UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS PESQUEIROS E ENGENHARIA DE PESCA

OLAVO JOSÉ LUIZ JUNIOR

PLATAFORMA DE MONITORAMENTO AUTOMATIZADO DE CO_2 E QUALIDADE DA ÁGUA EM PISCICULTURA COM TECNOLOGIAS ABERTAS

Toledo

2025

OLAVO JOSÉ LUIZ JUNIOR

PLATAFORMA DE MONITORAMENTO AUTOMATIZADO DE CO_2 E QUALIDADE DA ÁGUA EM PISCICULTURA COM TECNOLOGIAS ABERTAS

Defesa de tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca – Mestrado e Doutorado, do Centro de Engenharias e Ciências Exatas, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca.

Área de concentração: Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca.

Área de concentração: Aquicultura

Orientador: Prof. Dr. Aldi Feiden

Toledo

2025

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Luiz Junior, Olavo José
Plataforma de monitoramento automatizado de CO2 e qualidade da água em piscicultura com tecnologias abertas / Olavo José Luiz Junior; orientador Aldi Feiden. -- Toledo, 2025.
88 p.

Tese (Doutorado Campus de Toledo) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca, 2025.

1. Pegada de carbono na aquicultura. 2. Qualidade da água na aquicultura. 3. Aquicultura de precisão. I. Feiden, Aldi, orient. II. Título.

OLAVO JOSÉ LUIZ JUNIOR

PLATAFORMA DE MONITORAMENTO AUTOMATIZADO DE CO_2 E QUALIDADE DA ÁGUA EM PISCICULTURA COM TECNOLOGIAS ABERTAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca.

APROVADA: 11 de junho de 2025.

Prof. Dr. Aldi Feiden
Orientador (UNIOESTE)

Prof. Dr. Altevir Signor
(UNIOESTE)

Prof. Dr. Wilson Rogério Boscolo
(UNIOESTE)

Prof. Dr. Valci Ferreira Victor
(IFTO)

Prof. Dr. Luiz Fernando Delboni Lomba
(IFMS)

Aos meus pais, Leoni, sempre em nossas memórias, e Olavo, que me ensinaram desde muito cedo que a educação seria o rumo e trabalharam incansavelmente para abrir este caminho. À minha companheira Viviane, por compartilharmos estes 35 anos de jornada...

Não quero acreditar, eu quero conhecer.
(Carl Sagan)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas que tem participação na realização desta tese.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Aldi Feiden, por seus muitos papéis ao longo deste percurso. Exemplo singular de pessoa que alia o notório e conhecido mérito intelectual com a simplicidade e o acolhimento às pessoas. Seu conhecimento e experiência foram vitais para o desenvolvimento deste trabalho. Sou muito grato pela liberdade e confiança concedidas durante a pesquisa.

Aos professores do PREP pelas valiosas contribuições e conhecimento compartilhado em aulas, bancas, visitas técnicas, conversas e demais atividades. Um agradecimento especial à servidora Carla Regina Meurer, secretária e esteio do Programa, sempre solícita e eficiente. Aos demais servidores da Unioeste que de algum modo deram sua contribuição, principalmente nas atividades operacionais da pesquisa.

Aos colegas do programa, pelo companheirismo, pelas trocas intelectuais e pelos momentos de descontração que tornaram a jornada mais leve. Particularmente aos integrantes do Gemaq. Trata-se de uma equipe diversa e divertida. Obrigado àqueles que se tornaram mais próximos e estiveram presentes nos desafios cotidianos do doutorado, sempre disponíveis para ajudar quando necessário, sem hesitação: Analice Timóteo de Araújo, David Borovicz Carvalho da Silva de Jesus, Eva Barros Miranda, Felipe Misael da Silva Morsoleto e Pedro Rondon Werneck. Em especial, obrigado ao incansável Humberto Rodrigues Macedo, parceiro de projeto e exemplo ímpar de dinamismo e generosidade com os colegas. Orgulho de ter como colega de serviço público no Instituto Federal este exemplo de qualidade e comprometimento.

À Aquicultura Venites e à Piscicultura Starker Fisch meu agradecimento pelo valioso auxílio à nossa pesquisa.

A todos meus colegas de IFPR pelo apoio durante os períodos mais intensos desta caminhada, principalmente na etapa na qual foi necessário conciliar as atividades no Instituto com o doutorado. Especialmente ao amigo Prof. Dr. Rafael Luis Bartz. Seu incentivo e auxílio foram muito importantes para que eu pudesse atingir os objetivos deste doutoramento.

À minha família, pelo carinho de sempre e pela paciência durante esses anos de eventuais ausências por conta dos estudos. Voltemos aos nossos projetos!

Por fim, a todos que, de forma direta ou indireta, ajudaram a construir esta trajetória, meu muito obrigado!

LUIZ JR, Olavo José. **Plataforma de monitoramento automatizado de CO_2 e qualidade da água em piscicultura com tecnologias abertas**. 2025. 88f. Tese (Doutorado em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Toledo, 2025.

RESUMO

O crescimento da aquicultura, embora estratégico para a segurança alimentar global, impõe desafios relacionados à sustentabilidade ambiental, especialmente no tocante às emissões de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2). A presente tese aborda os desafios ambientais da aquicultura intensiva, com foco na qualidade da água e na emissão de CO_2, gás pouco monitorado no setor. O trabalho desenvolveu uma plataforma multiparamétrica aberta, denominada Pegad@, visando monitorar a qualidade da água e estimar o CO_2 em viveiros escavados, preenchendo uma lacuna científica e oferecendo uma ferramenta acessível e replicável. A pesquisa se estruturou em três frentes: um estudo bibliométrico que mapeou a produção científica sobre pegada de carbono na aquicultura, demonstrando que estudos ligados à piscicultura ainda são pouco explorados; uma revisão sistemática sobre aplicações de Tecnologias da Informação e Comunicação, com ênfase na Internet das Coisas, destacando tendências e limitações na adoção dessas tecnologias no setor aquícola, revelando uma lacuna relevante sobre medições diretas de CO_2 nestes ambientes; e o desenvolvimento e a experimentação prática do protótipo Pegad@, composto por microcontroladores de baixo custo, sensores ambientais (temperatura, oxigênio dissolvido e CO_2) e conectividade em nuvem. O sistema permite a visualização remota dos dados e apresenta potencial para integração com técnicas de inteligência artificial (IA) no futuro. Os resultados indicam que a plataforma é funcional, replicável e economicamente viável, sendo uma solução promissora para o monitoramento contínuo de parâmetros críticos na piscicultura. A tese contribui com uma abordagem com potencial de aplicação prática para avançar na quantificação da pegada de carbono, alinhando-se aos princípios da Aquicultura 4.0 e reforçando a importância da digitalização como estratégia para uma produção mais eficiente e ambientalmente responsável. Os trabalhos futuros incluem a incorporação de novos sensores, padronização de componentes físicos e ampliação da base de dados para análises preditivas baseadas em IA.

Palavras-chave: Aquicultura de Precisão; Dióxido de Carbono (CO_2); Inteligência Artificial das Coisas (AioT); Internet das Coisas (IoT); Oxigênio Dissolvido (OD).

LUIZ JR, Olavo José. **Automated CO_2 and water quality monitoring platform for fish farming using open technologies**. 2025. 88f. Thesis (PhD in Fisheries Resources and Engineering), State University of Western Paraná - Unioeste, Toledo, 2025.

ABSTRACT

The growth of aquaculture, although strategic for global food security, poses challenges related to environmental sustainability, especially with regard to greenhouse gas emissions, such as carbon dioxide (CO_2). This thesis addresses the environmental challenges of intensive aquaculture, focusing on water quality and CO_2 emissions, a gas that is poorly monitored in the sector. The study developed an open multiparametric platform, called Pegad@, to monitor water quality and estimate CO_2 in excavated ponds, filling a scientific gap and offering an accessible and replicable tool. The research was structured on three fronts: a bibliometric study that mapped scientific production on carbon footprints in aquaculture, demonstrating that studies related to fish farming are still under-explored; a systematic review of Information and Communication Technology applications, with emphasis on the Internet of Things, highlighting trends and limitations in the adoption of these technologies in the aquaculture sector, revealing a significant gap in direct CO_2 measurements in these environments; and the development and practical testing of the Pegad@ prototype, consisting of low-cost microcontrollers, environmental sensors (temperature, dissolved oxygen, and CO_2), and cloud connectivity. The system allows remote data visualization and has the potential for integration with artificial intelligence (AI) techniques in the future. The results indicate that the platform is functional, replicable, and economically viable, making it a promising solution for the continuous monitoring of critical parameters in fish farming. The thesis contributes an approach with potential practical application to advance the quantification of the carbon footprint, aligning with the principles of Aquaculture 4.0 and reinforcing the importance of digitization as a strategy for more efficient and environmentally responsible production. Future work includes the incorporation of new sensors, standardization of physical components, and expansion of the database for AI-based predictive analytics.

Keywords: Artificial Intelligence of Things (AIoT); Carbon Dioxide (CO_2); Dissolved Oxygen (DO); Internet of Things (IoT), Precision Aquaculture.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C ……..	Graus Celsius
3D ……..	Tridimensional
ACV ……...	Análise do Ciclo de Vida
AI ……	*Artificial Intelligence*
AIoT ……	*Artificial Intelligence of Things*
ARM ……..	*Advanced RISC (Reduced Instruction Set Computing) Machine*
BMP ……...	*Barometric Pressure Sensor*
CAPES ……	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CAUNESP …...	Centro de Aquicultura da UNESP de Jaboticabal
CLP	Controladores Lógicos Programáveis
CNPq ……...	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO_2 ……..	Gás Carbônico
COVID-19 …...	*Corona Virus Disease 2019*
CPU ……..	*Central Processing Unit*
DHT ……	*Digital Humidity and Temperature*
DO ……...	*Dissolved Oxygen*
DRL ……..	*Deep Reinforcement Learning*
ESP	Originalmente uma abreviação de *Eco System Power*, agora faz
……..	referência ao novo nome da empresa, Espressif Systems
FAO ……..	*Food and Agriculture Organization*
FL ……	*Fuzzy Logic*
GBytes …….	Giga Bytes
GEE ……..	Gases de Efeito Estufa
GEMAq ……...	Grupo de Estudos de Manejo na Aquicultura
GPRS ……...	*General Packet Radio Service*
GPS ……..	*Global Positioning System*
Hpa ……...	Hectopascais
IA ……	Inteligência Artificial
ICT ……...	*Information and Communication Technologies*
IFMS	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
……..	do Sul
IFPR ……	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

IFTO ……	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
INMET ……	Instituto Nacional de Meteorologia
IoT ……...	*Internet of Things*
ISSN ……	*International Standard Serial Number*
LCA …….	*Life Cycle Assessment*
LoRa ……	*Long Range*
MBytes ……	Mega Bytes
mg/L ……	Miligramas por Litro
ML ……...	*Machine Learning*
NDIR ……...	*Non-Dispersive Infrared*
NTI ……..	Núcleo de Tecnologia da Informação
OD ……...	Oxigênio Dissolvido
ONU ……	Organização das Nações Unidas
PET ……..	Politereftalato de Etileno
pH	Potencial Hidrogeniônico
ppm …….	Partes por milhão
PREP ……...	Programa de Pós-graduação em Recursos Pesqueiros e Eng. da Pesca
RAM ……...	*Random Access Memory*
RTC …….	*Real Time Clock*
SCO2 ……...	Sensor de gás carbônico
SD ……...	*Secure Digital*
SODT ……..	Sensor de oxigênio dissolvido e temperatura da água
SQL …….	*Structured Query Language*
STP ……..	Sensor de temperatura interna e pressão atmosférica
STU …….	Sensor de temperatura externa e umidade relativa do ar
tCO_2e ……...	Toneladas de CO_2 equivalente
TDS …….	*Total Dissolved Solids*
TIC ……..	Tecnologias de Informação e Comunicação
TTL …….	*Transistor-Transistor Logic*
UNESP ……	Universidade Estadual Paulista
Unioeste ……...	Universidade Estadual do Oeste do Paraná
WiFi …….	*Wireless Fidelity*, nome comercial do padrão de redes IEEE 802.11
WSN ……...	*Wireless Sensor Network*

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Diagrama do estudo bibliométrico realizado 23

Figura 2. Aumento das publicações com os termos utilizados na pesquisa 24

CAPÍTULO II

Figura 1. Evolução das publicações de IoT na piscicultura observadas no estudo 37

CAPÍTULO III

Figura 1. Ambiente de um viveiro escavado 48

Figura 2. Estufa para estimação de CO_2 em tanques 54

Figura 3. Esquema do experimento conjunto para avaliação dos sensores da plataforma 55

Figura 4. Localização e pontos de coleta do experimento 55

Figura 5. Diagrama do protótipo Pegad@ 57

Figura 6. Fluxograma lógico da programação do módulo principal do sistema Pegad@ 58

Figura 7. Arquitetura de comunicações do sistema Pegad@ 59

Figura 8. Visão do banco de dados na nuvem que armazena os parâmetros capturados no tanque 60

Figura 9. Esquema em montagem do experimento conjunto para validação da plataforma Pegad@ 61

Figura 10. Temperaturas Monitoradas (últimas 24h – visto às 6h da manhã) 62

Figura 11. Comparação CO_2 e OD (últimas 24h – visto às 4h da manhã) 62

Figura 12. Comparação dos parâmetros obtidos por ambos os sensores utilizados 63

Figura 13. Correlação entre OD e CO_2 66

Figura 14. Correlação da Temperatura Ambiente com OD e CO_2 66

Figura 15. Leituras de CO_2 e OD nos diferentes tanques no decorrer do tempo 69

APÊNDICE A

Figura 1. Placa ESP32 TTGO T-Beam com Suporte de Bateria 78

Figura 2. Módulo de Real Time Clock DS3231 79

Figura 3. Módulo Micro SD Card 80

Figura 4. Módulo sensor de Temperatura e Umidade DHT22 80

Figura 5. Sensor de temperatura e pressão BMP180 81

Figura 6. Sensor de oxigênio dissolvido e temperatura RS-LDO-N01 82

Figura 7. Sensor de Dióxido de Carbono MH-Z19B 83

Figura 8. Esquema de uso dos pinos do ESP32 no protótipo 84

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1. Revistas com maior número de publicações sobre Pegada de Carbono e Sustentabilidade na Aquicultura..... 25

