circuito de alimentação por bateria, o sistema de controlo ON/OFF, o módulo de comunicação NB-IoT, o recetor GPS e a fonte comutada *step-up*.

5.2.1.1 *Sistema de Controlo ON/OFF*

Para reduzir o consumo energético e prolongar a autonomia da bateria, foi implementado um mecanismo de controlo ON/OFF que permite ativar ou desativar os sensores consoante a necessidade de recolha de dados. Esta funcionalidade foi implementada recorrendo a um transistor BD127, que atua como um interruptor, permitindo controlar a alimentação dos sensores.

O BD127 é um transistor bipolar de potência do tipo PNP, utilizado neste sistema para controlar a alimentação dos sensores. O seu funcionamento baseia-se na polarização da base, controlada por um pino digital do ESP32. Dependendo do nível de tensão aplicado, o transistor pode permitir ou bloquear a circulação de corrente no coletor, determinando se os sensores permanecem ligados ou desligados.

Na Figura 43, é possível observar a configuração do circuito. O coletor do transístor está ligado ao GND dos sensores, enquanto o emissor está ligado ao GND do sistema. Quando o transístor se encontra no estado de corte, a corrente não pode circular entre os sensores e o GND, estando, desta forma, os mesmos sem alimentação.

Por outro lado, quando o ESP32 aplica uma tensão à base do BD127, o transístor entra em saturação, estabelecendo um caminho condutor entre coletor e emissor. Neste estado, a corrente pode circular livremente, permitindo a alimentação dos sensores e ativando-os para a aquisição de dados.

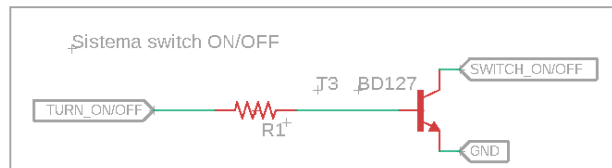


Figura 43: Circuito de controlo ON/OFF com o transístor BD127.

O transístor BD127 foi selecionado com base em testes práticos, onde se verificou que a corrente total necessária para alimentar os sensores no circuito é de aproximadamente 240 mA. A escolha deste transístor justifica-se pelo facto de a sua corrente máxima de coletor (500 mA) proporcionar uma margem de segurança adequada para a aplicação. Durante os testes realizados, confirmou-se que o BD127 suporta esta corrente sem dificuldades, permitindo o controlo eficaz dos sensores sem apresentar instabilidades ou aquecimento significativo. Para garantir uma saturação do transístor, foi inserida uma resistência na base, limitando a corrente que flui para evitar oscilações.

As características técnicas principais do BD127, de acordo com o datasheet, são:

- Tensão máxima coletor-emissor (V_{CE}): 260 V
- Tensão máxima coletor-base (V_{CB}): 300 V
- Tensão máxima emissor-base (V_{EB}): 5 V
- Corrente máxima de coletor (I_C): 500 mA
- Dissipação máxima de potência (P_{tot}): 40 W

Estas especificações confirmam que o BD127 suporta com margem suficiente os 240 mA exigidos pelo circuito, garantindo uma operação fiável, sem riscos de sobreaquecimento ou degradação prematura dos componentes.

Esta solução garante um funcionamento fiável do sistema, assegurando que a ativação e desativação dos sensores ocorrem de forma controlada, sem interferências

no desempenho global. Além disso, a implementação deste circuito de controlo ON/OFF, faz com que não haja dissipação de energia no transístor quando está ao corte nem quando está em saturação, e contribui diretamente para a preservação da autonomia da bateria, permitindo reduzir o consumo energético nos períodos em que a recolha de dados não é necessária.

5.2.1.2 Circuito de Ligação do Módulo NB-IoT

Para assegurar a comunicação sem fios no sistema de monitorização externo, foi integrado um módulo NB-IoT, especificamente o SIM7020E, que permite a transmissão eficiente dos dados recolhidos pelos sensores para a base de dados, através da rede 4G/LTE mesmo em locais sem cobertura Wi-Fi.

A comunicação entre o ESP32 e este módulo é realizada através de uma interface UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), utilizando os sinais de transmissão (TX) e receção (RX). Além disso, foi incluído um pino de ativação do módulo (NB_IOT_POWER), evitando necessidade de intervenção manual para a ligação deste, já que devido a necessidade de gestão energética é obrigatório desliga-lo para evitar consumos energéticos desnecessários.

Na Figura 44(a), é possível observar as ligações ao módulo, enquanto que na Figura 44(b) apresentam-se as ligações ao microcontrolador.

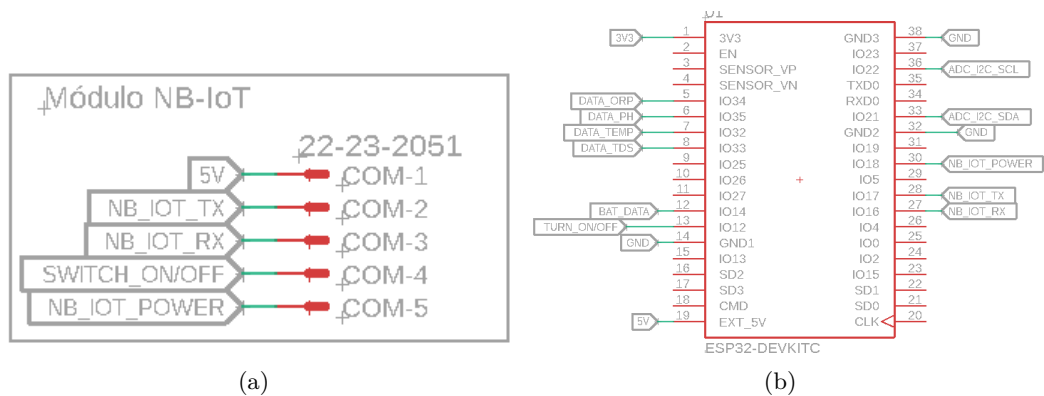


Figura 44: NB-IoT: (a) Ligações ao módulo. (b) Ligações ao ESP32.

Para o envio e receção de dados, o SIM7020E utiliza um conjunto de comandos 'AT', que permitem configurar parâmetros como a rede NB-IoT utilizada, a autenticação do módulo junto da operadora e o envio de pacotes de dados para a base de dados remota. Estes comandos que são enviados pelo ESP32 através da interface UART, foram já descritos na Secção 4.3.2.3.

5.2.1.3 Alimentação do Circuito

O sistema de monitorização é alimentado por uma bateria de lítio, cuja tensão nominal é de 3,7 V. No entanto, como o ESP32 e os restantes componentes do circuito operam a 3,3 V, tornou-se necessária a utilização de um regulador de tensão para garantir um fornecimento estável de energia.

Para esta função, foi utilizado o MCP1700T, um regulador LDO, escolhido devido às suas características técnicas adequadas para sistemas alimentados por bateria. O MCP1700T apresenta as seguintes características:

- Tensão de entrada: 2,3 V ~ 6 V
- Tensão de saída: 1,2 V ~ 3,3 V
- Corrente de saída: 250 mA
- Queda de tensão típica (dropout voltage) com $V_R < 2,5$ V ($V_R = V_{IN} - V_O$): 150 mV

A principal razão para a escolha deste componente foi a sua baixa queda de tensão. No caso deste circuito, onde a alimentação é proveniente de uma bateria de 3,7 V, um regulador de tensão comum poderia não ser eficiente devido à queda excessiva de tensão. Com o MCP1700T, que possui uma queda de tensão apenas 150 mV com um V_R de 0,4 V, é possível obter uma tensão estável de 3,3 V sem comprometer a autonomia do sistema.

Foi também implementado um divisor de tensão, composto por duas resistências de 510 Ω e 4,2 k Ω , reduzindo a tensão da bateria para 3,3 V, permitindo a sua medição por uma entrada analógica do ESP32. A relação entre a tensão de entrada (V_{in}) e a tensão reduzida (V_{out}) é dada pela equação do divisor de tensão:

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 3,7 \times \frac{4200}{510 + 4200} = 3,3V \quad (2)$$

onde $R_2 = 4,2$ k Ω e $R_1 = 510$ Ω .

Este circuito possibilita a monitorização contínua do nível da bateria em percentagem, a partir do sinal BAT_DATA. Foi ainda introduzido um díodo, para evitar que haja eventuais picos de tensão no microcontrolador.

5.2.1.4 *Ligação GPS*

O sistema de monitorização inclui um módulo GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para determinação da posição geográfica do dispositivo em tempo real. Para esta funcionalidade, foi selecionado o módulo MAX-M10S, um recetor GNSS de baixo consumo e elevada precisão.

O módulo MAX-M10S é compatível com várias constelações de satélites, assegurando uma maior precisão e disponibilidade do sinal. Entre os sistemas de navegação suportados encontram-se o GPS e o QZSS, operando na banda L1C/A a 1575,42 MHz, o Galileo, que utiliza o sinal E1-B/C na mesma frequência, o GLONASS, que funciona na banda L1OF a 1602 MHz, e o BeiDou, que suporta os sinais B1I a 1561,098 MHz e B1C a 1575,42 MHz. A compatibilidade com múltiplas redes de satélites permite reduzir o tempo de aquisição e aumentar a precisão da geolocalização. As características deste módulo são as seguintes:

- Tensão de alimentação: 1,8 V a 3,6 V (alimentado a 3,3 V no circuito)
- Consumo energético (modo contínuo): 25mW
- Modos de operação: Configuração para baixa potência disponível
- Interfaces de comunicação: UART, I2C, SPI (implementado via I2C no presente circuito)
- Sensibilidade:
 - Rastreamento: -167 dBm
 - Aquisição: -156 dBm
- Precisão de posição horizontal: <1,5 metros
- Suporte para antenas: Ativa e Passiva (implementado com antena externa ativa)

Para garantir uma receção de sinal otimizada, foi utilizada uma antena externa ativa, que oferece melhor desempenho. O MAX-M10S suporta tanto antenas passivas quanto ativas, sendo que, no presente circuito, a escolha da antena ativa foi baseada na necessidade de garantir um tempo de aquisição mais rápido e maior fiabilidade na fixação da posição.