Tabela 2. Artigos do estudo com maior número de citações 26

CAPÍTULO II

Tabela 1. Plataformas IoT utilizadas nas pesquisas do estudo 37

Tabela 2. Plataformas de comunicação mais utilizadas nas pesquisas..... 39

Tabela 3. Sensores mais utilizados nas pesquisas 40

CAPÍTULO III

Tabela 1. Componentes utilizados no protótipo Pegad@..... 56

Tabela 2. Médias e desvios padrão das variáveis temperatura da água e OD 64

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL 17
CAPÍTULO 1. PEGADA DE CARBONO NA AQUICULTURA: RELEVÂNCIA, PERSPECTIVAS E DESAFIOS 19
RESUMO 19
ABSTRACT 20
1. INTRODUÇÃO 21
2. METODOLOGIA 22
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES 24
4. CONCLUSÃO 27
REFERÊNCIAS 27
CAPÍTULO 2. TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA PISCICULTURA: UMA ANÁLISE COM ÊNFASE EM INTERNET DAS COISAS 30
RESUMO 30
ABSTRACT 31
1. INTRODUÇÃO 32
2. MATERIAL E MÉTODOS 35
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 36
4. CONCLUSÃO 41
REFERÊNCIAS 41
CAPÍTULO 3. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE PLATAFORMA MULTIPARAMÉTRICA ABERTA PARA MONITORAMENTO DE QUALIDADE DA ÁGUA E ESTIMATIVA DE CO_2 NA PISCICULTURA 45
RESUMO 45
ABSTRACT 46
1. INTRODUÇÃO 47
1.1. Dinâmica do CO_2 em Ambientes Aquícolas 47
1.2. Tecnologias de Monitoramento de Viveiros 49
1.3. Integração de IoT e IA na Aquicultura 51
1.4. Objetivos e Proposta do Estudo 53
2. MATERIAIS E MÉTODOS 53
2.1 Caracterização do Ambiente do Experimento 54
2.2 Descrição do Material 56

2.3 Descrição do Material 57
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 60
3.1 Banco de Dados na Nuvem 60
3.2 Interface de Acesso *On-Line* 60
3.3 Análise Comparativa das Sondas de Oxigênio Dissolvido e Temperatura da Água 63
3.4 Relações entre as leituras de Oxigênio Dissolvido, CO_2 e Temperatura da Água 65
4. CONCLUSÃO 69
5. TRABALHOS FUTUROS 70
REFERÊNCIAS 71
CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS 74
APÊNDICE A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS 77
1. MICROCONTROLADOR 77
2. MÓDULO DE RELÓGIO DE TEMPO REAL (RTC) 78
3. MÓDULO GRAVADOR DE CARTÃO MICRO SD 78
4. SENSOR DE TEMPERATURA E UMIDADE 79
5. SENSOR DE TEMPERATURA, ALTITUDE E PRESSÃO 80
6. SENSOR DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO E TEMPERATURA DA ÁGUA 80
7. SENSOR DE CO_2 81
8. DIAGRAMA DE UTILIZAÇÃO DOS PINOS NO MICROCONTROLADOR 82
REFERÊNCIAS 84
APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR 85

INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento da aquicultura traz consigo desafios ambientais e de sustentabilidade, especialmente no que diz respeito à qualidade da água e à emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO_2). A pegada de carbono na aquicultura, embora ainda pouco explorada na literatura científica, emerge como um tema crítico, uma vez que a produção aquícola intensiva pode contribuir para as mudanças climáticas e, ao mesmo tempo, ser impactada por elas. Neste contexto, o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para monitorar e mitigar esses impactos torna-se um caminho para ampliar a sustentabilidade do setor.

A qualidade da água é um fator determinante para o sucesso da piscicultura, influenciando diretamente a saúde, o crescimento e a produtividade dos organismos cultivados. Parâmetros como temperatura, oxigênio dissolvido (OD), potencial de hidrogênio (pH) e turbidez são tradicionalmente monitorados, mas a concentração de CO_2 dissolvido na água tem recebido menos atenção, apesar de seu papel crucial na acidificação da água e no estresse dos peixes. Além disso, o CO_2 é um dos principais GEE, e sua emissão pelos viveiros aquícolas representa uma variável importante para o cálculo da pegada de carbono do setor. A falta de estudos específicos sobre esse tema revela uma lacuna significativa na literatura, justificando a necessidade de pesquisas que integrem o monitoramento da qualidade da água com a avaliação das emissões de CO_2.

As Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs), em particular a Internet das Coisas (IoT), têm se destacado como ferramentas eficazes para modernizar a aquicultura, permitindo o monitoramento em tempo real de variáveis ambientais e a automação de processos. Plataformas baseadas em microcontroladores de baixo custo têm democratizado o acesso a soluções tecnológicas, facilitando a prototipagem e a implementação de sistemas personalizados para a aquicultura. No entanto, a maioria das pesquisas existentes ainda se concentra em parâmetros convencionais, como pH e temperatura, deixando de lado a medição de CO_2 e a integração com inteligência artificial (IA) para análise avançada de dados.

Esta tese propõe o desenvolvimento de uma plataforma multiparamétrica aberta, denominada Pegad@, capaz de monitorar simultaneamente a qualidade da água e estimar o CO_2 em tanques e viveiros escavados. A plataforma combina sensores de baixo custo, microcontroladores e tecnologias de nuvem para coletar, armazenar e visualizar dados em tempo real, além de permitir a integração com técnicas de IA para análise preditiva. O projeto visa não apenas preencher lacunas científicas, mas também oferecer uma ferramenta acessível

e replicável para pesquisadores e produtores, contribuindo para práticas mais sustentáveis na piscicultura.

A tese está organizada em três capítulos principais: o Capítulo 1 realiza um estudo bibliométrico para mapear as pesquisas internacionais sobre o tema, que demonstrou a carências de estudos referentes à piscicultura. O Capítulo 2 analisa o estado da arte das aplicações de IoT na aquicultura que buscam o monitoramento da atividade, identificando tendências, desafios e oportunidades para a integração de sensores e IA, destacando a escassez de estudos específicos sobre CO_2 na piscicultura e a necessidade de monitoramento contínuo. Já no Capítulo 3 é descrito o desenvolvimento, a implementação e os resultados de um protótipo desenvolvido com ferramentas abertas para monitorar qualidade da água e emissões de CO_2, validando sua eficácia em experimentos práticos.

Ao unir aspectos ambientais e tecnológicos, esta pesquisa busca avançar no entendimento da pegada de carbono na aquicultura e na adoção de soluções inovadoras para uma produção mais sustentável. O protótipo proposto representa mais um passo em direção à Aquicultura 4.0, onde a conectividade, a automação e a análise de dados se tornam ferramentas para a eficiência e a redução de impactos ambientais.

CAPÍTULO 1. PEGADA DE CARBONO NA AQUICULTURA: RELEVÂNCIA, PERSPECTIVAS E DESAFIOS

Olavo José Luiz Junior [1]
Humberto Rodrigues Macedo [2]
Eva Barros Miranda [3]
Rafael Luis Bartz [4]
Aldi Feiden [5]

RESUMO

Pegada de carbono é o termo que identifica a quantidade de carbono na atmosfera emitida por indivíduos, empresas ou qualquer tipo de atividade, como a produção agrícola. As cadeias produtivas necessitam cada vez mais ações para mitigar os danos causados ao meio ambiente pela emissão de gases de efeito estufa, como pesquisas para adotar métodos que sequestrem esses gases da atmosfera para alcançar a neutralidade de carbono. O objetivo do artigo foi realizar um estudo bibliométrico sobre a produção científica, em periódicos internacionais da base Scopus, para visualizar a tendência das pesquisas sobre o tema pegada de carbono e sustentabilidade aplicada à aquicultura. Foi identificada uma lacuna significativa na literatura sobre estudos específicos relacionados aos impactos do CO_2 na produção de peixes, representando uma importante oportunidade de pesquisa. A análise evidencia a necessidade crítica de monitoramento dos níveis de gás carbônico nos sistemas de produção aquícolas, tanto para garantir a saúde e produtividade dos organismos aquáticos quanto para contribuir para práticas mais sustentáveis na aquicultura, alinhadas com as metas globais de redução de emissões de gases de efeito estufa.

Palavras-chave: Dióxido de carbono; Neutralização de carbono; Qualidade da água; Sustentabilidade do processo produtivo; VoSViewer.

[1] Instituto Federal do Paraná, Assis Chateaubriand, PR, Brasil. E-mail: olavo.junior@ifpr.edu.br
[2] Instituto Federal do Tocantins - IFTO, Palmas, TO, Brasil. E-mail: humberto.macedo@ifto.edu.br
[3] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, Brasil. E-mail:evabarros2007@gmail.com
[4] Instituto Federal do Paraná - IFPR, Assis Chateaubriand, PR, Brasil. E-mail:rafael.bartz@ifpr.edu.br
[5] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, Brasil. E-mail:aldifeiden@gmail.com

CHAPTER 1. CARBON FOOTPRINT IN AQUACULTURE: RELEVANCE, PERSPECTIVES AND CHALLENGES

ABSTRACT

Carbon footprint is the term that identifies the amount of carbon in the atmosphere emitted by individuals, companies or any type of activity, such as agricultural production. Production chains increasingly need action to mitigate the damage caused to the environment by greenhouse gas emissions, such as research to adopt methods that sequester these gases from the atmosphere in order to achieve carbon neutrality. The aim of the article was to carry out a bibliometric study of scientific production in international journals from the Scopus database, in order to visualize trends of research on the subject of carbon footprint and sustainability applied to aquaculture. A significant gap was identified in literature on specific studies related to the impacts of CO_2 on fish production, representing an important research opportunity. The analysis highlights the critical need to monitor carbon dioxide levels in aquaculture production systems, both to ensure the health and productivity of aquatic organisms and to contribute to more sustainable practices in aquaculture, in line with global targets for reducing greenhouse gas emissions.

Keywords: Carbon dioxide; Carbon neutralization; Sustainability of the production process; VoSViewer; Water quality.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a relação entre as emissões de gases de efeito estufa e a temperatura da Terra é crescente, como mostra a intensa movimentação global sobre o tema durante as últimas Conferências das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (Nações Unidas, 2021). Iniciativas como essa devem aumentar muito a demanda por créditos de carbono no mundo nos próximos anos. O dióxido de carbono (CO_2) é um dos gases responsáveis pelo efeito estufa, e sua concentração na atmosfera contribui para as mudanças climáticas em nosso planeta. O impacto causado pelas atividades humanas que emitem CO_2 para a atmosfera forma a chamada Pegada de Carbono (Radu *et al*., 2013). A Pegada de Carbono consiste no valor de emissão de CO_2, medido em toneladas, geralmente mensal ou anual, informação utilizada para projetar ações de mitigação das emissões, e possibilitar ações de compensação das emissões atuais (Ferreira, 2011). Em 2020, as emissões de CO_2 fóssil até diminuíram devido à pandemia da COVID-19, mas permaneceram em torno de 34 gigatoneladas, cerca de 2,4 bilhões de toneladas a menos que em 2019. No entanto, no Brasil, a realidade foi diferente, e as emissões brutas de GEE (Gases de Efeito Estufa) durante 2020 atingiram 2,16 bilhões de toneladas de CO_2 equivalente (tCO_2e), um aumento de 9,5% em relação ao ano anterior (Deutsche Welle, 2021).

Todo país que busca seu desenvolvimento deve considerar a sustentabilidade como estruturante do mesmo, levando em conta as necessidades atuais sem comprometer os recursos naturais para as gerações futuras, exigindo que esse desenvolvimento seja "economicamente eficiente, socialmente equitativo e ecologicamente tolerável" (Soares & Signor, 2021). Há algum tempo, esforços têm sido feitos para entender o perfil da Pegada de Carbono nas atividades produtivas, através da Análise do Ciclo de Vida (ACV) de sua produção (Galindro *et al*., 2019). A ACV é um método padronizado, desenvolvido para avaliar os potenciais impactos ambientais associados à produção, quantificando e analisando os recursos consumidos e as emissões para o meio ambiente em todas as etapas da produção, desde a extração da matéria-prima até o descarte de resíduos e embalagens (Kimpara *et al*., 2012). Muitas atividades apresentam balanço negativo de carbono, devendo ser identificadas medidas de mitigação por meio da redução de emissões, ou buscando neutralizá-las com a aquisição de créditos de carbono de sistemas produtivos excedentes. Assim, destaca-se a necessidade de pesquisas voltadas para o entendimento da emissão de gases de efeito estufa nos sistemas de produção e principalmente, métodos viáveis para o sequestro do carbono emitido por esses sistemas, incluindo a aquicultura.

O desenvolvimento sustentável tem levado os países ao desafio de buscar um equilíbrio entre o crescimento e a preservação de seus recursos naturais. Com a evolução da questão ambiental e as condições que o planeta apresenta, o cultivo racional de organismos aquáticos, atividade conhecida como aquicultura, também enfrenta o desafio de se adequar ao conceito de sustentabilidade, o que implica agregar novos conhecimentos às práticas produtivas e setoriais (Eler & Millani, 2007). É fundamental saber que as mudanças climáticas são uma ameaça à disponibilidade dos recursos hídricos (Nações Unidas, 2010).

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), projeta que a aquicultura será responsável por cerca de 58% do consumo global de pescado até 2030 (FAO, 2022), mostrando a importância de avaliar a sustentabilidade dos seus sistemas de produção. Alcançar a sustentabilidade não é uma tarefa trivial, e as intervenções devem ser realizadas passo a passo por sistemas sustentáveis (Valenti *et al*., 2018). A FAO propõe um código de conduta para a Pesca Responsável com princípios e disposições que apoiam práticas sustentáveis para o desenvolvimento da aquicultura (FAO, 1995). Entre os princípios para uma abordagem ecossistêmica da aquicultura de água doce estão o desenvolvimento e a gestão da aquicultura, que devem levar em conta toda a gama de funções e serviços deste ecossistema (Allsopp *et al*., 2013).

Neste contexto, através de um estudo bibliométrico, o objetivo deste trabalho é compreender a atual trajetória das pesquisas internacionais que apresentam trabalhos sobre a Pegada de Carbono na produção aquícola, levando em consideração aspectos da sustentabilidade da cadeia produtiva.

2. METODOLOGIA

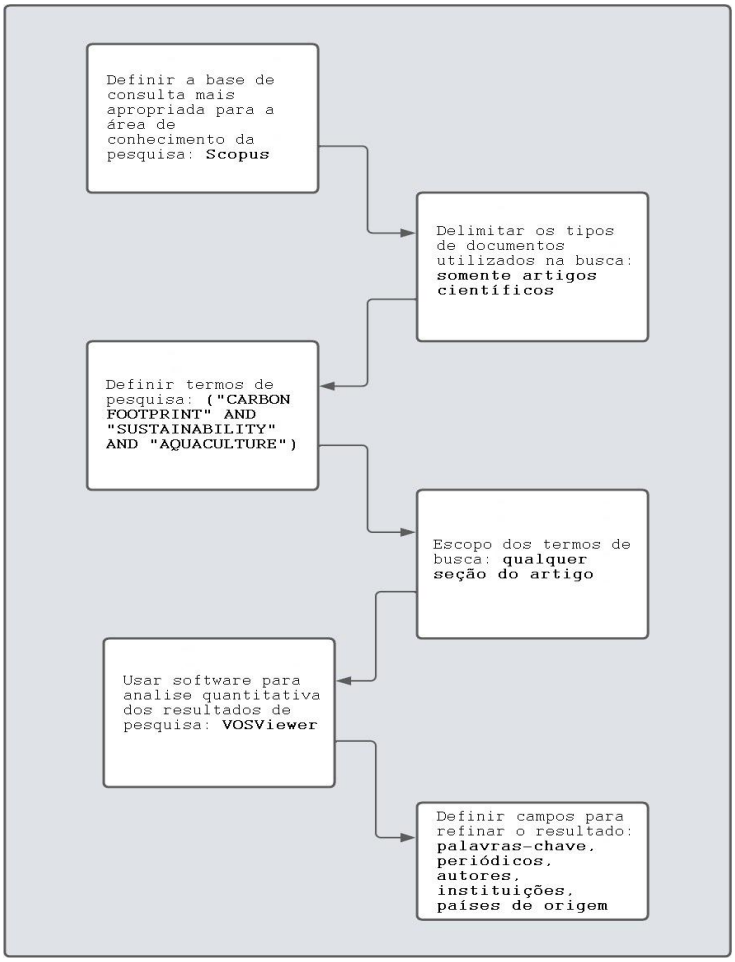
A pesquisa realizada pode ser classificada como descritiva quanto ao seu objetivo. Nesse tipo de pesquisa, o pesquisador analisa e correlaciona fatos ou fenômenos, buscando a enumeração e ordenação de dados ou o estabelecimento de relações entre variáveis, sem sua interferência (Barros & Lehfeld, 2007; Gil, 2020). A abordagem da pesquisa é quantitativa, realizada através de um estudo bibliométrico, técnica que busca analisar uma extensa base de pesquisas publicadas, utilizando ferramentas estatísticas, a fim de obter indicadores sobre autores, periódicos, ano e país de publicação, entre outros, com o intuito de observar tendências a respeito de um determinado tema de pesquisa (Gil, 2020; Paul & Criado, 2020).

Por meio de softwares visualizadores, também é possível realizar uma revisão bibliométrica gráfica, criando alguns comparativos que auxiliam na análise (Paul & Criado,

2020). Um desses softwares é o VoSViewer, *Visualizing of Similarities*, software gratuito disponível na internet (Van Eck & Waltman, 2010, 2014). O VoSViewer foi utilizado neste trabalho para confirmar e analisar algumas métricas da pesquisa.

A Figura 1 esquematiza a metodologia utilizada no estudo e resume as ações da pesquisa bibliométrica.

Figura 1. Diagrama do estudo bibliométrico realizado.



Fonte: elaborado pelos autores, 2022.

A coleta de dados foi realizada no segundo semestre de 2021 por meio de uma busca na Scopus, uma extensa base de dados de publicações revisadas por pares que possui ferramentas bibliométricas para monitorar, analisar e visualizar o objeto de investigação. A premissa da pesquisa foi investigar publicações, especificamente artigos científicos, que apresentassem pesquisas relacionadas ao tema Pegada de Carbono associado ao tema Sustentabilidade. Estes temas deveriam ainda estar relacionados com a aquicultura. Para identificar plenamente a amplitude dos artigos publicados, determinou-se que os termos de busca estivessem presentes em qualquer campo do artigo, não delimitando o ano de publicação. Assim, a expressão de

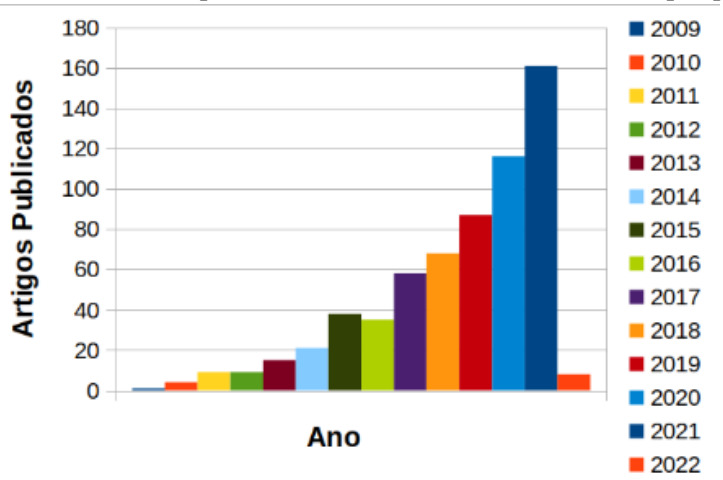
busca utilizada foi ("*CARBON FOOTPRINT*" *AND* "*SUSTAINABILITY*" *AND* "*AQUACULTURE*"). As categorias elencadas para identificação no resultado foram: número de produções anuais, áreas de conhecimento mais aderentes aos artigos, palavras-chave mais utilizadas, periódicos em que os artigos foram publicados, países de origem dos estudos e instituições que os autores representam.

Na segunda fase da pesquisa, foi aplicado um novo filtro à pesquisa através da expressão de busca ("*CARBON FOOTPRINT*" *AND* "*SUSTAINABILITY OF AQUACULTURE*"), com o objetivo de mapear estudos e autores que avançaram significativamente na investigação do tema específico, dedicando-se mais diretamente ao estudo e implementação de aspectos de sustentabilidade na produção aquícola, no que diz respeito à Pegada de Carbono.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro artigo encontrado na base de dados Scopus foi publicado em 2009, sendo o único daquele ano. Nesse artigo, os autores propuseram uma metodologia para rastrear o impacto ecológico do fornecimento, produção e distribuição de cada produto, a fim de contabilizar os impactos ecológicos em vez dos custos financeiros (Limnios *et al*., 2009). A pesquisa foi realizada no final de 2021 e desde então, a pesquisa apresenta publicações em todos os anos, incluindo artigos já aceitos para publicação, em edições de revistas científicas para o ano de 2022. Somando as publicações de todos esses anos, chega-se a um total de 631 artigos. O Histograma baseado nos resultados da investigação é apresentado na Figura 2, onde se pode observar a ascensão do tema, desde a primeira observação em 2009 até 2021.

Figura 2. Aumento das publicações com os termos utilizados na pesquisa.



Fonte: elaborado pelos autores, 2022.

Em relação às áreas de pesquisa dos artigos, as cinco mais abordadas foram Ciências Ambientais, Ciências Agrárias, Energia, Engenharia e Ciências Sociais, sendo que também encontramos publicações em 21 outras áreas. As dez palavras-chave incluídas pelos autores que apresentaram maior número de ocorrências foram, por ordem de número de eventos: avaliação do ciclo de vida; pegada de carbono; aquicultura; frutos do mar; sustentabilidade; pesca; pegada hídrica; mudanças climáticas; impacto ambiental e emissão de gases de efeito estufa.

Em relação aos cinco periódicos que tiveram o maior número de publicações na pesquisa, consolidamos as informações na Tabela 1. Em que se destaca o *Journal of Cleaner Production*, com 82 artigos e fator de impacto maior que 9.

Tabela 1. Revistas com maior número de publicações sobre Pegada de Carbono e Sustentabilidade na Aquicultura.

Revista	Nº de artigos	% do total de artigos	Fator de impacto	Descrição
Journal of Cleaner Production	82	13,0	9,297	(1)
Science of the Total Environment	41	6,5	7,963	(2)
Journal Sustainability	39	6,2	3,251	(3)
International Journal of Life Cycle Assessment	30	4,8	4,141	(4)
Journal of Environmental Management	17	2,7	6,789	(5)

(1) foco em pesquisas e práticas de Produção Limpa, Meio Ambiente e Sustentabilidade.
(2) publicação de pesquisas inovadoras, baseadas em hipóteses sobre o meio ambiente, que interagem com a atmosfera, litosfera, hidrosfera, biosfera e antroposfera.
(3) periódico sobre sustentabilidade ambiental, cultural, econômica e social do ser humano, proporcionando um fórum avançado para estudos relacionados à sustentabilidade.
(4) dedicada à Avaliação do Ciclo de Vida, instrumento para avaliar os impactos ecológicos das etapas de um sistema produtivo.
(5) publica pesquisas originais relacionadas à gestão de sistemas ambientais e à melhoria da qualidade ambiental.
Fonte: elaborada pelos autores, 2022.

Como indicativo dos cinco países que mais apresentaram pesquisadores entre os artigos publicados estão os Estados Unidos (10,2%), Espanha (7,6%), China (6,2%), Itália e Grã-Bretanha (5,4% ambos). Pesquisadores brasileiros contribuíram com a autoria de 24 publicações, 2,1% do total. Além disso, as cinco instituições de pesquisa que mais se destacaram em termos de número de publicações foram: Universidade de Santiago de Compostela (Compostela-Espanha, 43 artigos), Universidade da Tasmânia (Hobart-Austrália, 17 artigos), Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia (Trondheim - Noruega, 16 artigos), Instituto de Estudos Marinhos e Antárticos (Hobart-Austrália, 16 artigos) e Universidade de Wageningen (Wageningen-Holanda, 15 artigos). Em relação às cinco instituições de pesquisa brasileiras presentes no estudo, citamos a Universidade de São Paulo

(5 artigos), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa (4 artigos), Universidade Federal de Santa Catarina (3 artigos), Universidade Federal do Ceará (3 artigos) e Universidade Federal do Espírito Santo (3 artigos).

Este primeiro estudo atingiu o objetivo de apresentar quantitativamente o número total de pesquisas relacionadas com a Pegada de Carbono na Aquicultura como um todo. Observou-se, a partir das palavras-chave, que a maioria dos trabalhos focava a avaliação do ciclo de vida de diferentes produções aquícolas, na tentativa de compreender a emissão de carbono equivalente de cada uma delas. A análise mostrou que a maioria dos estudos realizados foi nas áreas de maricultura e criação de camarões, que têm sido as mais estudadas na Europa e Austrália.

Na segunda fase, aplicando os termos mais específicos sobre Pegada de Carbono e Sustentabilidade na Aquicultura, esse filtro restringiu o resultado a 15 artigos encontrados na base de dados Scopus. Utilizando o software VoSViewer para analisar e identificar a relação entre esses trabalhos, chegamos a dois grupos de pesquisadores que mais diretamente têm cooperado na pesquisa em Sustentabilidade da Aquicultura. Esses grupos estão conectados pelo grupo do pesquisador brasileiro Wagner Cotroni Valenti, doutor do Centro de Aquicultura da UNESP de Jaboticabal (CAUNESP). A Tabela 2 apresenta os estudos mais citados pela comunidade científica no que diz respeito à sustentabilidade da aquicultura.

Tabela 2. Artigos do estudo com maior número de citações.

Artigos	Autores	Periódicos	Citações
Indicators of sustainability to assess aquaculture systems	Valenti, Wagner Cotroni *et al*. (2018)	Ecological Indicators	82
Comparative life cycle assessment (LCA) of raising rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) in different production systems	Samuel-Fitwi, Biniam *et al*. (2013)	Aquacultural Engineering	47
Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges	Boyd, Claude E. *et al*. (2020)	Journal of the World Aquaculture Society	37
Environmental assessment of seabass (Dicentrarchus labrax) and seabream (Sparus aurata) farming from a life cycle perspective: A case study of a Tunisian aquaculture farm	Abdou, Khaled *et al*. (2017)	Aquaculture	35
Environmental sustainability assessment of a microalgae raceway pond treating aquaculture wastewater: From upscaling to system integration	Sfez, Sophie *et al*. (2015)	Bioresource Technology	29

Fonte: elaborada pelos autores.

Dentre os selecionados nesta busca, o artigo *Indicators of sustainability to assess aquaculture systems* de Valenti *et al*. (2018) recebe o destaque de citações, e propõe um conjunto de indicadores para medir a sustentabilidade da produção aquícola.