A comunicação entre o MAX-M10S e o microcontrolador é feita através da interface I2C, utilizando os sinais SDA (dados) e SCL (clock). No presente circuito, o módulo GNSS partilha o mesmo barramento I2C utilizado pelo conversor ADC ADS1115,

aproveitando a capacidade do protocolo I2C de suportar múltiplos dispositivos com apenas dois fios de comunicação.

O I2C é um protocolo de comunicação série síncrono, onde se podem ligar múltiplos dispositivos ao mesmo par de linhas SDA e SCL, sem interferência entre si. Cada dispositivo no barramento é identificado por um endereço único, que permite ao microcontrolador selecionar qual dispositivo com que deseja comunicar num dado momento.

5.2.2 *Gestão Energética*

A gestão energética do sistema de monitorização é um fator crítico, dado que este opera exclusivamente a partir de uma bateria de lítio com capacidade de 4500 mAh e tensão nominal de 3,7 V. O objetivo principal é maximizar a autonomia do sistema, reduzindo o consumo energético sempre que possível, sem comprometer a capacidade de recolha e transmissão de dados.

Durante os testes práticos, foi realizada uma leitura do consumo total do sistema em funcionamento, onde se verificou que, com todos os sensores e módulos ativados, a corrente medida foi de aproximadamente 240 mA. Esta medição foi realizada utilizando um multímetro, permitindo estimar o impacto energético dos componentes críticos.

Para reduzir o consumo energético houve a necessidade de várias abordagens, tais como, a utilização do modo *sleep* do ESP32, isto é, o microcontrolador em baixo consumo quando não há necessidade de processar ou transmitir dados, reduzindo significativamente a corrente da fonte de alimentação. São também desativados a partir do sistema de controlo ON/OFF os módulos e os sensores, quando não há a necessidade de leitura, reduzindo também a corrente consumida.

Com base nos testes práticos e nas estratégias de otimização implementadas, foi estimada a autonomia da bateria considerando os seguintes parâmetros:

- Capacidade da bateria: 4500 mAh
- Consumo médio em modo ativo: 240 mA
- Duração de cada transmissão (envio de dados): 5 minutos
- Número de transmissões por dia: 6 transmissões
- Consumo médio em modo deep-sleep: 0,15 mA

O tempo total de transmissão diário é dado por:

$$T_{ativo} = \left(\frac{5}{60}\right) \times 6 = 0,5 \text{ horas/dia} \quad (3)$$

O tempo restante no modo deep-sleep é:

$$T_{sleep} = 24 - T_{ativo} = 24 - 0,5 = 23,5 \text{ horas/dia} \quad (4)$$

O consumo energético diário é então calculado como:

$$C_{diario} = (240mA \times 0,5h) + (0,15mA \times 23,5h) \quad (5)$$

$$C_{diario} = 120mAh + 3,53mAh = 123,53mAh/dia \quad (6)$$

A autonomia estimada da bateria (AA) em dias é dada por:

$$A = \frac{4500mAh}{123,53mAh/dia} \approx 36,4 \text{ dias} \quad (7)$$

Convertendo para meses:

$$A_{meses} = \frac{36,4}{30} \approx 1,21 \text{ meses} \quad (8)$$

Com estes cálculos estimou-se que a bateria consegue alimentar o circuito em funcionamento cerca de 36 dias, havendo a necessidade de recarregar a bateria após esse tempo.

5.2.3 Projeto da PCB

A PCB desenvolvida para este sistema foi projetada de forma a integrar os sensores, o microcontrolador ESP32, os módulos de comunicação e os circuitos de alimentação e de gestão de energia. Esta abordagem garante uma configuração com maior estabilidade e robustez no ambiente externo onde será implementado.

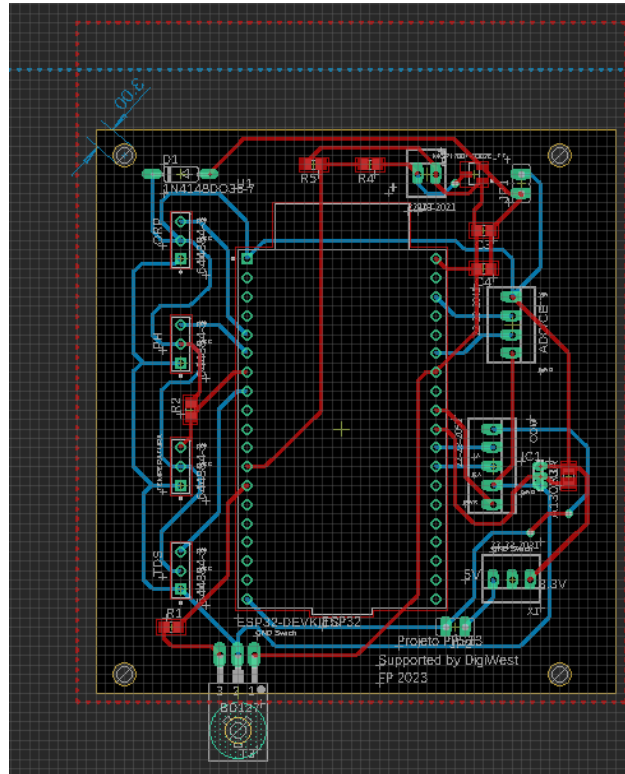


Figura 45: PCB do sistema de monitorização da água inserida na estufa.

A PCB foi fabricada em FR4, um material amplamente utilizado devido às suas boas propriedades dielétricas, resistência mecânica e baixo custo. A largura das pistas e o isolamento mínimo foram definidos de acordo com as normas da empresa responsável pela produção, garantindo um equilíbrio na integridade dos sinais. Neste caso, utilizou-se a largura das pistas com 0,5 mm e um isolamento nos planos de massa de 1, utilizado já também na construção da PCB descrita anteriormente.

Para garantir maior estabilidade dos sinais elétricos e reduzir ruídos indesejados, foi implementado um plano de massa em ambas as camadas da PCB, facilitando a disposição dos componentes.

O ESP32 foi posicionado de forma central, facilitando a ligação dos módulos de comunicação e sensores. Esta posição do microcontrolador é adequada para a gestão

de espaço, tornando a placa mais preenchida e compacta. Neste caso, a dimensão é de 70 mm de largura e 75 mm de comprimento.

O circuito de controlo ON/OFF, baseado no transistor BD127, foi integrado diretamente na PCB, simplificando montagem.

A PCB deste sistema foi projetada para garantir fiabilidade, modularidade e eficiência energética. A disposição dos componentes, a implementação do plano de massa e a otimização das ligações elétricas asseguram um funcionamento estável e robusto.

5.3 PROTOTIPAGEM

Nesta secção são apresentados os protótipos desenvolvidos para a acomodação das PCBs dos amplificadores e das ligações aos sensores, otimizando a organização dos componentes no espaço mais compacto possível. O principal objetivo da prototipagem foi garantir uma estrutura funcional e esteticamente organizada. Os protótipos foram concebidos no *software Fusion 360*, uma vez que este permite projetar caixas adaptadas para impressão 3D, reduzindo significativamente os custos de fabrico e assegurando que cada caixa possui dimensões adequadas para uma montagem organizada. Foram desenvolvidas duas caixas principais, uma destinada à acomodação dos sensores e amplificadores, garantindo proteção e uma disposição otimizada das ligações, e outra projetada para suportar as unidades de monitorização visual.

5.3.1 *Protótipos do Sistema de Monitorização da Qualidade da Água*

A caixa principal foi projetada para acomodar o ESP32, os módulos amplificadores e as interfaces de ligação aos sensores. O seu desenvolvimento foi realizado em três fases no *software Fusion 360*, garantindo um design otimizado para robustez, organização e proteção dos componentes eletrónicos.

Na fase inicial, foi projetada a base da caixa, onde foram definidas todas as dimensões estruturais para assegurar uma fixação compatível com os componentes internos. Como ilustrado na Figura 46, a base contém múltiplas perfurações estratégicas, que permitem a fixação da PCB principal ao centro, utilizando os quatro furos localizados nos cantos internos. Além disso, foram incluídas perfurações adicionais para a fixação dos módulos amplificadores, facilitando a interligação entre os sensores e com a PCB. A base inclui ainda diversas aberturas laterais

para permitir a passagem dos cabos dos sensores e da alimentação, garantindo um encaminhamento organizado dos fios dentro da caixa.

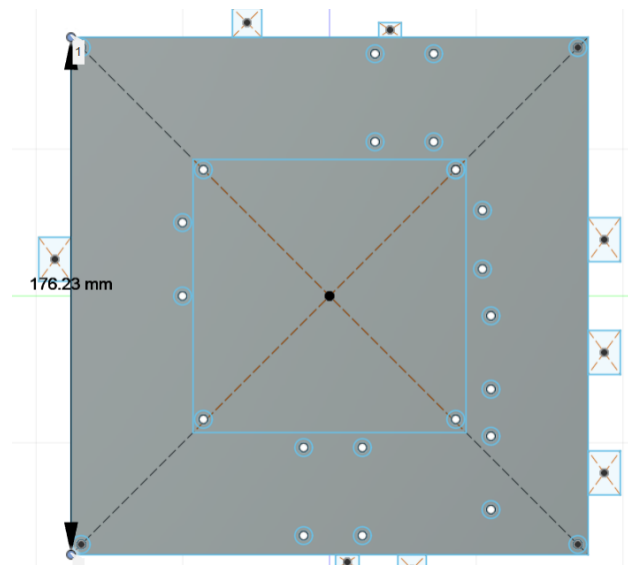


Figura 46: Base de fixação dos componentes internos do sistema de monitorização da qualidade da água.

Na segunda fase, foi incorporado o relevo estrutural da base, definindo as superfícies elevadas para suporte mecânico e as cavidades necessárias para a fixação dos parafusos. Como apresentado na Figura 47, esta fase incluiu a modelação de encaixes específicos para a fixação segura dos componentes, garantindo a precisão dimensional dos furos de fixação da PCB e dos módulos amplificadores. Além disso, foram implementadas aberturas laterais para os sensores, alguns com conectores BNC, e outros com formas retangulares, dimensionados para assegurar um encaixe estanque e evitar infiltrações de água na caixa, protegendo assim os circuitos internos.

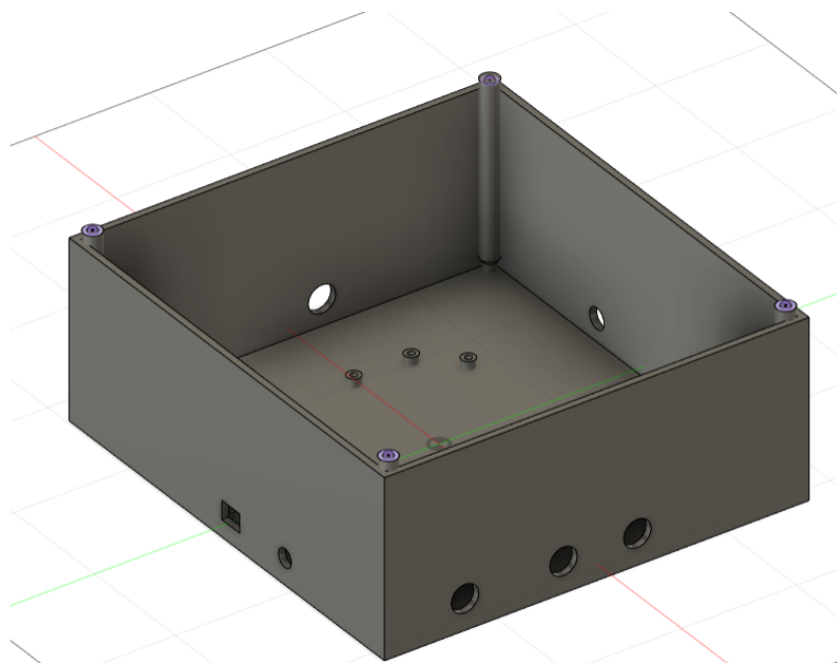


Figura 47: Caixa do sistema de monitorização da qualidade da água.

Na terceira fase foi realizada a tampa com o relevo. Esta tampa foi desenhada com o objetivo de se fixar perfeitamente na base, tendo ainda sido introduzidas aberturas para a colocação dos parafusos para prender a tampa à base. Foi também introduzida informação relativa à autoria, âmbito e curso, como é possível observar na Figura 48.

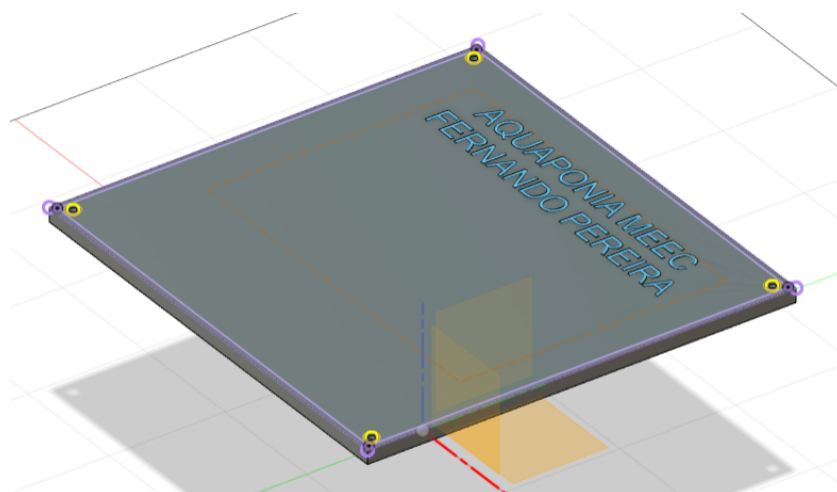


Figura 48: Tampa da caixa do sistema de monitorização da qualidade da água.

A caixa possui dimensões finais de 195 mm × 195 mm e uma altura de 88 mm com a tampa, proporcionando um espaço interno suficiente para a organização dos

módulos eletrônicos, enquanto mantém uma estrutura compacta e resistente às condições ambientais.

Como já foi referido anteriormente, houve a necessidade de desenvolver uma caixa dedicada à acomodação das ESP32-CAM, utilizadas para a monitorização visual. Ambas as caixas foram fabricadas com as mesmas dimensões e concebidas para proporcionar proteção física aos componentes, bem como um posicionamento ajustável, permitindo que a sua orientação seja modificada de acordo com o cenário a monitorizar.

O desenvolvimento desta estrutura foi realizado em duas fases principais. Na primeira fase, foi projetada a base da caixa, responsável por acomodar a PCB com os componentes e a ESP32-CAM. Como se pode observar na Figura 49, a base inclui quatro perfurações estrategicamente posicionadas para a fixação da PCB, garantindo um encaixe preciso.

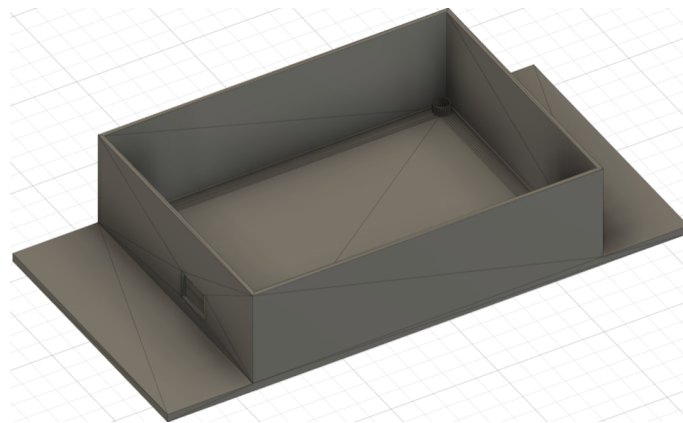


Figura 49: Base da caixa das ESP32-CAM.

A caixa foi dimensionada para proporcionar um ajuste exato à PCB, eliminando desperdícios de espaço e assegurando uma construção compacta. Foi ainda deixado um espaço específico para o conector Micro-USB, permitindo a alimentação direta da ESP32-CAM, conforme detalhado anteriormente. Além disso, a estrutura incorpora extensões laterais, desenhadas para possibilitar a fixação da caixa em diferentes suportes. Para este propósito, foram projetados encaixes compatíveis com tubos PVC, permitindo uma montagem ajustável e garantindo a flexibilidade necessária para reposicionamento. A altura da base foi cuidadosamente definida em função dos componentes já inseridos na PCB, assegurando um encaixe adequado e evitando pressões indevidas sobre os circuitos.

Na segunda fase, foi desenvolvida a tampa da caixa, projetada para se encaixar perfeitamente na base e assegurar a proteção completa dos componentes internos.

Como se pode observar na Figura 50, a tampa inclui aberturas para a lente da ESP32-CAM e para o sensor de temperatura e humidade (DHT22). A abertura destinada à câmara foi estrategicamente posicionada para garantir um alinhamento perfeito da lente, evitando qualquer deslocamento ou obstrução da imagem capturada.

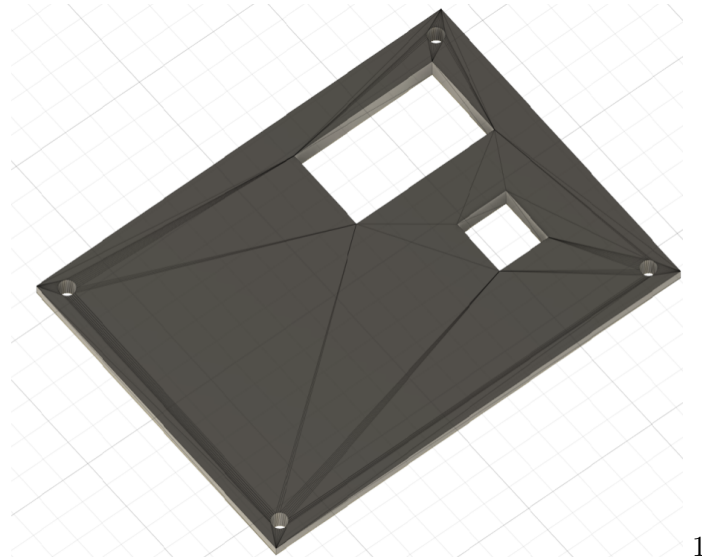


Figura 50: Tampa da caixa das ESP32-CAM.

A caixa foi dimensionada com $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, enquanto a estrutura total, incluindo as extensões laterais, atinge 120 mm de comprimento. A altura da caixa sem tampa é de 25 mm , e com a tampa instalada, a altura total é de 30 mm . A conceção desta caixa assegura proteção, modularidade e facilidade de instalação, permitindo que sejam ajustadas conforme a necessidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com os sistemas de monitorização, incluindo a análise dos protótipos desenvolvidos, os procedimentos de calibração dos sensores e a avaliação da sua precisão. São também discutidas as principais limitações identificadas e comparados os dados registados com medições convencionais, permitindo a avaliação da fiabilidade do sistema.

6.1 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

A calibração dos sensores é um processo essencial para garantir medições precisas e fiáveis ao longo do tempo. Neste sistema, apenas o sensor de sólidos totais dissolvidos (STD) e o sensor de temperatura não têm a necessidade de calibração. Nesta secção, são descritos os procedimentos utilizados para a calibração dos sensores de pH, condutividade eléctrica (CE), potencial de oxidação-redução (ORP). Cada um destes sensores requer um método de calibração específico, utilizando soluções de referência fornecidas pelo fabricante ou preparadas manualmente.

6.1.1 *Calibração do Sensor de pH*

A calibração do sensor de pH é essencial para garantir a precisão das medições, uma vez que a descalibração do eléctrodo ao longo do tempo pode levar a leituras incorretas. Com base nos testes realizados, verificou-se que o sensor necessitava de uma calibração inicial, antes da sua primeira utilização, e de ajustes regulares pelo menos uma vez por mês, pois, após esse período, os valores começavam a apresentar desvios significativos, os quais eram corrigidos após recalibração.