4. CONCLUSÃO

O estudo mostrou que os temas utilizados na análise bibliométrica proposta por este trabalho têm despertado o interesse progressivo dos pesquisadores no objeto da pesquisa. Quando se trata especificamente da área da piscicultura, observamos que os estudos são reduzidos em comparação com outras culturas, abrindo potenciais oportunidades de investigação.

A literatura científica têm se concentrado na avaliação da Pegada de Carbono a nível sistêmico através da ACV, priorizando uma abordagem macro das atividades produtivas. A crescente importância de se abordar a sustentabilidade das cadeias produtivas e o número ainda limitado de estudos sobre o potencial de sequestro de carbono ligado à aquicultura, mais especificamente à piscicultura, revelam uma lacuna na literatura científica e demonstram que pesquisas relacionadas ao estudo de soluções para se buscar uma neutralidade das emissões de CO_2 são promissoras e necessárias para o avanço do tema, incluindo iniciativas de monitoramento operacional dos viveiros de produção, para estimação do CO_2 emitido.

Este trabalho atendeu ao objetivo de mapear a produção científica em periódicos internacionais sobre a pegada de carbono e a sustentabilidade da produção aquícola, utilizando a base de dados Scopus.

Sugere-se, na continuidade, replicar o estudo em outras bases de dados, incluindo o repositório de teses e dissertações da CAPES, ampliando a contribuição para a elaboração de referenciais teóricos sobre aquicultura e pegada de carbono.

REFERÊNCIAS

Abdou, K., Aubin, J., Romdhane, M. S., Le Loch, F., & Ben Rais Lasram, F. (2017). Environmental assessment of seabass (*Dicentrarchus labrax*) and seabream (*Sparus aurata*) farming from a life cycle perspective: A case study of a Tunisian aquaculture farm. Aquaculture*, 471*, 204–212.

Allsopp, M., Santillo, D & Dorey, C (2013). Sustentabilidade na Aquacultura: Problemas actuais e soluções sustentáveis. In: A. Chircop, S. Coffen-Smout & A. McConnell (Eds), Ocean Yearbook 27, Patrocinado pelo Instituto Internacional dos Oceanos e pelo Instituto de Direito Ambiental Marinho da Universidade de Dalhousie, Publ. Martinus Nijhoff Publishers.

Barros, A. J. S. & Lehfeld, N. A. S. (2007). Fundamentos de metodologia científica. Ed. Pearson Prentice Hall.

Boyd, C. E., D'Abramo, L. R., Glencross, B. D., Huyben, D. C., Juarez, L. M., Lockwood, G. S., McNevin, A. A., Tacon, A. G. J., Teletchea, F., Tomasso Jr, J. R., Tucker, C. S., & Valenti, W. C. (2020). Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. Journal of the World Aquaculture Society, 51(3), 578–633.

Deutsche Welle Brasil. Desmatamento impulsiona emissões de CO_2 no Brasil em 2020. (2021). https://www.dw.com/pt-br/desmatamento-impulsiona- emiss%C3%B5es- de-co2-no-brasil-em-2020/a-59657521.

Eler, M. N. & Millani, T. J. (2007). Métodos de estudos de sustentabilidade aplicados à aquicultura. Revista Brasileira de Zootecnia. 36. 33-44.

Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. (1995). Código de Conduta para uma Pesca Responsável. Roma, FAO. 41 p.

Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. (2022). The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation. FAO.

Ferreira, C. R. (2011). Pegada de Carbono: a relação entre mudanças climáticas e hábitos insustentáveis. Revista Geográfica de América Central. 2. 1-16 Universidad Nacional Heredia, Costa Rica.

Galindro, B. M., Zanghelini, G. M. & Soares, S. R. (2019). Uso de técnicas de benchmarking para melhorar a comunicação na avaliação do ciclo de vida: uma revisão geral. Journal Of Cleaner Production. 213, 143-57.

Gil, A.C. (2020). Metodologia do ensino superior. (5a ed.), Atlas.

Kimpara, J. M., Zajdband, A. D. & Valenti, W. C. (2012). Métodos para medir a sustentabilidade na aquicultura. Teresina: Embrapa Meio-Norte.

Limnios, E. A. M., Ghadouani, A., Schulizzi, S. G. M. & Mazzarol, T. (2009). Dar a escolha ao consumidor: uma metodologia para o cálculo da pegada ecológica do produto. Ecological Economics.68(10). 2525-2534.

Paul, J.; Criado, A. R. (2020). A arte de escrever resenha de literatura: o que sabemos e o que precisamos saber? International Business Review. 29(4), 101717.

Radu, A. L., Scrieciu, M. A. & Caracota, D. M. (2013). Análise da pegada de carbono: rumo a um modelo de avaliação de projeto para a promoção do desenvolvimento sustentável. Procedia Economics and Finance. 6, 353-63.

Samuel-Fitwi, B., Nagel, F., Meyer, S., Schroeder, J. P., & Schulz, C. (2013). Comparative life cycle assessment (LCA) of raising rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in different production systems. Aquacultural Engineering, 54, 85–92.

Sfez, S., Van Den Hende, S., Taelman, S. E., De Meester, S., & Dewulf, J. (2015). Environmental sustainability assessment of a microalgae raceway pond treating aquaculture wastewater: From up-scaling to system integration. Bioresource Technology, *190*, 321–331.

Soares, S. C. & Signor, A. (2021). Água um bem de todos: interfaces desenvolvimento e sustentabilidade. Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento. 10(9). 1-10.20 jul. 2021.

Nações Unidas (2010). Organização das Nações Unidas. Declaração da "ONU Água" para o Dia Mundial da Água.2010. Nações Unidas (2021). O chefe da ONU saúda a promessa da China e dos EUA de cooperar na ação climática. 2021. https://news.un.org/en/story/2021/11/1105512.

Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Inquérito sobre software: VOSviewer, um programa de computador para mapeamento bibliométrico. Scientometrics, 84(2), 523-538.

Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2014). Visualizando redes bibliométricas. Em Y. Ding, R. Rousseau, & D. Wolfram (Eds.), Measuring scholarly impact: Methods and practice. 285-320. Springer.

Valenti, W. C., Kimpara, J. M., Preto, B. L. & Moraes-Valenti, P. (2018). Indicadores de sustentabilidade para avaliar sistemas de aquicultura. Indicadores Ecológicos. 88, 402-13.

CAPÍTULO 2. TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA PISCICULTURA: UMA ANÁLISE COM ÊNFASE EM INTERNET DAS COISAS

RESUMO

A crescente demanda por práticas produtivas tem impulsionado o uso de Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) na piscicultura, com destaque para a Internet das Coisas (IoT). O presente capítulo tem como objetivo identificar, organizar e analisar estudos internacionais que aplicam Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs), com ênfase na Internet das Coisas (IoT), ao monitoramento e controle da piscicultura. Para isso, foi conduzida uma análise bibliométrica descritiva de abordagem quantitativa, com levantamento realizado nas bases Scopus, Web of Science e Google Scholar. A busca empregou termos relacionados à aquicultura e à IoT, resultando em 133 artigos científicos após triagens e filtragens. Desses, 25 trabalhos foram selecionados para análise aprofundada. Os resultados indicam um crescimento recente e acelerado das publicações entre 2023 e 2024, revelando o avanço da IoT no setor aquícola. As plataformas mais utilizadas incluem os microcontroladores Arduino e ESP, com destaque para sua combinação, devido à complementaridade entre conectividade e capacidade de interface com sensores. Wi-Fi foi a tecnologia de comunicação mais adotada, seguida por redes de sensores sem fio e LoRa. Sensores de temperatura, pH, oxigênio dissolvido e turbidez foram os mais recorrentes, enquanto sensores para gases como amônia e CO_2 ainda são pouco explorados. Além disso, observou-se o uso crescente de Inteligência Artificial (IA), como aprendizado de máquina e lógica fuzzy, para análise e tomada de decisão baseada em dados. Conclui-se que a integração entre IoT e IA — a chamada AIoT — representa uma fronteira promissora para a piscicultura de precisão. No entanto, ainda há desafios importantes, como a padronização de soluções e a viabilidade de adoção por pequenos produtores, especialmente em contextos de baixa complexidade tecnológica.

Palavras-chave: AIoT; Aquicultura de Precisão; Pegada de Carbono; Prototipagem e Automação; Sensores.

CHAPTER 2. INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES IN FISH FARMING: AN ANALYSIS WITH AN EMPHASIS ON THE INTERNET OF THINGS

ABSTRACT

The growing demand for productive practices has driven the use of Information and Communication Technologies (ICTs) in fish farming, with emphasis on the Internet of Things (IoT). This chapter aims to identify, organize, and analyze international studies that apply Information and Communication Technologies (ICTs), with emphasis on the Internet of Things (IoT), to the monitoring and control of fish farming. To this end, a descriptive bibliometric analysis with a quantitative approach was conducted, with a survey carried out in the Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases. The search used terms related to aquaculture and IoT, resulting in 133 scientific articles after screening and filtering. Of these, 25 papers were selected for in-depth analysis. The results indicate recent and accelerated growth in publications between 2023 and 2024, revealing the advancement of IoT in the aquaculture sector. The most widely used platforms include Arduino and ESP microcontrollers, with emphasis on their combination, due to the complementarity between connectivity and sensor interface capability. Wi-Fi was the most widely adopted communication technology, followed by wireless sensor networks and LoRa. Temperature, pH, dissolved oxygen, and turbidity sensors were the most common, while sensors for gases such as ammonia and CO_2 are still underutilized. In addition, there has been a growing use of Artificial Intelligence (AI), such as machine learning and fuzzy logic, for data-driven analysis and decision-making. It is concluded that the integration between IoT and AI — called AIoT — represents a promising frontier for precision fish farming. However, there are still important challenges, such as the standardization of solutions and the feasibility of adoption by small producers, especially in contexts of low technological complexity.

Keywords: AIoT; Precision Aquaculture; Carbon Footprint; Prototyping and Automation; Sensors

1. INTRODUÇÃO

A aquicultura, a prática de cultivar organismos aquáticos, tem se tornado uma alternativa importante para suprir a crescente demanda global por proteína animal e enfrentar os desafios da segurança alimentar. Com a expansão da cadeia produtiva, no entanto, surgem desafios significativos, incluindo a otimização do crescimento dos peixes e a garantia da saúde e bem-estar das populações cultivadas, por meio, por exemplo, da garantia de qualidade da água. As práticas de uma aquicultura mais sustentável buscam minimizar os impactos ambientais, maximizando a produtividade e a lucratividade. Nesse contexto, as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) desempenham um papel valioso na modernização da aquicultura, permitindo a otimização de processos e a evolução contínua das práticas produtivas. Além de serem cada vez mais adotadas no setor, essas tecnologias seguem uma trajetória constante de desenvolvimento, abrangendo diferentes soluções e abordagens inovadoras (Abdullah *et al*., 2024).

Neste cenário de evolução, é importante considerar o conceito de *Precision Aquaculture* ou Aquicultura de Precisão. O termo é oriundo do já consolidado Agricultura de Precisão, área de estudo que ganhou proeminência desde o início do século XXI. Autores como Geoffrey Allan e Gavin Burnell (2009), no livro *New Technologies in Aquaculture: Improving Production Efficiency, Quality and Environmental Management*, abordam a necessidade de tecnologias avançadas para tornar a aquicultura mais eficiente e sustentável. Essas tecnologias seguem o princípio da Aquicultura de Precisão, que tem muito a contribuir com a cadeia produtiva, consistindo em um conjunto de técnicas e equipamentos que permitem economizar tempo, reduzir desperdícios, melhorar a qualidade dos produtos cultivados e aumentar significativamente a produção.

O arcabouço de soluções de TIC desenvolvidas para a aquicultura permite o controle e o monitoramento das variáveis que estão envolvidas no processo produtivo em tempo real, contribuindo para a melhoria da produção, e para realizar os ajustes necessários durante as fases produtivas e de planejamento. No manejo e acompanhamento da produção aquícola, o monitoramento da qualidade da água é uma das práticas mais importantes, pois a manutenção de um ambiente adequado é essencial para o pleno desenvolvimento dos organismos aquáticos.

Os fatores que influenciam a qualidade da água variam conforme a espécie cultivada, exigindo atenção específica para garantir condições ideais. Na criação de peixes em cativeiro, por exemplo, estudos ressaltam a importância de parâmetros como temperatura da água, pH, oxigênio dissolvido (OD) e turbidez, que são determinantes para o desempenho produtivo. Para

cada espécie, esses fatores devem ser mantidos dentro de faixas específicas, garantindo um crescimento saudável e eficiente (Zhang *et al.*, 2024). Contudo, a necessidade de estudar outros aspectos de sustentabilidade e produtividade, aliado à evolução das ferramentas de TIC, permite que a ciência busque ir além do monitoramento da qualidade da água, e possa estar atenta a outros parâmetros ambientais, como é o caso da análise da pegada de carbono da aquicultura como um todo, ou em especial da produção de peixes, a piscicultura.

No contexto das TIC aplicadas à piscicultura, uma das áreas de maior destaque nas pesquisas recentes é a *Internet of Things* ou Internet das Coisas (IoT). Essa abordagem permite a conexão de dispositivos inteligentes de hardware e software, para coletar, processar e transmitir dados em tempo real, otimizando o manejo e a tomada de decisões no cultivo de peixes (Khudoyberdiev *et al*., 2023). Assim como ocorre em outros setores que ainda carecem de soluções automatizadas, especialmente aquelas de baixo custo, a piscicultura apresenta um fértil campo para a experimentação de ideias que venham a se tornar soluções para problemas do dia a dia do processo produtivo, por meio de soluções tecnológicas que sejam de acesso mais fácil para os usuários (Valenti, 2021). A combinação entre conhecimento técnico dos profissionais da aquicultura, rapidez na prototipagem e custos reduzidos possibilita o desenvolvimento de soluções personalizadas para desafios do cotidiano na produção aquícola. Além disso, a flexibilidade proporcionada por essas tecnologias permite a reorganização e aprimoramento contínuo dos projetos, ajustando-os conforme os resultados obtidos pelos pesquisadores nas aplicações práticas (Rejeb; Rejeb; Keogh, 2025).