A calibração foi realizada com o método de calibração em dois pontos, utilizando soluções padrão de pH 4,0 e pH 7,0, de acordo com as recomendações do fabricante. Este processo foi implementado no código do microcontrolador, utilizando funções específicas para ajustar os valores lidos pelo sensor de acordo com as referências

fornecidas pelas soluções padrão; estas funções utilizam a compensação automática de temperatura.

O procedimento seguiu os seguintes passos:

1. Preparação das Soluções – Foram utilizadas soluções padrão de pH 4,0 e pH 7,0 para garantir uma calibração precisa.
2. Lavagem do Sensor – Antes de cada calibração, o sensor foi cuidadosamente lavado com água destilada para evitar contaminação entre soluções.
3. Solução de pH 7,0 – O sensor foi imerso na solução de pH 7,0 e, através da função de calibração no microcontrolador, o valor lido foi ajustado para corresponder a esta referência.
4. Solução de pH 4,0 – Após uma nova lavagem com água destilada, o sensor foi colocado na solução de pH 4,0, sendo então ajustado no código para apresentar a leitura correta.
5. Armazenamento dos Parâmetros de Calibração – Os coeficientes ajustados foram guardados na memória EEPROM do microcontrolador, garantindo que as medições subsequentes utilizassem os valores calibrados sem necessidade de reajuste.
6. Validação da Calibração – Testou-se o desempenho do sensor em laboratório e comparou-se com o desempenho de um instrumento laboratorial profissional devidamente calibrado

Após a calibração, foi então realizada a validação da calibração comparando as medições do sensor de pH com uma sonda multiparamétrica de laboratório. A Tabela 1 apresenta os valores obtidos para diferentes soluções padrão de pH preparadas em laboratório, valores medidos com o sistema desenvolvido versus valores medidos com uma sonda multiparamétrica *Edge*. da marca *HANNA Instruments* calibrada.

Tabela 1: Comparação entre os valores lidos pela sonda de laboratório e pelo sensor de pH do protótipo após calibração numa leitura.

Solução Padrão pH	Sonda Lab.	Protótipo
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

Os resultados indicam que, após calibração, os valores medidos pelo sensor de pH do protótipo apresentaram uma boa correspondência com os valores obtidos pela sonda de laboratório. As diferenças entre as leituras foram geralmente inferiores a 0,2 unidades de pH, exceto para a solução de pH 10, onde se verificou um desvio de aproximadamente 0,51 unidades. Esta discrepância pode ser atribuída a fatores como limitações inerentes à gama de potenciais ao próprio sensor analógico.

Apesar destas pequenas variações, os valores obtidos indicam que o sensor, quando calibrado corretamente, fornece medições fiáveis e coerentes com os equipamentos de referência. Para garantir esta precisão ao longo do tempo, é essencial manter a recalibração periódica, tal como observado durante os testes.

6.1.2 *Calibração do Sensor Condutividade Elétrica*

A calibração do sensor de condutividade elétrica foi realizada antes da primeira utilização do sensor e, com base nos testes experimentais, verificou-se que era necessário um novo ajuste aproximadamente a cada dois meses para garantir a precisão das medições, comprovando que este sensor é mais estável que o sensor de pH em termos de necessidade de calibração.

A calibração foi efetuada utilizando duas soluções padrão de condutividade fornecidas pelo fabricante, correspondentes aos valores de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 12880 $\mu\text{S}/\text{cm}$. O procedimento de calibração foi implementado diretamente no código do microcontrolador, permitindo ajustar o coeficiente de calibração com base nas leituras obtidas, utilizando a temperatura como referência para obter maior precisão nas leituras. O processo seguiu as seguintes etapas:

1. Preparação das Soluções de Referência – Foram utilizadas duas soluções padrão com condutividades conhecidas de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 12880 $\mu\text{S}/\text{cm}$, garantindo uma calibração em dois pontos.
2. Compensação de Temperatura – O sensor de CE possui um fator de compensação de temperatura que ajusta os valores lidos para uma referência padrão de 25 °C. Durante a calibração o valor da temperatura foi lido e inserido na função de calibração de modo a obter leituras mais precisas.
3. Calibração no Ponto de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – O sensor foi imerso na solução de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sendo ajustado no código para garantir que a leitura correspondia ao valor esperado.

4. Ajuste com a solução 12880 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – Após a calibração inicial, o sensor foi testado na solução de 12880 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sendo aplicados ajustes adicionais para melhorar a linearidade da resposta do sensor.
5. Armazenamento dos Parâmetros de Calibração – Os coeficientes de calibração ajustados foram gravados na EEPROM do microcontrolador, garantindo que as futuras medições utilizassem os valores calibrados sem necessidade de nova configuração manual.
6. Validação da Calibração – Testou-se o desempenho do sensor em laboratório e comparou-se com o desempenho de um instrumento laboratorial profissional devidamente calibrado.

Após a calibração, foi realizada uma verificação experimental comparando as medições do sensor com uma sonda multiparamétrica de laboratório, a sonda HI 2030, HANNA. A Tabela 2 apresenta os valores obtidos em uma leitura.

Tabela 2: Comparação entre os valores lidos pela sonda de laboratório e pelo sensor de CE do protótipo após calibração.

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

Os resultados mostram que o sensor calibrado apresenta uma excelente correspondência com os valores de referência, particularmente para a solução de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, onde a diferença entre o sensor e a sonda de laboratório foi nula. Para os outros pontos de calibração, os desvios registrados foram inferiores a 1,6 %, o que está dentro das margens de erro típicas para sensores analógicos de condutividade.

A precisão obtida confirma a eficácia do processo de calibração e reforça a importância da sua realização periódica. A necessidade de recalibração a cada dois meses foi identificada como um requisito fundamental para garantir medições fiáveis e consistentes ao longo do tempo.

6.1.3 Calibração Sensor Potencial Oxidação-Redução

A calibração do sensor de ORP é essencial para garantir a precisão das medições, uma vez que a resposta do eletrodo pode ser influenciada por fatores como o desgaste da sonda e a acumulação de impurezas na superfície do eletrodo. Durante os testes

experimentais, verificou-se que a calibração deste sensor era necessária com maior frequência do que a dos sensores de pH e condutividade elétrica, sendo necessário um ajuste aproximadamente a cada duas semanas.

A calibração foi realizada utilizando uma solução de referência preparada em laboratório, composta por 3,5 mol/l de KCl (cloreto de potássio). Esta solução é frequentemente utilizada para calibração de sensores de ORP, pois estabelece um potencial de referência estável, permitindo o ajuste do desvio do sensor em função da temperatura.

O processo de calibração seguiu os seguintes passos:

1. Preparação da Solução de Referência – A calibração foi realizada utilizando uma solução de referência preparada em laboratório de cloreto de potássio, KCl, 3,5 mol/l.
2. Compensação de Temperatura – Como o potencial de ORP pode variar com a temperatura, foram realizadas medições simultâneas da temperatura da solução para ajustar os valores esperados.
3. Ajuste do Offset – O sensor foi imerso na solução de referência e, através do código do microcontrolador, foi ajustado o offset para alinhar a leitura do sensor ao valor esperado da solução de calibração.
4. Validação da Calibração – O sensor após alteração do offset foi novamente testado para garantir a estabilidade no valor.

Ao contrário dos sensores de pH e condutividade elétrica, a calibração do sensor de ORP não requer um ajuste de ganho, apenas a correção do offset, visto que a resposta do sensor já é linear e depende do potencial medido em relação ao eletrodo de referência.

6.2 SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NA ESTUFA

Nesta secção são discutidos os resultados experimentais no sistema de monitorização da qualidade da água, apresentados os protótipos finais e alguns dos resultados obtidos ao longo dos meses.

6.2.1 Monitorização da Qualidade da Água

Para validar o funcionamento do sistema de monitorização, foi desenvolvido um protótipo funcional que integra os sensores de qualidade da água, o microcontrolador ESP32 e os módulos de comunicação. A estrutura do sistema foi concebida para assegurar a proteção adequada dos componentes eletrónicos, permitindo medições fiáveis em ambiente de estufa.

Na Figura 51, é possível observar o protótipo final, onde se destacam os sensores conectados à unidade central de processamento, bem como a caixa de proteção desenvolvida para acomodar os componentes eletrónicos. A disposição modular do sistema permitiu a organização eficiente das ligações elétricas, garantindo uma instalação segura e de fácil manutenção.

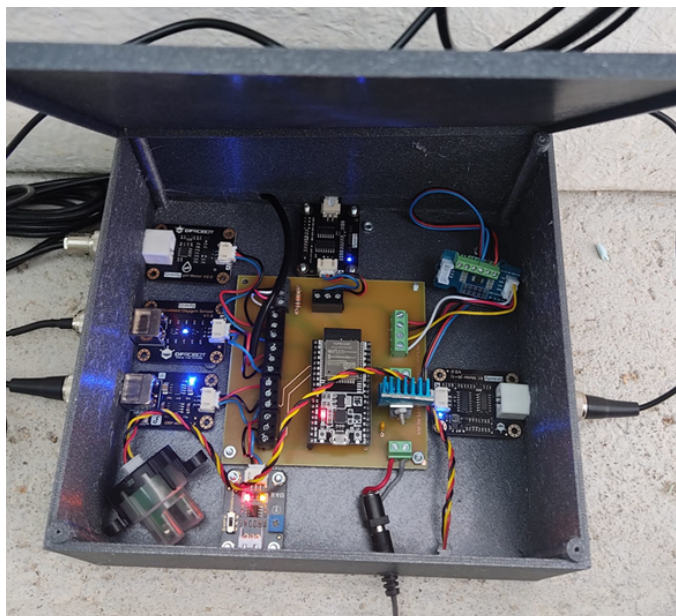


Figura 51: Protótipo final do sistema de monitorização da qualidade da água.

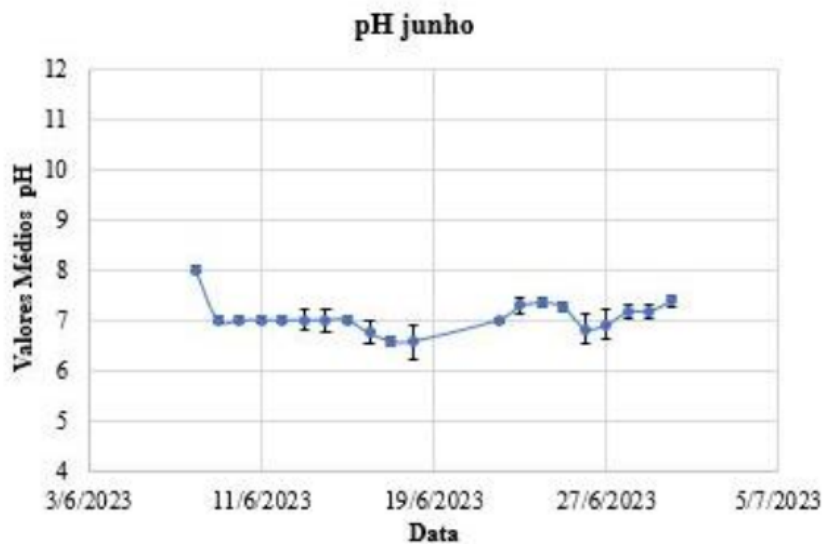
O protótipo foi testado em condições reais de operação, permitindo a recolha de dados contínua e o envio de medições para a plataforma de monitorização. A caixa de proteção, fabricada por impressão 3D, garantiu a integridade do sistema ao minimizar a exposição à humidade e poeiras, preservando a durabilidade dos componentes.

6.2.1.1 *Apresentação e Análise dos Dados*

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos sensores de temperatura, pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos e potencial de oxidação-redução, foram analisados os valores médios diários registados ao longo de cada mês para cada parâmetro. Cada um dos parâmetros foi lido durante todo o mês com recolha de dados de 30 em 30 minutos.

No caso do sensor de pH, a análise centrou-se nos meses de junho e agosto de 2023, uma vez que, em determinados períodos, foi necessário interromper a recolha de dados para realizar ajustes e otimizações no sistema de monitorização.

A Figura 52 apresenta a evolução dos valores médios diários de pH ao longo destes meses. Observa-se que os valores registados se encontram no intervalo de 5 a 8, faixa considerada adequada para sistemas de aquaponia, conforme já referido anteriormente. A análise do desvio padrão indica que os valores medidos se mantêm estáveis ao longo do tempo, demonstrando a fiabilidade do sensor após os procedimentos de calibração.



(a) Valores médios diários de pH em junho.



(b) Valores médios diários de pH em agosto.

Figura 52: Variação dos valores médios diários do pH ao longo do mês de junho e agosto de 2023.

A análise destes dados confirma que o sistema de monitorização deteta variações no pH e fornece medições coerentes com os valores esperados. No entanto, reforça-se a necessidade de calibração periódica, para assegurar a precisão e a estabilidade das medições ao longo do tempo.

A Figura 53 apresenta a evolução dos valores médios diários de condutividade elétrica registados nos meses de abril, junho e agosto de 2023, neste caso houve também a necessidade de interromper a recolha de dados para realizar ajustes e otimizações no sistema de monitorização e para comparação entre os dados de todos

os sensores utilizou-se sempre os mesmo meses nos outros sensores. De uma forma geral, os valores encontram-se dentro da gama aceitável para sistemas de aquaponia.

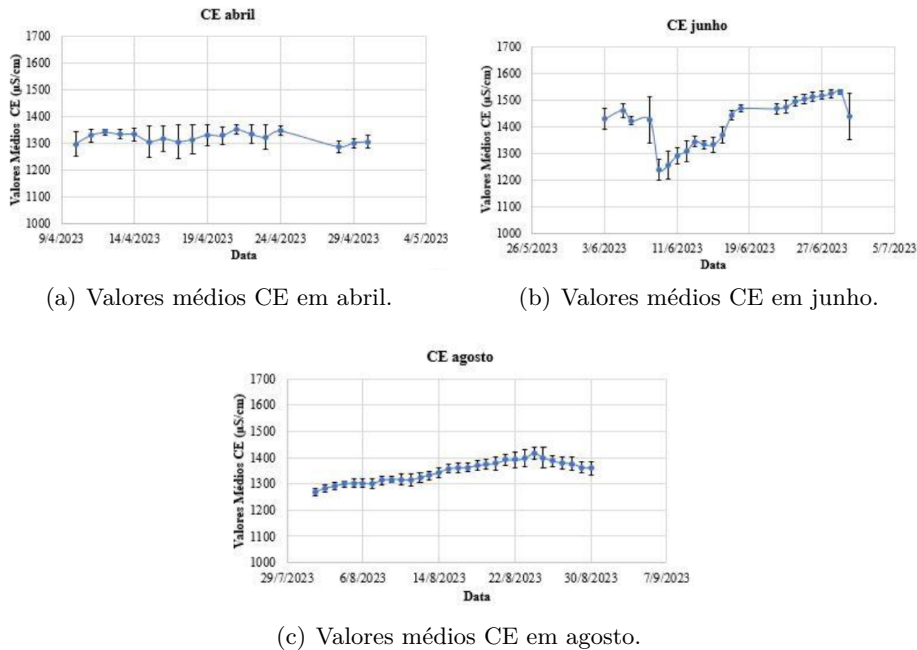


Figura 53: Variações do valores de condutividade elétrica em abril, junho e agosto de 2023.

No mês de junho, observa-se uma maior variação nos valores medidos, atingindo valores máximos na ordem dos $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$ e apresentando uma maior dispersão dos dados em torno da média. Este comportamento pode estar associado a diversos fatores, como flutuações ambientais, interferência eletromagnética ou ruído nos dados. Uma das razões para a ocorrência destas variações pode também ser a necessidade de calibração não identificada atempadamente. Apesar dessas oscilações, os valores mantêm-se dentro da gama esperada, não comprometendo a qualidade da monitorização.

Nos meses de abril e agosto, verifica-se uma estabilidade significativamente maior nos valores medidos, com dispersão reduzida e um comportamento consistente ao longo do tempo. Nestes períodos, os valores de CE permaneceram estáveis e dentro da gama esperada, evidenciando a fiabilidade das medições obtidas pelo sensor após a calibração.

A análise dos resultados indica que o sistema de monitorização responde corretamente às variações da condutividade elétrica ao longo do tempo, fornecendo medições coerentes com os valores esperados. A estabilidade registada nos meses de abril e agosto reforça a fiabilidade do sensor, enquanto a maior variação observada em junho reforça a necessidade de haver recalibração do mesmo.

A Figura 54 apresenta a variação dos valores médios diários de sólidos dissolvidos totais nos meses de abril, junho e agosto de 2023. A análise destes valores permite avaliar a resposta do sensor e a sua estabilidade ao longo do tempo.

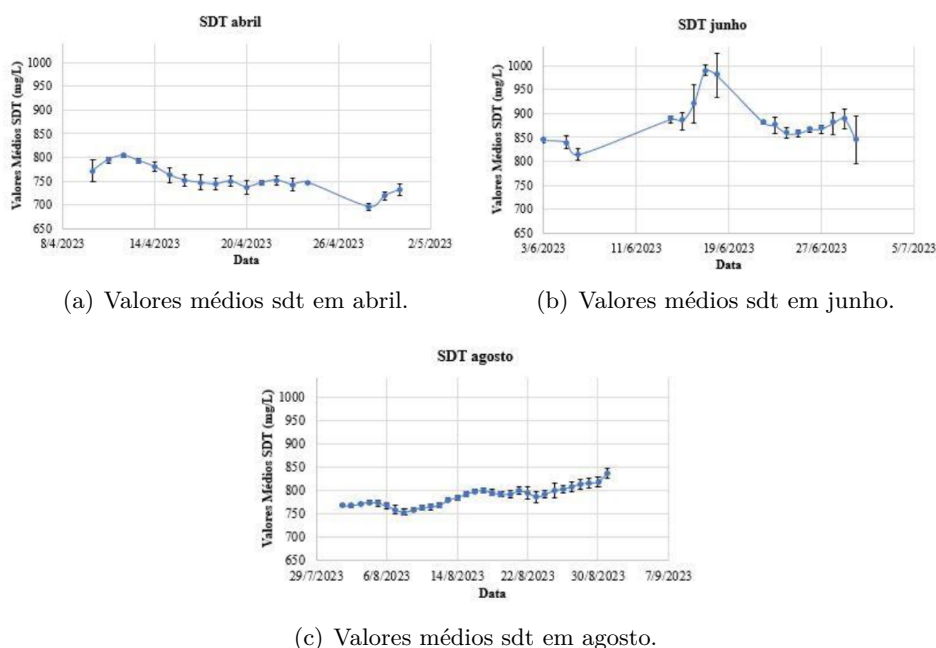
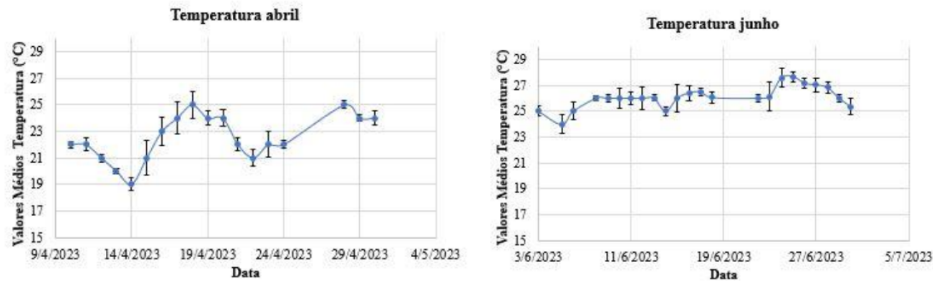


Figura 54: Variações do valores de sólidos dissolvidos totais em abril, junho e agosto de 2023.