Um avanço significativo nesse campo foi a criação de plataformas de prototipagem baseadas em placas eletrônicas de baixo custo, equipadas com microcontroladores e desenvolvidas a partir de projetos abertos, tanto em hardware quanto em software. Essas plataformas democratizaram a inovação tecnológica, permitindo que pessoas sem formação específica em engenharia desenvolvam soluções inovadoras para desafios práticos. Antes restritas à especialistas devido ao alto custo das ferramentas e à complexidade técnica, essas iniciativas passaram a ser acessíveis a um público de formação diversa, criando equipes multidisciplinares na criação de soluções e impulsionando o desenvolvimento de dispositivos personalizados. Este movimento também é verificado na pesquisa em piscicultura.

O marco inicial desse processo simplificado de desenvolvimento foi a criação da plataforma Arduino, desenvolvida por professores do Instituto de Design Interativo Ivrea, na Itália, com destaque para Massimo Banzi e seus colaboradores. A proposta do Arduino foi concebida como uma solução acessível para o ensino e desenvolvimento de projetos

eletrônicos, baseada no conceito de código aberto. Esta solução foi desenvolvida com base na ideia de programar elementos da vida real, usando a programação para atuar em dispositivos e equipamentos para gerar utilidades práticas. Banzi (2011) conceituou essa nova abordagem como Computação Física, facilitando o desenvolvimento de dispositivos físicos programáveis e que sejam inteligentes e conectados. Esses avanços se alinharam ao conceito de IoT criado em 1999 por Kevin Ashton. A IoT promove a integração entre o mundo físico e o digital através de sensores e redes, permitindo uma conexão mais facilitada dos dispositivos (Ashton, 2009). Segundo os criadores do Arduino, o objetivo era oferecer uma ferramenta mais simples e acessível para a prototipagem rápida, permitindo criar e testar novas ideias com facilidade (Banzi, 2011). A partir deste sucesso, a indústria apresentou novas alternativas de microcontroladores de baixo ou médio custo, de projetos abertos ou não, como a família ESP, da empresa *Espressif Systems*, que disponibiliza uma série de recursos para desenvolvedores, mas mantém o controle sobre a estrutura do hardware.

Qualquer que seja a plataforma de microcontroladores utilizada, sua funcionalidade amplia-se como ferramenta de IoT com o uso de sensores, dispositivos que detectam mudanças físicas ou ambientais, como temperatura, movimento, luminosidade e outras, e as converte em sinais elétricos que podem ser lidos e processados, com ampla gama de alternativas disponíveis no mercado, e crescente desenvolvimento de novas opções (Abdullah *et al*., 2024). Todo esse movimento de prototipação foi ainda mais fortalecido com a posterior popularização da manufatura aditiva, representada pelas impressoras 3D, que reduziram significativamente os custos de produção física e facilitaram a criação de protótipos funcionais.

Entre as áreas que já se beneficiam destas ferramentas na piscicultura, destacam-se a automatização da alimentação, com sistemas inteligentes que ajustam a ração conforme a demanda dos peixes, reduzindo desperdícios e melhorando a conversão alimentar, o controle de aeração, garantindo níveis adequados de oxigenação na água, essencial para o bem-estar dos organismos cultivados e o monitoramento da qualidade da água, utilizando sensores para medir parâmetros críticos como temperatura, oxigênio dissolvido, pH e turbidez, permitindo ajustes em tempo real para manter um ambiente ideal para o crescimento dos peixes (Prapti *et al*., 2022; Macedo *et al*., 2024). Assim, essas aplicações têm sido exploradas, em que pese muitas vezes ainda distantes de padronização, tendo suas configurações muito ajustadas para um ambiente de pesquisa específico, dificultando sua replicação em outros cenários.

Ademais, outras frentes de pesquisa e desenvolvimento seguem abertas, explorando novas oportunidades para a integração de TICs na piscicultura. Desde o monitoramento de

outras variáveis, como a análise de emissões de gases de efeito estufa associadas à produção, até o uso de IA para manipular estatisticamente de maneira rápida e eficiente as bases de dados capturadas a partir destas atividades de monitoramento, identificando padrões e tendências que seriam muito custosas de caracterizar com a abordagem humana convencional. Inclusive, esta nova fronteira tem sido abrangida pelo conceito que se chamou de AIoT (*Artificial intelligence of Things* ou Inteligência Artificial das Coisas), que visa potencializar os dispositivos conectados, tornando-os mais inteligentes e capazes de realizar coleta, processamento e análise de dados de forma autônoma (Siam *et al*., 2025).

Nesta perspectiva, este capítulo tem como objetivo identificar, organizar e analisar pesquisas internacionais aplicadas que abordam o monitoramento e os componentes de controle na piscicultura com uso de Tecnologias de Informação e Comunicação, com ênfase em Internet das Coisas, a fim de identificar o patamar atual de aplicação das tecnologias e identificar as lacunas existentes. Foi realizado um estudo bibliométrico permitindo uma visão estruturada e quantitativa do estado da arte nessa área.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa caracteriza-se como descritiva e fundamenta-se em uma abordagem quantitativa. Esse tipo de investigação visa observar, registrar e analisar fenômenos sem intervenção do pesquisador, limitando-se à descrição de suas ocorrências e frequência (Lakatos & Marconi, 2017). A metodologia adotada consistiu em uma análise bibliométrica, a qual emprega técnicas estatísticas para quantificar características de um corpo de literatura científica, permitindo identificar padrões de publicação, distribuição temporal e tendências temáticas na produção acadêmica relacionada ao tema (Gil, 2020).

O levantamento inicial de dados foi realizado por meio do Portal da CAPES, nas bases de dados Scopus e Web Of Science, extensas bases de dados de publicações revisadas por pares. Como termo de busca foi utilizando o seguinte conjunto de palavras-chave: ("*fish farm** " *OR* "*ponds*" *OR* "*aquaculture*") *AND* (("*aquaculture monitoring*" *AND* "IoT") *OR* "*precision aquaculture*"). A inclusão do termo "*precision aquaculture*" foi desassociado da palavra IoT nos termos da pesquisa pelo operador *OR* para permitir que outras designações para circuitos eletrônicos e softwares utilizados na piscicultura fossem encontrados. Conduzida em fevereiro de 2025, a pesquisa foi realizada sem delimitação temporal, garantindo que todos os estudos fossem incluídos. A busca inicial resultou em 101 documentos na base Scopus e 39 na Web of Science. Para aumentar a abrangência, decidiu-se ampliar a base de pesquisa para uma

plataforma mais ampla, a Google Scholar, utilizando-se as mesmas premissas. Foram encontrados 785 documentos de diversos tipos, como capítulos de livro, revisões, materiais técnicos, além de artigos.

A primeira filtragem consistiu em considerar apenas artigos científicos, o que reduziu o número de documentos em 52 documentos na base Scopus, 27 na Web of Science e outros 81 na Google Schoolar. Em seguida, procedeu-se a eliminação das duplicatas entre as bases e foi realizada uma filtragem, com a leitura dos títulos e palavras-chave, com o objetivo de eliminar artigos em que o termos pesquisados estivessem fora do escopo principal da pesquisa. Após este crivo, foram 25 os artigos considerados alinhados com os objetivos do estudo e incluídos para uma análise mais detalhada.

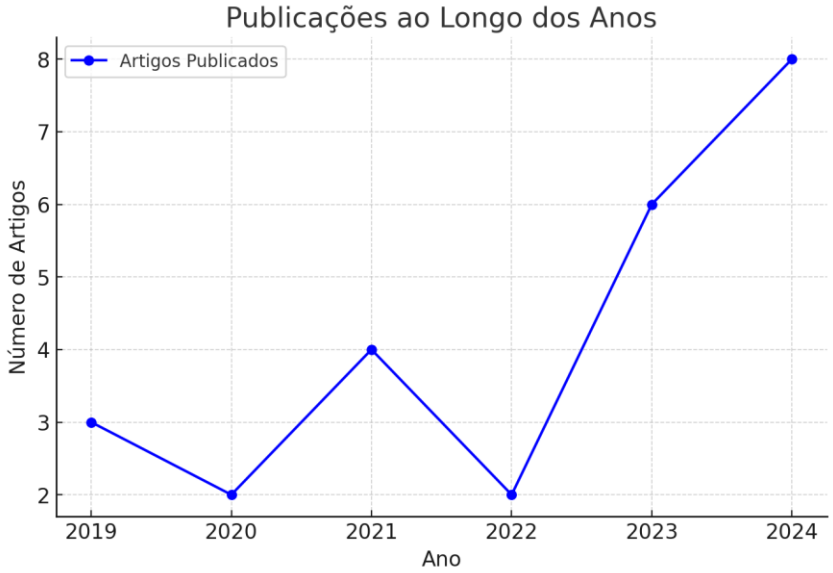
Procedeu-se então uma análise qualitativa a partir da leitura do resumo destes artigos, a fim de identificar os principais cenários de uso de microcontroladores e sensores na piscicultura e verificar o contexto do uso de redes nas soluções. Adicionalmente, procurou-se verificar o uso da inteligência artificial em determinados estudos e classificar qual o modelo de IA foi utilizada nos mesmos e realizar um descritivo desta análise (Clarke & Braun, 2017).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tema IoT é algo relativamente recente. Na piscicultura, apesar da pesquisa apresentar publicações desde 2019, o tema notadamente apresentou uma maior ocorrência de trabalhos publicados nos recentes anos de 2023 e 2024, como podemos ver no gráfico de evolução de publicações (Figura 1). O artigo de Nagothu *et al*. publicado no início de 2025 na *Aquaculture International* foi registrado neste gráfico como 2024, com o objetivo de uniformizar os dados e possibilitar a comparação da evolução ao longo dos anos completos, haja vista que ele foi escrito, submetido e aceito no próprio ano de 2024.

A variedade de áreas de publicação de trabalhos correlatos de IoT na piscicultura é vasta, pois gera interesse tanto nas áreas de aplicação, com publicação por exemplo na revista *Aquaculture International*, da editora Springer, como em revistas das áreas de TIC. Assim, o periódico com maior número destas publicações, com cinco artigos incluídos no resultado da pesquisa, foi a *Sensors* (ISSN 1424-8220), uma publicação da editora *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*.

Figura 1. Evolução das publicações de IoT na piscicultura observadas no estudo.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

No que se refere aos aspectos técnicos de IoT, uma das variáveis de interesse era verificar a utilização dos diversos tipos de microcontroladores nas pesquisas aplicadas realizadas. Relacionamos na Tabela 1 as plataformas microcontroladas verificadas nos trabalhos publicados.

Tabela 1. Plataformas IoT utilizadas nas pesquisas do estudo.

Plataforma	Quantidade
Arduino	05
ESP8266	05
Arduino & ESP8266	04
ESP32	03
Arduino & ESP32	01
STM32 L476RG	01
BeagleBone	01
PIC 16f877a	01
Circuito proprietário ou não listado	04

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Observa-se um equilíbrio entre o uso do Arduino e plataformas ESP, com maior uso desta última, haja vista que houve ocorrência tanto do ESP8266 como do ESP32, uma evolução desta plataforma. Porém, é interessante notar que em algumas pesquisas também são utilizados o Arduino em conjunto com uma das versões do ESP. Isso ocorreu predominantemente para que os pesquisadores pudessem aproveitar o melhor de cada plataforma, considerando que o Arduino normalmente possui mais portas e mais facilidade de conexão física com sensores e atuadores, enquanto a família ESP possui maior disponibilidade de conectividade com redes, facilitando a comunicação com outros dispositivos.

Os trabalhos que fazem uso apenas do Arduino necessitam de dispositivos adicionais específicos para conectividade e os que só usam ESP precisam se adequar à possíveis limitações físicas de conexão com sensores. Porém, o uso combinado de ambas apresenta a desvantagem de um potencial custo maior de aquisição, maior probabilidade de falhas técnicas pela duplicação de componentes, e maior complexidade de projeto. Nota-se que na busca efetuada não surgiu como resultado algum trabalho que faça uso de alguma das versões do Raspberry PI, equipamento conhecido da comunidade acadêmica e algumas vezes utilizado em soluções similares de IoT.

O Raspberry não é caracterizado como um microcontrolador, ele é um computador compacto, de placa única, por isso, seu poder de processamento é superior, porém seu custo também é maior. Este fator provavelmente limitou o seu uso em soluções equivalentes na fase de pesquisa inicial. Contudo, a pesquisa identificou um trabalho que utilizou uma placa da empresa ST Microeletronics, equipamento com um processador superior, da família ARM, mesma família utilizada nos Raspberry. Ainda assim, esta placa é mais cara que as soluções Arduino ou ESP, o que denota que o melhor custo benefício se encontra em placas ESP com uma maior quantidade de conexões físicas e bom poder de processamento, aliado à sua facilidade de interconexão.

Da mesma forma, a busca realizada também não retornou trabalhos que utilizem CLP (Controladores Lógicos Programáveis), dispositivos amplamente consolidados em automação industrial, mas com presença limitada em soluções acadêmicas de IoT para aquicultura. Assim como o Raspberry PI, os CLP possuem características distintas: são equipamentos robustos, projetados para controle de processos em tempo real, com alta confiabilidade em ambientes adversos (Petruzella, 2017). No entanto, diferentemente do Raspberry, que é um computador de placa única versátil, os CLP são sistemas especializados, com arquitetura fechada e custo elevado, especialmente em configurações que demandam módulos adicionais para comunicação em rede ou sensoriamento avançado.