No mês de junho, observa-se uma maior variação nos valores medidos, atingindo valores próximos de 1000 mg/l, com oscilações acentuadas ao longo do período; resultados que estão de acordo com os anteriormente discutidos para a condutividade elétrica, considerando a correlação entre os dois parâmetros. Embora estes valores estejam dentro da gama aceite para os sistemas de aquaponia, este excesso de oscilações demonstra erros nos valores. Este acontecimento deve-se a possíveis erros técnicos no upload dos dados ou até mesmo a leituras enviadas em que o sensor não estava estável, mais tarde corrigidas. Como é possível observar, no final desse mês o sensor conseguiu apresentar oscilações menores e valores mais perto do esperado. Além disso, variações na temperatura podem ter influenciado a compensação térmica aplicada ao cálculo do STD.

Nos meses de abril e agosto, verificou-se uma maior estabilidade nas medições, com variações reduzidas e valores que se mantêm dentro do intervalo esperado. Apesar das variações registadas no mês de junho, a análise global dos dados demonstra uma boa estabilidade do sensor de STD ao longo do tempo, com valores consistentes nos restantes períodos monitorizados, mostrando ser um sensor fiável para medir o sólidos totais dissolvidos.

A Figura 55 apresenta a variação dos valores médios diários de temperatura registados ao longo dos meses de abril, junho e agosto de 2023. A análise destes dados permite avaliar a estabilidade do sensor e a coerência das medições em diferentes condições ambientais.



(a) Valores médios da temperatura em abril. (b) Valores médios da temperatura em junho.



(c) Valores médios da temperatura em agosto.

Figura 55: Variações da temperatura em abril, junho e agosto de 2023.

Os resultados indicam que a temperatura média registada apresenta um comportamento cíclico ao longo do dia e da noite, com valores mais elevados durante o período diurno e reduções significativas durante a noite. Esta variação segue a tendência esperada para ambientes externos, onde a radiação solar influencia diretamente a temperatura.

Nos meses de junho e agosto, a temperatura média situou-se entre 25 °C e 30 °C, valores típicos da época de verão. Já no mês de abril, observam-se temperaturas mais baixas, variando entre 19 °C e 25 °C, o que reflete as condições mais amenas da primavera. Estes valores encontram-se dentro da gama recomendada para plantas em sistemas de aquaponia, que, como já foi referido anteriormente, deve estar compreendida entre 18 °C e 30 °C.

Além disso, a análise do desvio padrão demonstra que as medições apresentaram uma baixa dispersão em torno da média, indicando uma elevada estabilidade do sensor de temperatura. A boa precisão das medições sugere que o sensor respon-

deu corretamente às variações naturais de temperatura ao longo do tempo, sem apresentar oscilações inesperadas.

Observando os resultados, é visível que o sensor de temperatura funcionou de forma fiável durante todo o período de monitorização, refletindo com precisão as variações ambientais diárias. As flutuações observadas são coerentes com o ciclo natural de aquecimento e arrefecimento da água ao longo do dia, validando a adequação do sensor para aplicações em sistemas de aquaponia.

A Figura 56 apresenta os valores médios diários do potencial de oxidação-redução registados ao longo do mês de agosto 2023. Observa-se que, durante a maior parte do período em causa, os valores de ORP permaneceram dentro da gama aceitável para sistemas de aquaponia, compreendida entre 100 mV e 400 mV. No entanto, na última semana de agosto, verificou-se um aumento significativo nos valores medidos, embora dentro de uma gama aceitável.

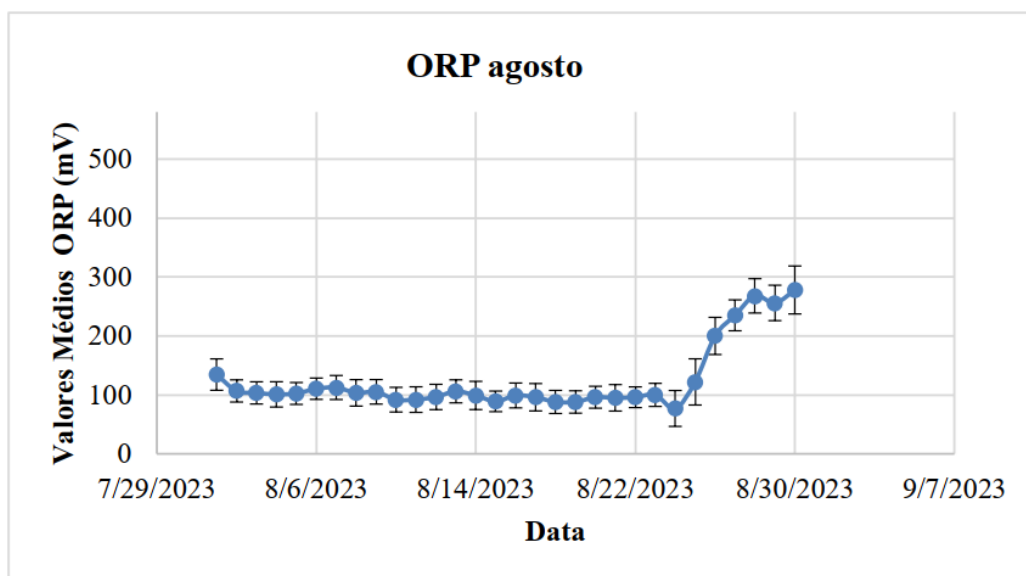


Figura 56: Dados do potencial de oxidação-redução.

Após uma análise mais aprofundada, verificou-se que este comportamento não estava associado a mudanças reais na qualidade da água, mas sim a uma necessidade de recalibração frequente do sensor. Testes posteriores demonstraram que este sensor apresentava uma degradação mais rápida na precisão das medições, exigindo um ajuste regular a cada duas semanas para evitar leituras incorretas.

Além disso, ao longo do período de utilização, observou-se que o sensor de ORP exigia uma manutenção mais rigorosa em comparação com os restantes sensores. A necessidade de recalibrações frequentes e a menor estabilidade dos valores registados

indicam que este sensor pode não ser a opção mais fiável para monitorização contínua, exigindo uma verificação periódica mais intensiva para garantir medições coerentes.

De um modo geral, os sensores apresentaram um desempenho fiável, fornecendo medições coerentes ao longo do tempo. Os sensores de temperatura, pH, sólidos totais dissolvidos e condutividade elétrica mostraram regularidade nas medições, apresentando uma gama de valores adequados a um sistema aquapónico. O sensor de ORP, por outro lado, revelou-se menos estável, necessitando de calibrações mais regulares devido a variações nos valores registados. Em conclusão, o sistema conseguiu apresentar a maior parte do tempo valores esperados.

6.2.2 Monitorização Visual

A monitorização visual foi implementada como complemento ao sistema de monitorização da qualidade da água, permitindo o acompanhamento remoto do crescimento das plantas e a deteção de insetos, tal como já foi referido em secções anteriores. Para tal, foram instaladas duas ESP32-CAM em locais estratégicos dentro da estufa. Estas câmaras foram configuradas para capturar imagens periodicamente de 1 em 1 hora, armazenando-as na base de dados da *Firebase*. Na Figura 57 é possível observar os protótipos implementados na estufa.

6.2.2.1 Análise das Imagens e dos Resultados Experimentais

Com o objetivo de avaliar a eficácia do sistema de monitorização visual, foi realizado um teste experimental para acompanhar o crescimento das alfaces ao longo de quatro semanas, o tempo normal para o crescimento completo destas. As imagens foram capturadas automaticamente pelas ESP32-CAM, permitindo uma análise contínua do desenvolvimento das plantas e facilitando a deteção de eventuais anomalias no cultivo.

Na Figura 58(a), observa-se o estado inicial do cultivo, com as alfaces recém-introduzidas no sistema. Simultaneamente, a Figura 58(b) mostra a folha adesiva amarela colocada no mesmo momento, ainda sem qualquer captura de insetos. Este método de monitorização permite observar o crescimento das plantas e a presença de potenciais pragas, proporcionando uma visão integrada do ambiente dentro da estufa.

Após quatro semanas de crescimento, verifica-se na Figura 59(a) que as alfaces atingiram um estado de maturação adequado para colheita. Paralelamente, a Figura



Figura 57: Protótipos ESP32-CAM: (a) Visão Frontal. (b) Visão lateral.

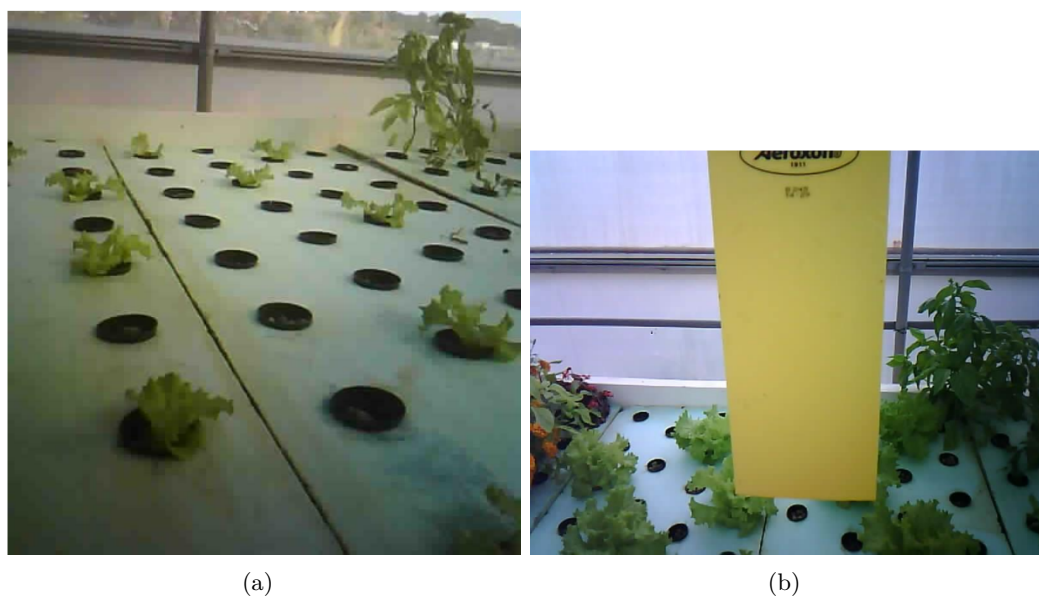


Figura 58: (a) Alfaces acabadas de plantar. (b) Folha para captura de insetos.