Essas particularidades, somadas à complexidade de programação, baseada em linguagens específicas como Ladder, e à menor flexibilidade para integração com tecnologias abertas de IoT, podem explicar a ausência de CLP nos estudos iniciais. Nestes estudos, plataformas de prototipagem rápida, como o próprio Raspberry, ou soluções com microcontroladores como Arduino ou ESP, são preferenciais e classificadas como de baixo custo.

Um aspecto a ser considerado nos trabalhos é o método utilizado para tratar a comunicação entre os dispositivos, visando a recuperação dos dados coletados pelos sensores. A Tabela 2 apresenta as tecnologias empregadas para essa finalidade. Alguns trabalhos propuseram mais de um tipo de conexão, de forma a existir alternativa, e estas situações também estão representadas nesta tabela.

Tabela 2. Plataformas de comunicação mais utilizadas nas pesquisas.

Tecnologia de transmissão	Quantidade
WiFi	14
WSN (rede de sensores)	03
Ethernet	03
Lora	01
Bluetooth	01
RS-232	01
WiFi / Lora / GPRS	01
Lora / GPRS	01

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

No que se refere às camadas de software envolvidas nos trabalhos oriundos da pesquisa, além do software embarcado responsável pelo funcionamento do microcontrolador e sensores, alguns possuem maior ou menor influência do desenvolvimento de algum software de alto nível. Foram 11 trabalhos que apresentaram desenvolvimento de uma interface para observação das leituras efetivadas pelos dispositivos IoT. Outros 9 trabalhos incluíram uma camada de manipulação dos dados por meio de alguma técnica de IA, sendo 5 de Aprendizagem de Máquina (ML), 2 de Lógica Fuzzy (FL), 1 de Visão Computacional e mais 1 de Aprendizado por Reforço Profundo (DRL), mostrando que o uso adicional de IA a partir da captura de dados realizados pelos componentes de IoT é crescente. Apesar desta tendência, apenas um dos trabalhos, Lan *et al*. (2023), fez menção a já utilizar o conceito de AIoT.

A possibilidade de permitir a interação com o ambiente, característica fundamental da computação física, passa em grande medida pelo trabalho de sensoriamento. Existe uma gama de sensores eletrônicos disponíveis no mercado de interesse para a piscicultura. Nos trabalhos oriundos de nossa pesquisa, alguns sensores têm mais prevalência do que outros, orientados tanto pelo objetivo dos trabalhos, como pela disponibilidade e maturidade dos sensores, bem como pelo custo dos mesmos. A Tabela 3 mostra o panorama de uso destes sensores nos respectivos artigos da pesquisa.

Três trabalhos não foram listados nesta tabela porque não apresentaram sensores utilizados, pois o foco do seu estudo foi o componente de comunicação de rede da proposta,

tópico abordado anteriormente. O resultado mostra a maior utilização de sensores que já estão no mercado há algum tempo, principalmente o de temperatura d'água, pH e oxigênio dissolvido.

Tabela 3. Sensores mais utilizados nas pesquisas.

Id	Publicação	Temp. °c	PH	OD	Turbidez	Outros
01	Janpla; Tachpetpaiboon; Jewpanich, 2019	●				•
02	Ramya; Rohini; Ravi, 2019	●	●	●		
03	Gao; Xiao; Chen, 2019	●	●	●	●	●
04	Bórquez López *et al*., 2020	●	●	●		
05	Arteaga-Quico; Wong-Portillo, 2021	●				
06	Tamim *et al*., 2021	●	●	●		
07	Islam; Kashem; Uddin, 2022	●	●		●	●
08	Medina *et al*., 2022	●	●	●		
09	Sung; Tofik Isa; Hsiao, 2023	●	●		●	
10	Kumar *et al*., 2023	●	●		●	
11	Sung; Isa; Hsiao, 2023	●	●		●	
12	Lan *et al*., 2023			●		●
13	Al-Mutairi; Al-Aubidy, 2023	●	●	●	●	●
14	Islam, 2023	●	●		●	
15	Hemal *et al*., 2024	●	●		●	
16	Kanwal *et al*., 2024	●	●		●	
17	Yatin; Maneechukate; Jaisin, 2024			●	●	
18	Wibisono; Jayadi, 2024	●	●	●		
19	Mohd Jais *et al*., 2024	●	●	●		●
20	Nayoun *et al*., 2024	●	●	●	●	
21	Abdikadir *et al*., 2024	●	●	●		
22	Nagothu *et al*., 2025	●	●	●		●
	Total	**20**	**18**	**13**	**11**	**07**

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Em sete trabalhos, foram empregados outros diferentes tipos de sensores, como os de sólidos dissolvidos (TDS), salinidade, profundidade, nível d'água, condutividade e ultrassônico. Quanto à amônia, embora quatro estudos tenham considerado esse parâmetro em suas análises, apenas um utilizou sensores específicos para medição em tempo real, tendo sido também o único trabalho que usou algum sensor de análise de gases. Os demais empregaram

kits de teste manuais para a amônia ou a incluíram em modelos teóricos de detecção, sem monitoramento contínuo. Vale destacar que existem sensores disponíveis no mercado que ainda não são aplicados na piscicultura, mas poderiam ser integrados a sistemas de IoT para avaliação de sua eficiência e viabilidade em campo. Um exemplo é a nossa proposta de incorporar sensores de CO_2 ao monitoramento em tempo real.

4. CONCLUSÃO

As TIC são ferramentas importantes para a modernização da aquicultura, promovendo práticas mais sustentáveis e eficientes. Plataformas de prototipagem de baixo custo, como Arduino e ESP, tornaram mais acessível o acesso à tecnologia, possibilitando o desenvolvimento de soluções personalizadas para desafios específicos da aquicultura. Aliado a isso, a integração de IA com IoT tende a ampliar as possibilidades de análise e tomada de decisão, permitindo a identificação de padrões e tendências que seriam difíceis de detectar manualmente. A pesquisa bibliométrica realizada identificou um crescimento significativo no número de publicações sobre IoT para o monitoramento da piscicultura. A comunicação entre dispositivos predominantemente é realizada por meio de WiFi, mas também são exploradas outras tecnologias, como redes de sensores sem fio (WSN) e LoRa.

A aplicação de técnicas de IA, como aprendizado de máquina e lógica Fuzzy, tem crescido, abrindo espaço para desenvolvimento de soluções baseadas em dados. Sensores para medição de temperatura, pH, OD e turbidez são os mais utilizados, embora haja potencial para incorporação ou desenvolvimento de outros sensores. Identificou-se uma ausência sistemática de sensores de gases, como os de amônia e CO_2, sendo que nenhum trabalho explorou diretamente a emissão de dióxido de carbono como variável ambiental monitorada. Assim, a integração de TIC, especialmente IoT e IA na piscicultura representa um avanço promissor para a otimização da produção aquícola. Essas tecnologias permitem maior controle sobre as variáveis ambientais, redução de custos e aumento da produtividade, contribuindo para a sustentabilidade do setor. No entanto, é necessário superar desafios como a padronização das soluções e a criação mecanismos que facilitem a implantação e uso nos pequenos produtores.

REFERÊNCIAS

Abdikadir, Nuradin Mohamed; Abdullah, Ahmad Shahidan; Abdullahi, Husein Osman; HASSAN, Abdikarim Abi (2024). Smart Aquaculture: IoT-Enabled Monitoring and Management of Water Quality for Mahseer Fish Farming. International Journal of Electrical and Electronics Engineering, v. 11, n. 11, p. 84-92.

Abdullah, A. F., Man, H. C., Mohammed, A., Karim, M. M. A., Yunusa, S. U., & Jais, N. A. B. M. (2024). Charting the aquaculture internet of things impact: key applications, challenges, and future trend. Aquaculture Reports, 39.

Al-Mutairi, Abdallah Waddah; Al-Aubidy, Kasim Mousa (2023). IoT-based smart monitoring and management system for fish farming. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, v. 12, n. 3, p. 1435-1446.

Allan, Geoffrey; Burnell, Gavin (2009). New technologies in aquaculture: improving production efficiency, quality and environmental management. Cambridge: Woodhead Publishing. 923 p.

Arteaga-Quico, Alisson Diane; Wong-Portillo, Lenis Rossi (2021). Framework para o monitoramento de temperatura de cultivos aquícolas baseado em IoT. Revista DYNA, v. 88, n. 218, p. 239-246.

Ashton, Kevin (2009). That 'Internet of Things' Thing. RFID Journal, Hauppauge.

Banzi, Massimo (2011). Primeiros passos com Arduino. Tradução de Rafael Zanolli. São Paulo: Novatec Editora. 128 p.

Bórquez López, Rafael Apolinar; Martinez Cordova, Luis Rafael; Gil Nuñez, Juan Carlos; Gonzalez Galaviz, Jose Reyes; Ibarra Gamez, Jose Cuauhtemoc; Casillas Hernandez, Ramon (2020). Implementation and Evaluation of Open-Source Hardware to Monitor Water Quality in Precision Aquaculture. Sensors, v. 20, n. 6112, p. 1-15.

Clarke, V.; Braun, V. (2017). Thematic analysis. The Journal of Positive Psychology, v. 12, n. 3, p. 297-298.

Gao, Guandong; Xiao, Ke; Chen, Miaomiao (2019). An intelligent IoT-based control and traceability system to forecast and maintain water quality in freshwater fish farms. Computers and Electronics in Agriculture, v. 166.

Gil, A.C. (2020). Metodologia do ensino superior. (5a ed.), Atlas.

Hemal, Md. Moniruzzaman; Rahman, Atiqur; Nurjahan; Islam, Farhana; Ahmed, Samsuddin; Kaiser, M. Shamim; Ahmed, Muhammad Raisuddin (2024). An integrated smart pond water quality monitoring and fish farming recommendation aquabot system. Sensors, v. 24, n. 3682, p. 1-22.

Islam, Md. Monirul; Kashem, Mohammod Abul; Uddin, Jia (2022). An internet of things framework for real-time aquatic environment monitoring using an Arduino and sensors. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), v. 12, n. 1, p. 826-833.

Islam, Md. Monirul (2023). Real-time dataset of pond water for fish farming using IoT devices. Data In Brief, [S.L.], v. 51, p. 109761.

Janpla, Satien; Tachpetpaiboon, Nisanart; Jewpanich, Chaiwat (2019). Development of Automatic Home-Based Fish Farming Using the Internet of Things. International Journal of Recent Technology and Engineering, v. 8, n. 2, p. 3308-3315.

Kanwal, Saima; Abdullah, Muhammad; Kumar, Sahil; Arshad, Saqib; Shahroz, Muhammad; Zhang, Dawei; Kumar, Dileep (2024). An optimal Internet of Things-driven intelligent decision-making system for real-time fishpond water quality monitoring and species survival. Sensors, v. 24, n. 7842, p. 1-16.

Khudoyberdiev, A., Jaleel, M. A., Ullah, I., & Kim, D. (2023). Enhanced water quality control based on predictive optimization for smart fish farming. Computers, Materials and Continua, 75(3), 5471–5499.

Kumar, P. Vijay; Varma M., K. P. Siddhardha; Kumar, Sathish; Ravikumar, C. V.; Ashish, P. (2023). Aquaculture monitoring system using machine learning. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, [s.l.], v. 18, n. 14, p. 1700-1706.

Lakatos, E. M., & Marconi, M. A. (2017). Fundamentos de metodologia científica (7ª ed.). São Paulo, SP: Atlas.

Lan, Hsun-Yu; Ubina, Naomi A.; Cheng, Shyi-Chyi; Lin, Shih-Syun; Huang, Cheng-Ting (2023). Digital Twin Architecture Evaluation for Intelligent Fish Farm Management Using Modified Analytic Hierarchy Process. Applied Sciences, v. 13, n. 141, p. 1-19.

Macedo, H. R., Luiz Junior, O. J., Werneck, P. R., & Feiden, A. (2024). Carbon footprint and automation in aquaculture. Revista de Gestão Social e Ambiental, 18(11), 1-15.

Medina, Juan D.; Arias, Alejandro; Triana, Juan M.; Giraldo, Luis F.; Segura-Quijano, Fredy; Gonzalez-Mancera, Andres (2022). Open-source low-cost design of a buoy for remote water quality monitoring in fish farming. PLOS ONE, v. 17, n. 6, e0270202.

Mohd Jais, Nurshahida Azreen; Abdullah, Ahmad Fikri; Mohd Kassim, Muhamad Saufi; Abd Karim, Murni Marlina; M, Abdulsalam; Muhadi, Nur'Atirah (2024). Improved accuracy in IoT-Based water quality monitoring for aquaculture tanks using low-cost sensors: Asian seabass fish farming. Heliyon, v. 10, e29022.

Nagothu, Sudheer Kumar; Sri, Pudota Bindu; Anitha, G.; Vincent, Shweta; Kumar (2025), Om Prakash. Advancing aquaculture: fuzzy logic-based water quality monitoring and maintenance system for precision aquaculture. Aquaculture International, v. 33, p. 32.

Nayoun, Md. Naymul Islam; Hossain, Syed Akhter; Rezaul, Karim Mohammed; Siddiquee, Kazy Noor E Alam; Islam, Md. Shabiul; Jannat, Tajnuva (2024). Internet of Things-Driven Precision in Fish Farming: a deep dive into automated temperature, oxygen, and ph regulation. Computers, [S.L.], v. 13, n. 10, p. 267.

Petruzella, F. D. (2017). Programmable Logic Controllers (5th ed.). McGraw-Hill.

Prapti, D. R., Mohamed Shariff, A. R., Che Man, H., Ramli, N. M., Perumal, T., & Shariff, M. (2022). Internet of Things (IoT)-based aquaculture: an overview of IoT application on water quality monitoring. Reviews in Aquaculture, 14(2), 979–992.

Ramya, A.; Rohini, R.; Ravi, S. (2019). IoT based smart monitoring system for fish farming. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), v. 8, n. 6S, p. 421-424.