59(b) apresenta a mesma folha adesiva após esse período, agora com um número significativo de insetos capturados. Esta abordagem demonstrou ser eficaz não só para o acompanhamento remoto do desenvolvimento das plantas, mas também para a detecção de pragas.

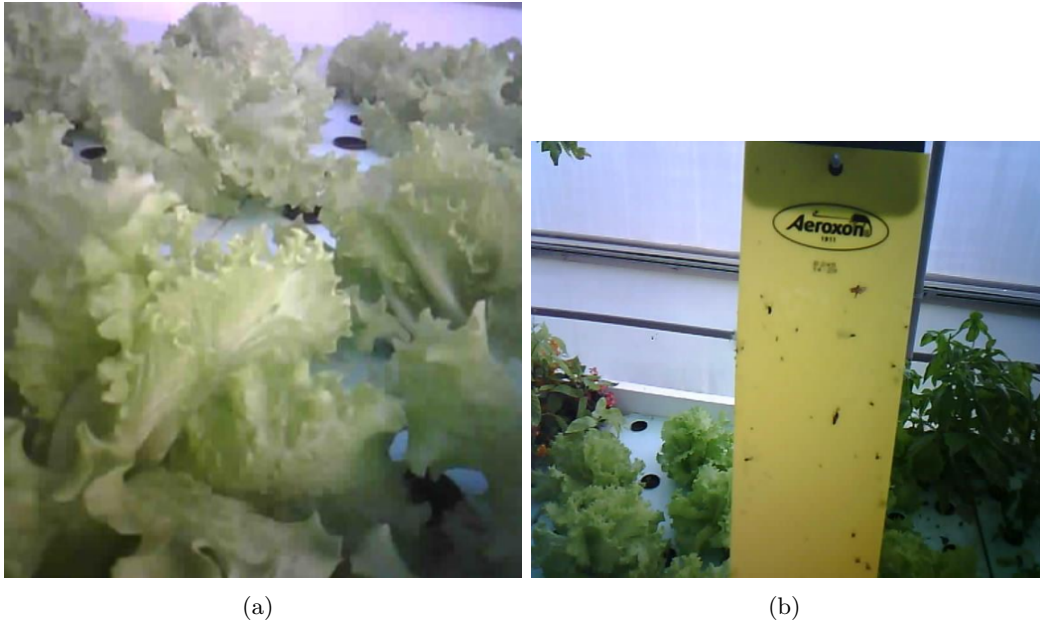


Figura 59: (a) Alfaces prontas para colheita. (b) Folha de insetos.

Durante o período de monitorização, observou-se que, à medida que as plantas cresciam e ocupavam mais espaço no campo de visão da câmara, a qualidade das imagens capturadas diminuía devido à proximidade e à limitação da lente original. Para melhorar a nitidez e o detalhe das imagens, foi realizada a substituição da lente de uma das ESP32-CAM por um modelo de maior qualidade. A Figura 60 ilustra um exemplo da melhoria obtida após a troca da lente, evidenciando a superior definição das imagens capturadas, permitindo uma análise mais precisa do desenvolvimento das plantas e da presença de insetos.



Figura 60: Imagem obtida com lente de melhor qualidade.

A correlação entre as imagens capturadas ao longo das semanas permitiu validar o desenvolvimento das plantas e a eficácia do método na identificação de pragas. No entanto, verificou-se que a proximidade das alfaces em fases avançadas de crescimento reduzia a qualidade das imagens, tornando necessária a substituição da lente por um modelo de maior qualidade. Esta melhoria permitiu obter imagens mais nítidas, aumentando a precisão da análise e reforçando a utilidade do sistema na monitorização da produção hortícola.

6.3 SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA FORNECIDA À ESTUFA

Este sistema foi desenvolvido para a monitorização da qualidade da água fornecida à estufa, garantindo que os parâmetros fundamentais para a aquaponia são controlados antes da sua entrada no sistema. A principal diferença em relação ao sistema implementado na estufa deve-se à necessidade de operar num ambiente externo.

6.3.1 Protótipo

A estrutura deste sistema foi concebida para garantir resistência a condições ambientais adversas, sendo implementada numa caixa à prova de água, adequada para aplicações em exteriores. A Figura 61 apresenta o protótipo desenvolvido, onde é possível observar a montagem interna dos componentes e a organização dos módulos eletrónicos.

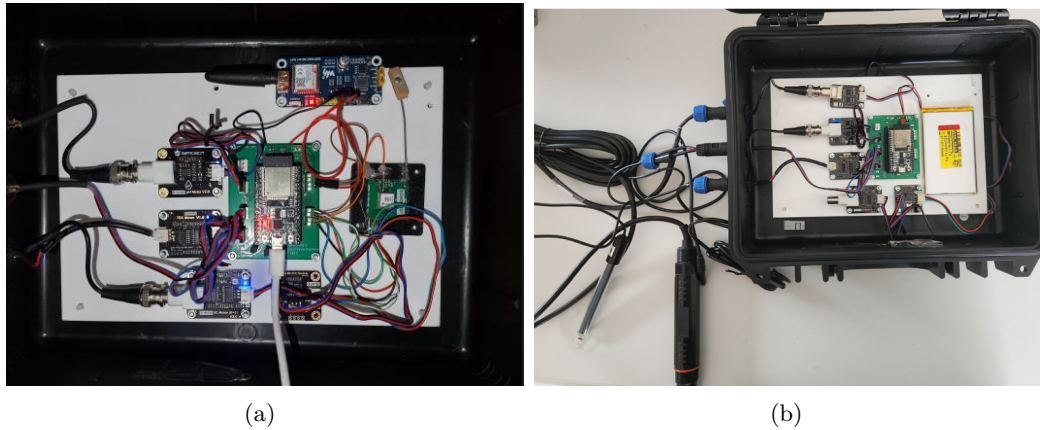


Figura 61: Protótipo final: (a) Vista detalhada dos módulos. (b) Configuração final com os sensores e as entradas estanques adequadas a ambientes externos.

Na Figura 61(a), observa-se a disposição dos componentes principais, incluindo o ESP32, os módulos de digitalização das leituras dos sensores o módulo de comunicação NB-IoT e o recetor GPS. Já na Figura 61(b), é possível visualizar o sistema totalmente montado, com os sensores conectados e as entradas devidamente vedadas, prevenindo a entrada de água e humidade.

A escolha desta caixa à prova de água e dos conectores estanques foi fundamental para a durabilidade do sistema em ambientes externos, assegurando a fiabilidade do mesmo ao longo do tempo.

6.3.2 Visualização e Análise dos Dados na Dashboard

A monitorização da qualidade da água fornecida à estufa foi realizada em tempo real através de uma *dashboard* disponível através de uma página na web que pode ser acedida utilizando um browser, permitindo a visualização contínua dos valores registados pelos sensores. Esta abordagem facilita a análise dos dados e possibilita a deteção imediata de quaisquer anomalias. Na Figura 62, apresenta-se a página

onde são mostrados os valores obtidos para os diferentes parâmetros monitorizados, sendo analisados individualmente para confirmar a sua coerência e estabilidade ao longo do tempo.

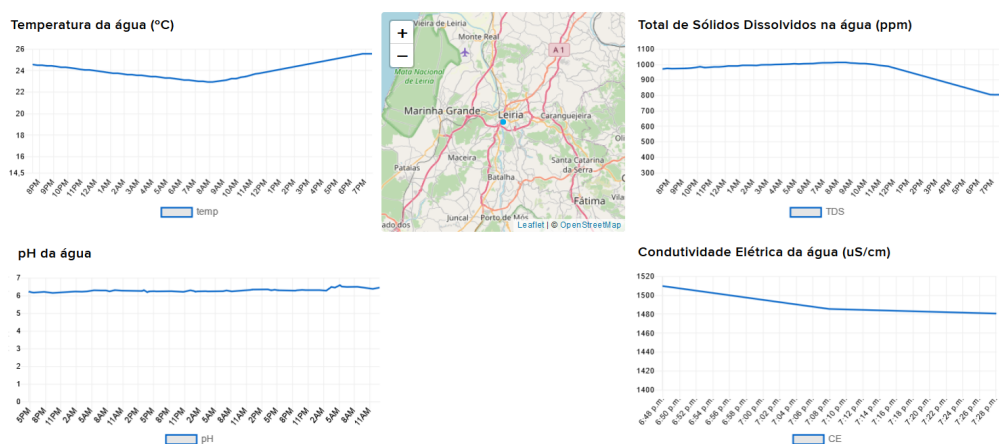


Figura 62: *Dashboard* do sistema de monitorização da água inserida na estufa.

Como se pode observar, os valores registados demonstram consistência ao longo do tempo, mantendo-se dentro dos intervalos aconselhados para um sistema de aquaponia. Neste caso, existe um elemento extra que é a localização da caixa do sistema de monitorização, servindo como segurança, que é possível observar na *dashboard*. Verificou-se que a obtenção da localização é bastante precisa, obtendo apenas um erro inferior a 10 metros.

A implementação do *dashboard* mostrou-se essencial para a supervisão remota, permitindo um acompanhamento contínuo da qualidade da água sem necessidade de intervenções presenciais frequentes.

CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

7.1 CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento e implementação de um sistema de monitorização inteligente para sistemas de aquaponia, utilizando sensores de qualidade da água e módulos de comunicação IoT. A crescente necessidade de automação e otimização dos processos de monitorização em sistemas agrícolas impulsionou a investigação de soluções eficientes e acessíveis para a recolha, transmissão e análise de dados ambientais e da qualidade da água.

Para atingir este objetivo, foi concebido e desenvolvido um sistema composto por dois módulos distintos: um para a monitorização da qualidade da água dentro da estufa e outro para a monitorização da água fornecida ao sistema. O primeiro módulo integra sensores para medir parâmetros essenciais como temperatura, pH, condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais e potencial de oxidação-redução, além de um sistema de monitorização visual baseado em ESP32-CAM para registo da evolução do crescimento das culturas e deteção de insetos. O segundo módulo, projetado para operar em ambiente exterior, recorre a um sistema de comunicação NB-IoT e um recetor GPS para garantir a transmissão de dados e rastreabilidade do equipamento.

Os resultados demonstraram que, após calibração adequada, os sensores apresentaram um desempenho consistente, garantindo medições fiáveis e adequadas à monitorização do sistema. Foi ainda observada a necessidade de calibrações periódicas, nomeadamente para os sensores de pH e ORP, de forma a manter a precisão das medições ao longo do tempo.

A implementação da monitorização visual mostrou-se uma ferramenta complementar útil, permitindo o acompanhamento remoto do crescimento das culturas e a deteção da presença de insetos na estufa. No entanto, verificou-se que a qualidade das imagens captadas podia ser melhorada com a substituição da lente original por uma de maior qualidade, o que foi posteriormente efetuado com sucesso.

A gestão energética foi um fator crítico na conceção do sistema externo, tendo sido aplicadas diversas estratégias de otimização, incluindo a implementação de um modo de baixo consumo no ESP32 e a ativação controlada dos sensores e módulos de comunicação. A autonomia da bateria foi estimada em aproximadamente um mês, dependendo da frequência de envio dos dados.

De um modo geral, os resultados obtidos demonstram que o sistema desenvolvido é uma solução viável e eficiente para a monitorização contínua de sistemas de aquaponia, contribuindo para a otimização da gestão da qualidade da água e do crescimento das culturas. A implementação de tecnologias IoT neste contexto revelou-se uma abordagem promissora, possibilitando o acesso remoto aos dados e a minimização da necessidade de intervenção humana direta.

7.2 TRABALHO FUTURO

Embora o sistema desenvolvido tenha apresentado resultados promissores na monitorização da qualidade da água e no acompanhamento remoto do crescimento das culturas, existem diversas oportunidades para melhorias e futuras expansões. Uma das principais áreas de evolução passa pela integração de automação ativa no sistema. Atualmente, a monitorização é realizada de forma passiva, com os dados a serem recolhidos e analisados, mas sem qualquer mecanismo de resposta automática. No futuro, a implementação de um sistema de controlo baseado em atuadores permitiria a regulação de parâmetros como pH e condutividade elétrica, garantindo uma maior estabilidade das condições da água sem necessidade de intervenção manual.

A nível da monitorização visual, a substituição da lente da ESP32-CAM já resultou numa melhoria significativa na qualidade das imagens captadas. No entanto, para tornar a deteção de padrões mais eficiente, poderia ser explorada a aplicação de algoritmos de visão computacional para automatizar a identificação de pragas e o acompanhamento do crescimento das culturas. Adicionalmente, o sistema poderia ser melhorado com o desenvolvimento de uma base de dados própria para armazenar e organizar os dados recolhidos, permitindo uma análise mais estruturada e eficiente dos registos históricos.

Outro avanço importante seria a criação de um portal web dedicado à monitorização dos parâmetros, onde os utilizadores poderiam aceder em tempo real às medições realizadas pelos sensores, consultar históricos de dados e receber alertas sobre variações anómalas. Para complementar esta solução, o desenvolvimento de uma aplicação móvel dedicada facilitaria ainda mais o acesso às informações do

sistema, tornando a monitorização mais acessível e eficiente, especialmente para os utilizadores que necessitam de acompanhamento remoto contínuo.

A implementação destas melhorias permitiria não só aumentar a eficiência e autonomia do sistema, como também proporcionar uma experiência mais completa e intuitiva aos utilizadores, garantindo um controlo mais detalhado e acessível sobre o sistema, em particular conhecer em tempo real as variações na qualidade da água e alterações nas culturas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. A. Sheikh. «Hydroponics: Key to sustain agriculture in water stressed and urban environment». Em: *Pakistan J. Agricult., Agricult. Eng. Vet. Sci.* 22.2 (2006), pp. 53–57.
- [2] C. C. Huang et al. «Evaluation of the water quality and farming growth benefits of an intelligence aquaponics system». Em: *Sustainability (Switzerland)* 13.8 (2021), pp. 1–15. DOI: [10.3390/su13084210](https://doi.org/10.3390/su13084210).
- [3] I. L. Van Rooyen e W. Nicol. «Nitrogen management in nitrification-hydroponic systems by utilizing their pH characteristics». Em: *Environmental Technology and Innovation* 26 (2022), p. 102360. DOI: [10.1016/j.eti.2022.102360](https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102360).
- [4] D. C. Love, J. P. Fry, L. Genello et al. «An international survey of Aquaponics Practitioners». Em: *Plos One* 9 (2014), e102662.
- [5] Dan Wang et al. «Design of a smart monitoring and control system for aquaponics based on OpenWrt». Em: *5th International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials*. Atlantis Press, 2015.
- [6] Rabiya Abbasi, Pablo Martinez e Rafiq Ahmad. «Data acquisition and monitoring dashboard for IoT enabled aquaponics facility». Em: *2022 10th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA)*. IEEE, 2022.
- [7] Fachrul Rozie, Iwan Syarif e M. Udin Harun Al Rasyid. «Design and implementation of Intelligent Aquaponics Monitoring System based on IoT». Em: *2020 International Electronics Symposium (IES)*. IEEE, 2020.
- [8] Damariz Yessenia Santillán Ushiña. «Uso eficiente de nutrientes na produção de biomassa vegetal num sistema de aquaponia com monitorização inteligente». Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico de Leiria - ESTG: Instituto Politécnico de Leiria, 2024.
- [9] Y. Wei et al. «Equipment and intelligent control system in aquaponics: A review». Em: *IEEE Access* 7 (2019), pp. 169306–169326.
- [10] M. E. Muñoz Gutiérrez. «Sistemas de recirculación acuapónicos». Em: *Informador Técnico (Colombia) Revistas Sena* 76.60 (2012), pp. 123–129. URL: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/download/36/41.

- [11] A. R. Yanes, P. Martinez e R. Ahmad. «Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems». Em: *Journal of Cleaner Production* 263 (2020), p. 121571. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.121571](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121571).
- [12] C. Somerville et al. *Small-scale aquaponic food production*. FAO Fisheries e Aquaculture, 2014. URL: <http://www.fao.org/3/contents/1dea3c92-1faa-47bb-a374-0cf4d9874544/i4021e00.htm>.
- [13] B. da S. Cerozi e K. Fitzsimmons. «The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponics nutrient solution». Em: *Bioresource Technology* 219 (2016), pp. 778–781. DOI: [10.1016/j.biortech.2016.08.079](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.079).
- [14] M. Krastanova et al. «Aquaponic systems: biological and technological parameters». Em: *Biotechnology and Biotechnological Equipment* 36.1 (2022), pp. 305–316. DOI: [10.1080/13102818.2022.2074892](https://doi.org/10.1080/13102818.2022.2074892).
- [15] X. Ding et al. «Electrical conductivity of nutrient solution influenced photosynthesis, quality, and antioxidant enzyme activity of pakchoi (*Brassica campestris* L. Ssp. *Chinensis*) in a hydroponic system». Em: *PLoS ONE* 13.8 (2018), pp. 1–15. DOI: [10.1371/journal.pone.0202090](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202090).
- [16] K. Shetye et al. «IoT Based Stormwater Quality Management System». Em: *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Knowledge Discovery in Concurrent Engineering (ICECONF 2023)*. 2023, pp. 1–7.
- [17] N. A. Mohamed et al. «Physiological and ion changes of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) under the effect of salinity stress». Em: *Aquaculture Reports* 19 (2021), p. 100567. DOI: [10.1016/j.aqrep.2020.100567](https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100567).
- [18] C. McGehee e R. E. Raudales. «Irrigation Sources with Chlorine Drinking Water Standard Limits Cause Phytotoxicity on ‘Rex’ Lettuce Grown in Hydroponic Systems». Em: *HortTechnology* 33.1 (2023), pp. 125–130. DOI: [10.21273/HORTTECH05091-22](https://doi.org/10.21273/HORTTECH05091-22).
- [19] N. H. Nghi et al. «Ozonation process and water disinfection». Em: *Vietnam Journal of Chemistry* 56.6 (2018), pp. 717–720. DOI: [10.1002/vjch.201800076](https://doi.org/10.1002/vjch.201800076).
- [20] B. Liu, P. Soundararajan e A. Manivannan. «Mechanisms of Silicon-Mediated Amelioration of». Em: *Plants* 8 (2019), pp. 1–13.
- [21] A. Spiliotopoulou et al. «Ozonation control and effects of ozone on water quality in recirculating aquaculture systems». Em: *Water Research* 133 (2018), pp. 289–298. DOI: [10.1016/j.watres.2018.01.032](https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.032).

- [22] *A7800 SERIES POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS*. SLVS056J. Rev. 3. Texas Instruments. Mai. de 2003.
- [23] *Analog ORP Meter (SKU: SEN0165)*. Acedido em 25 de março de 2025. DFRobot. n.d. URL: https://wiki.dfrobot.com/Analog_ORP_Meter_SKU_SEN0165_.

DECLARAÇÃO

Declaro, sob compromisso de honra, que o trabalho apresentado nesta dissertação, com o título “*Sistema de monitorização avançado para aquaponia*”, é original e foi realizado por Fernando de Jesus Santos Pereira (2212415) sob orientação do Professor Sérgio Manuel Maciel de Faria, Professor Telmo Rui Carvalhinho Cunha Fernandes, e Professora Judite dos Santos Vieira.

Fernando de Jesus Santos Pereira