Rejeb, Abderahman; Rejeb, Karim; Keogh, John G. (2025). The nexus of IoT and aquaculture: a bibliometric analysis. Applied Food Research, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 100838. Elsevier BV.

Siam, Shakhrul Iman; Ahn, Hyunho; Liu, Li; Alam, Samiul; Shen, Hui; Cao, Zhichao; Shroff, Ness; Krishnamachari, Bhaskar; Srivastava, Mani; Zhang, Mi (2025). Artificial Intelligence of Things: a survey. Acm Transactions On Sensor Networks, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 1-75.

Sung, Wen-Tsai; Tofik Isa, Indra Griha; Hsiao, Sung-Jung (2023). An IoT-Based Aquaculture Monitoring System Using Firebase. *Computers, Materials & Continua*, [s.l.], v. 76, n. 2, p. 2179-2201.

Sung, W.-T.; Isa, I. G. T.; Hsiao, S.-J (2023). Designing Aquaculture Monitoring System Based on Data Fusion through Deep Reinforcement Learning (DRL). Electronics, v. 12, n. 2032.

Tamim, Abu Taher; Begum, Halima; Shachcho, Sumaiya Ashfaque; Khan, Mohammad Monirujjaman; Yeboah-Akowuah, Bright; Masud, Mehedi; Al-Amri, Jehad F. (2022). Development of IoT Based Fish Monitoring System for Aquaculture. Intelligent Automation & Soft Computing, v. 32, n. 1, p. 55-71.

Valenti, Wagner C.; Barros, Helenice P.; Moraes-Valenti, Patricia; Bueno, Guilherme W.; Cavalli, Ronaldo O. (2021). Aquaculture in Brazil: past, present and future. Aquaculture Reports, [S.L.], v. 19, p. 100611. Elsevier BV.

Wibisono, Adani Bimasakti; Jayadi, Riyanto (2024). Experimental IoT System to Maintain Water Quality in Catfish Pond. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, v. 15, n. 3, p. 393-399.

Yatin, Kewwalin; Maneechukate, Thongchai; Jaisin, Chawaroj (2024). Development of a Dissolved Oxygen (DO) and Electrical Energy Monitoring System for an Aquaculture Pond by Using NB-IoT Technology. Suranaree Journal of Social Science, v. 18, n. 2, p. e249589.

Zhang, Kaisheng; Ye, Zhangying; Qi, Ming; Cai, Wenlong; Saraiva, João L.; Wen, Yanci; Liu, Gang; Zhu, Ze; Zhu, Songming; Zhao, Jian (2024). Water Quality Impact on Fish Behavior: a review from an aquaculture perspective. Reviews In Aquaculture, v. 17, n. 1, p. 1-27.

CAPÍTULO 3. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE PLATAFORMA MULTIPARAMÉTRICA ABERTA PARA MONITORAMENTO DE QUALIDADE DA ÁGUA E ESTIMATIVA DE CO_2 NA PISCICULTURA

RESUMO

O presente capítulo descreve o desenvolvimento, a implementação e a validação de uma plataforma multiparamétrica aberta, denominada Pegad@, projetada para o monitoramento contínuo da qualidade da água e a estimativa de dióxido de carbono (CO_2) em viveiros escavados de piscicultura. Diante da escassez de soluções tecnológicas voltadas ao controle de parâmetros ambientais associados à pegada de carbono na aquicultura, esta iniciativa busca integrar sensores de baixo custo, microcontroladores com conectividade em rede e infraestrutura de computação em nuvem, com vistas a viabilizar uma ferramenta replicável, acessível e alinhada aos princípios da Aquicultura 4.0. A metodologia adotada incluiu a montagem de uma estufa experimental e a condução de ensaios comparativos entre sensores comerciais e os módulos utilizados no protótipo Pegad@. Foram monitoradas variáveis como temperatura da água, oxigênio dissolvido e concentração de CO_2, em diferentes condições de temperatura. Os dados foram coletados, transmitidos e armazenados em tempo real, permitindo sua visualização remota por meio de interface web. A arquitetura do sistema foi concebida com foco em modularidade, favorecendo sua evolução futura com a incorporação de inteligência artificial para análise preditiva. Os resultados demonstraram que o sistema é funcional e apresenta desempenho satisfatório em relação à estabilidade dos dados e à consistência das medições, com destaque para a viabilidade do monitoramento de CO_2. Conclui-se que a plataforma Pegad@ representa uma contribuição relevante para o monitoramento automatizado de sistemas aquícolas, promovendo práticas mais sustentáveis, integradas e baseadas em dados.

Palavras-chave: Concentração de CO_2; Dióxido de carbono; Internet das Coisas (IoT); Monitoramento ambiental; Qualidade da água.

CHAPTER 3. DEVELOPMENT AND VALIDATION OF AN OPEN MULTIPARAMETRIC PLATFORM FOR WATER QUALITY MONITORING AND CO_2 ESTIMATION IN FISH FARMING

ABSTRACT

This chapter describes the development, implementation and validation of an open multi-parametric platform called Pegad@, designed for continuous monitoring of water quality and estimation of carbon dioxide (CO_2) in excavated fishponds. Given the scarcity of technological solutions aimed at controlling environmental parameters associated with the carbon footprint in aquaculture, this initiative seeks to integrate low-cost sensors, microcontrollers with network connectivity and cloud computing infrastructure, with a view to enabling a replicable, accessible tool that is aligned with the principles of Aquaculture 4.0. The methodology adopted included setting up an experimental greenhouse and conducting comparative tests between commercial sensors and the modules used in the Pegad@ prototype. Variables such as water temperature, dissolved oxygen and CO_2 concentration were monitored under different temperature conditions. The data was collected, transmitted and stored in real time, allowing it to be viewed remotely via a web interface. The system's architecture was designed with a focus on modularity, favoring its future evolution with the incorporation of artificial intelligence for predictive analysis. The results showed that the system is functional and performs satisfactorily in terms of data stability and measurement consistency, with emphasis on the feasibility of CO_2 monitoring. It is concluded that the Pegad@ platform represents a relevant contribution to the automated monitoring of aquaculture systems, promoting more sustainable, integrated and data-based practices.

Keywords: Carbon dioxide; CO_2 concentration; Environmental monitoring; Internet of Things (IoT); Water quality.

1. INTRODUÇÃO

Na aquicultura, os peixes são organismos bastante sensíveis a fatores ambientais e a diversos poluentes, tornando a produção aquícola vulnerável à deterioração da qualidade da água, sendo importante manter um ambiente que seja saudável para a piscicultura, para a saúde humana e para o meio ambiente (Gao; Guandong; Xiao, 2019). Tradicionalmente, os parâmetros sujeitos a monitoramento, como visto no Capítulo 2, são níveis de pH, oxigênio dissolvido (OD), amônia, turbidez, bem como a temperatura, entre outros. A variação de todos esses parâmetros exige um monitoramento rigoroso para evitar oscilações extremas que possam comprometer a saúde dos peixes (Boyd, 2018). Contudo, alguns parâmetros ainda são pouco analisados em estudos que buscam automatizar o monitoramento dos viveiros. É o caso do dióxido de carbono (CO_2).

1.1. Dinâmica do CO_2 em Ambientes Aquícolas

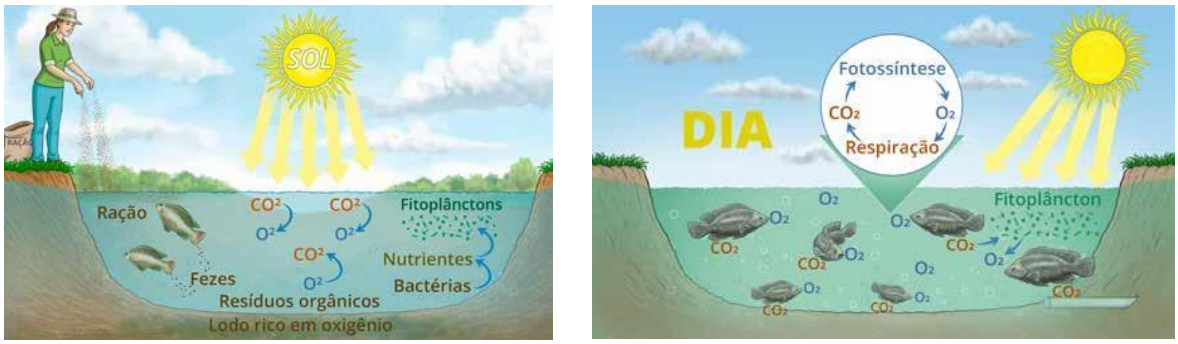
A intensificação do uso de viveiros escavados pode modificar a concentração de CO_2 na água, impactando processos essenciais para a qualidade do ambiente aquático. Esta concentração de CO_2 dissolvido em viveiros escavados representa não apenas uma variável química relevante para a qualidade da água, mas também um indicativo direto das emissões do sistema, o que o torna um parâmetro importante na mensuração da pegada de carbono da aquicultura (Elnady *et al*., 2017).

O CO_2 desempenha um papel fundamental nos ecossistemas aquáticos e, por extensão, nos sistemas de produção de peixes. O CO_2 influencia diretamente o pH da água, sendo um parâmetro crítico para a saúde e desenvolvimento das espécies (Abd El-Hack *et al*., 2022). Quando em altas concentrações na água, o CO_2 pode causar acidificação, reduzindo o pH para níveis potencialmente estressantes para os peixes (Boyd, 2018).

O acúmulo de nutrientes provenientes de resíduos dos peixes (fezes, amônia, CO_2) aumenta a população de microrganismos (Figura 1a), que, em excesso, prejudicam os peixes, exigindo um controle rigoroso (SENAR,2019). A dinâmica do CO_2 em viveiros é complexa e influenciada por diversos fatores, incluindo densidade de estocagem, taxa de alimentação, temperatura da água e estratégias de manejo. Boyd & Tucker (2012) observaram que viveiros com alta biomassa de peixes e elevadas taxas de alimentação tendem a apresentar maiores concentrações de CO_2, principalmente durante a madrugada, quando a respiração dos organismos aquáticos não é compensada pela fotossíntese.

Paradoxalmente, o CO_2 também é essencial para a fotossíntese realizada por fitoplâncton e macrófitas aquáticas, que constituem um componente da cadeia alimentar nos viveiros. Como representado na Figura 1b, durante o dia, esses organismos fotossintetizantes absorvem CO_2 e liberam oxigênio, contribuindo para a qualidade da água (Mercante *et al*., 2007). No entanto, durante a noite, ocorre o processo inverso, com a liberação de CO_2 através da respiração, podendo levar a flutuações significativas nas concentrações desse gás ao longo do ciclo diário (Rodrigues *et al*., 2010).

Figura 1. Ambiente de um viveiro escavado.



(1a) Organismos e resíduos em um viveiro **(1b) Efeitos do fitoplâncton na água**

Fonte: SENAR , 2019.

Mercante *et al*. (2007) analisaram variáveis limnológicas em viveiros de tilápia ao longo de 3 dias, com coletas a cada 2 horas durante o dia, em períodos desde a manhã até o início da noite. Observou-se que a fotossíntese do fitoplâncton durante o dia reduz as concentrações de CO_2 e aumenta o OD, enquanto à noite ocorre o inverso devido à respiração. Concentrações mais altas de CO_2 foram registradas nas primeiras horas da manhã, indicando a importância do monitoramento desses parâmetros para evitar estresse nos peixes.

Concentrações de CO_2 acima de 20 mg/L podem causar estresse crônico, resultando em redução do apetite, menor taxa de crescimento e maior susceptibilidade a doenças em tilápias. Hamad *et al*. (2023) investigaram os efeitos de concentrações elevadas de CO_2 em tilápias do Nilo (*Oreochromis niloticus*) e observaram que níveis de 17 mg/L e 25 mg/L causaram uma redução de 30 a 50% na ingestão máxima de ração. Esse declínio no consumo alimentar está diretamente associado à diminuição das taxas de crescimento, indicando que concentrações superiores a 20 mg/L de CO_2 podem comprometer significativamente o desempenho produtivo desses peixes.

Verifica-se então que em sistemas intensivos de produção, especialmente aqueles com aeração mecânica limitada, o acúmulo de CO_2 pode se tornar um fator limitante para a produtividade. Estratégias de manejo que promovam a difusão de CO_2 para a atmosfera, como o

uso de aeradores ou injetores de ar, são importantes para manter a qualidade da água em níveis aceitáveis. O desenvolvimento e a implementação de sensores e sistemas eletrônicos para monitoramento contínuo e de forma automática desses parâmetros representam avanços importantes para a gestão ambiental em aquicultura, possibilitando intervenções em tempo real e a minimização dos impactos ambientais (Macedo *et al*., 2024)

Macedo (2025) propôs uma metodologia inovadora para estimar a concentração de CO_2 em viveiros escavados e desenvolveu seu trabalho por meio de um sistema eletrônico baseado em IoT. As informações foram capturadas em cartão eletrônico de dados, para posterior análise de estimativa da pegada de carbono. Este experimento permitiu identificar, além de características técnicas do controlador e dos sensores até então utilizados, dados sobre a robustez dos mesmos e da dificuldade operacional de manipular os equipamentos dentro da proposta inicial, e necessidade de um acompanhamento em tempo real dos resultados. A proposta se mostrou promissora para uma continuidade do trabalho.

1.2. Tecnologias de Monitoramento de Viveiros

O uso de tecnologias de monitoramento ambiental tem se desenvolvido e evoluído, especialmente com o avanço da IoT, como apresentado no Capítulo 2. Sistemas automatizados equipados com sensores podem monitorar continuamente parâmetros de qualidade da água e diferentes sensores são utilizados para mensurar variáveis ambientais críticas, em busca de disparar alertas ou ações automáticas com base nos valores medidos, além do crescente interesse em armazenar ou tratar dados. Porém, a escolha do sensor mais adequado depende do contexto da aplicação e das especificidades do ambiente a ser monitorado. Por isso, trabalhar com mais de um sensor pode ser uma alternativa interessante.

É o caso típico de sensores de temperatura, categoria que possui algumas variantes de baixo custo compatíveis com microcontroladores do mercado, com funcionalidades diversas, muitas vezes acumulando mais de um parâmetro ambiental no mesmo circuito. Por exemplo, mensurar a umidade relativa do ar além da temperatura.

Alguns sensores podem variar em seus princípios técnicos de operação, ou seja, eles podem utilizar diferentes tecnologias, métodos de medição, ou mecanismos internos para detectar e registrar dados, mas chegar no mesmo objetivo de mensurar um dado ambiental específico. Isso significa que a maneira como um sensor coleta, processa e transmite informações pode ser distinta, dependendo do seu projeto e propósito específico, o que pode também implicar em grandes diferenças no custo de aquisição.

É o caso das sondas de oxigênio dissolvido. Os sensores do tipo sonda eletroquímica de membrana operam por meio de um sensor eletroquímico que mede a quantidade de OD na água e utiliza dois eletrodos cobertos por uma membrana permeável ao oxigênio. O oxigênio atravessa a membrana e é reduzido no cátodo, gerando uma corrente elétrica proporcional à concentração de OD. Já em sondas ópticas, o sensor contém uma substância fluorescente que, quando excitada por um feixe de luz, libera fótons. A presença de oxigênio afeta a intensidade e o tempo de vida da fluorescência, permitindo a medição da concentração de OD. Para aquicultura e monitoramento ambiental, sensores de membrana ainda são amplamente utilizados devido ao custo acessível e boa precisão. No entanto, sondas ópticas podem se tornar uma melhor opção devido à sua durabilidade e baixa manutenção (Wei *et al*., 2019). Assim, a escolha da sonda de OD mais adequada depende do contexto da aplicação e do custo benefício, mas é possível termos soluções eficientes com ambas.

De forma similar, encontramos no mercado diferentes tipos de sensores que medem concentração de CO_2 no ambiente. Alguns modelos operam através do princípio de sensores químicos tipo metal óxido. A interação química entre o CO_2 e o sensor provoca uma mudança de potencial no elemento sensor, que gera uma tensão de saída proporcional à concentração de CO_2 (Sensor One-Stop, 2024). Outros modelos utilizam o princípio de espectroscopia infravermelha não-dispersiva (NDIR). Mede a absorção das ondas de luz infravermelha pelo CO_2, proporcionando uma leitura direta do gás. Este método é bastante preciso para faixas baixas de concentração de dióxido de carbono (Dubey *et al*., 2024). Ambos os tipos possuem modelos compatíveis com microcontroladores de baixo custo. DM1CR Electronics (2021) efetuou uma avaliação entre vários sensores de CO_2, de ambos os tipos, aferindo a precisão, consumo de energia, faixa de medição e aplicabilidade em diferentes ambientes. O modelo NDIR MH-Z19B foi apresentado como robusto e de custo mais acessível, e houve um relato sobre uma correlação melhor em comparação com outros sensores dos valores de CO_2 do MH-Z19B, tipo de sensor utilizado na pesquisa relatada nesta tese.

A diversidade de sensores disponíveis no mercado, com diferentes princípios de funcionamento, favorece o desenvolvimento de uma plataforma modular aberta, na qual os sensores possam ser selecionados e substituídos conforme a necessidade específica de cada aplicação e demandas de cada projeto.

1.3. Integração de IoT e IA na Aquicultura

Apesar da disponibilidade crescente destas tecnologias, sua implementação prática na aquicultura continua desafiadora. Como visto no Capítulo 2, as soluções apresentadas nas pesquisas são muito diferentes entre si, mesmo que tenham objetivos semelhantes, e evidenciam dificuldade em sua replicação. Valenti *et al*. (2021) apresentam estudo nesta linha, e traçam um perfil dos próximos passos que devem nortear a evolução da aquicultura no Brasil, em busca da chamada Aquicultura 4.0, o que inclui o uso das TIC, como IoT e IA, por meio do uso de sensores otimizados e aprendizagem de máquina dentre outras tecnologias, como por exemplo *blockchain*.

O autor aponta também que a variabilidade da atividade produtiva da aquicultura apresenta vários riscos significativos, como eventos climáticos extremos e variações na qualidade da água. Estes riscos demandam inovações para melhorar a previsibilidade e uniformidade do processo de produção, de forma a padronizar intervenções de precisão no manejo. Inovações estas que possam implantar processos aptos a obter informações, interpretar, tomar decisões e tomar ações práticas na produção. A adoção desse modelo seria o início da aquicultura brasileira na migração para a Aquicultura 4.0. Melhorar o registro de dados de boa qualidade e usá-los para aumentar a eficiência dos processos produtivos é essencial para atingir este objetivo.

Como descrevemos, um sistema de automação fundamentado na IoT é capaz de monitorar continuamente e com eficácia diversos parâmetros críticos em um viveiro de peixes. A integração desses sensores à plataformas de controle como o Arduino ou ESP possibilita a automação de alertas e ajustes no manejo da piscicultura, garantindo maior estabilidade dos parâmetros ambientais. Contudo, além do monitoramento dos parâmetros de qualidade da água, as tecnologias de IA têm se mostrado ferramentas interessantes para a aquicultura sustentável, como visto em trabalhos correlatos (Khanna; Fan; Chan, 2022; Liu *et al*., 2023).

Os dispositivos sensores não apenas fornecem dados em tempo real, mas também permitem análises de longo prazo no decorrer do tempo, auxiliando na tomada de decisões estratégicas e na maximização da eficiência produtiva, desde que possam estar disponíveis em uma base de dados. A inteligência arquitetada em conjunto por profissionais das áreas de aquicultura e TI podem ser replicadas em algoritmos para processar (e interpretar) esse grande volume de dados e sugerir decisões, que podem ser endereçadas para pesquisas na área, bem como para os trabalhadores nas propriedades, com base em modelos previamente desenvolvidos. Os dispositivos em campo recebem comandos de ação diretamente por meio de

tecnologia IoT. Também é possível que o sistema seja acessado e comandado pelo operador através de *smartphone*.

De qualquer forma, para que tudo isto seja eficiente, a qualidade da informação capturada no ambiente de produção é fundamental. Com o avanço de IoT e da IA, novas abordagens para o monitoramento da qualidade da água estão sendo desenvolvidas. Sistemas de sensoriamento inteligente podem combinar diferentes tipos de sensores para capturar dados ambientais e, por meio de aprendizado de máquina, interpretar tendências e prever condições críticas antes que impactos negativos ocorram. Além disso, implantar uma solução de computação em nuvem permite processar grandes volumes de dados de forma eficiente, reduzindo a estrutura na propriedade e otimizando a gestão da piscicultura.

As práticas de uma aquicultura mais sustentável buscam minimizar os impactos ambientais, maximizando a produtividade e a lucratividade. Nesse contexto, a união da IoT e da IA pode ser uma ferramenta para otimizar sistemas que auxiliem a aquicultura na evolução de suas práticas e resultados, o que conduz ao emergente campo das TIC chamado AIoT ou Inteligência Artificial das Coisas (Huang & Khabusi, 2025; Tina *et al*., 2025). A nova designação acaba sendo a transcrição literal dos termos originais, em que pese o resultado não ser muito feliz, haja vista que pode denotar um caráter de dependência da inteligência (ou falta dela), de objetos inanimados (as coisas...).

Esta percepção negativa pode vir inclusive das discussões que tem havido sobre a adoção crescente dos modelos de IA generativa que muitas vezes são utilizados sem um parâmetro de criticidade por parte de determinados usuários. Porém, é importante observar que a camada de IA a qual se discute aqui tem a ver com métodos consolidados de aprendizagem de máquina e outras técnicas, que há algum tempo tem auxiliado os cientistas a tabular e processar dados extensos. De qualquer forma, para isso, são necessários os dados brutos, capturados com qualidade.

Siam *et al*., (2025) estruturam o AIoT em três componentes principais: o sensoriamento, responsável pela captação de dados do ambiente físico; a computação, que engloba modelos de IA como redes neurais e técnicas de aprendizagem de máquina para análise e inferência; e a rede e comunicação, que garante a transmissão eficiente e segura das informações coletadas, normalmente para a Internet. Os autores também discutem desafios enfrentados pelo modelo, incluindo a demanda por energia dos dispositivos inteligentes, o que impõe a necessidade de soluções mais eficientes para viabilizar sua adoção em larga escala e a necessidade de

padronização. São justamente estes três componentes que constituem o núcleo da proposta apresentada neste trabalho.

1.4. Objetivos e Proposta do Estudo

A partir deste contexto, integrar diversas tecnologias em sistemas de aquicultura requer consideração cuidadosa de tipos de equipamentos, quantidades, compatibilidade e protocolos de comunicação. Estabelecer parâmetros padronizados para instalações aquáticas é crucial para uma integração eficaz (Mostafa *et al.*, 2024). Alcançar esse nível de integração é complexo e muitas vezes está além das capacidades dos aquicultores e empresas. A colaboração entre piscicultores, pesquisadores e desenvolvedores de tecnologias é essencial para integrar com sucesso essas tecnologias e impulsionar o uso das mesmas, principalmente no que se refere aos pequenos produtores, em busca de maior sustentabilidade e lucratividade. É necessário garantir a facilidade de uso das tecnologias para a obtenção de bons e perenes resultados.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo estender a proposta de Macedo (2025), aprimorando um protótipo para aferir a qualidade da água e estimar a emissão de CO_2 em viveiros escavados, incluindo um sensor de OD e adaptando o protótipo para poder funcionar como uma base para o desenvolvimento de ferramentas de AIoT aplicadas à pesquisa em aquicultura. São objetivos específicos: dotar o protótipo de acesso *on-line* às suas informações por meio de interface para *smartphones*, permitindo monitoramento das variáveis em tempo real; dotar o protótipo de uma base de dados na nuvem que possa ser utilizada a posteriori para projetos de AIoT; realizar uma comparação entre sensores utilizados no protótipo e sondas convencionais do mercado, a fim de identificar diferenças de precisão; identificar a curva de correspondência entre as medições efetuadas do CO_2 ambiente e o OD.

É ainda premissa do trabalho, propor um projeto aberto de fácil replicabilidade, a fim de dotar a comunidade acadêmica de uma ferramenta padronizada e de baixo custo para o desenvolvimento de soluções de captura de dados para a produção aquícola, permitindo novas extensões a partir de sua publicação. Para fins de facilidade de entendimento e clareza, neste documento passaremos a nos referir à proposta de protótipo de plataforma aberta como Pegad@.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O protótipo Pegad@ foi montado a partir de uma caixa no formato de estufa para medição de CO_2, posicionada com a abertura voltada para baixo sobre os tanques do experimento, conforme a metodologia proposta em Macedo (2025), formando uma espécie de

cúpula sobre a água. Foi utilizada uma caixa plástica transparente de base e topo retangulares, formando um tronco de pirâmide, com as seguintes medidas: base com lados de 30x46cm, topo com lados de 28x40cm e altura de 26cm, com volume interno bruto de aproximadamente 0,0324m³. Foram adaptados 2 flutuadores com garrafas PET convencionais, bem como suportes interno e externo para fixação dos equipamentos (Figura 2).

Figura 2. Estufa para estimação de CO_2 em tanques.

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

2.1 Caracterização do Ambiente do Experimento

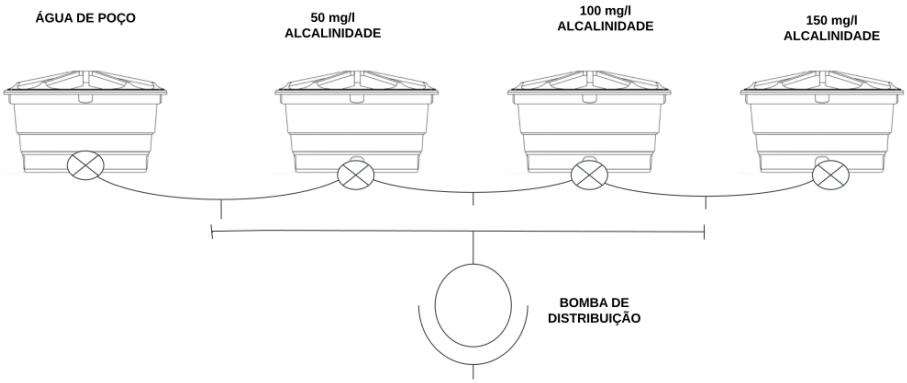
A avaliação do funcionamento da plataforma foi realizada em tanques localizados no Grupo de Estudos de Manejo na Aquicultura (Gemaq) da Unioeste de Toledo-PR.

Foi realizada na mesma estrutura montada para o experimento da mestranda do Programa de Pós Graduação em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca da Unioeste (PREP), Analice Timóteo de Araújo, que pretende avaliar diferentes concentrações de alcalinidade em águas de cultivo da Tilápia do Nilo. Este trabalho prevê a avaliação das alterações nos parâmetros de qualidade da água em resposta aos diferentes níveis de alcalinidade testados, por meio de kits de análise e uma sonda multiparamétrica padrão de mercado.

Este experimento foi alocado em forma de blocos em um sistema de abastecimento composto por reservatórios com capacidade de 1.000 litros, conectados por uma tubulação, cada um com diferentes níveis de alcalinidade: água de poço, 50 mg/L, 100 mg/L e 150 mg/L (Figura 3). A água desses reservatórios é distribuída para caixas inferiores menores com capacidade de 500 litros, por meio de uma bomba central. Cada unidade experimental consistiu em um tanque contendo 10 juvenis de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*), com peso médio inicial de 25 gramas. O OD e a temperatura foram medidos periodicamente com uma sonda apropriada, o que possibilitou a comparação destes parâmetros com as medições também realizadas pelos

sensores do protótipo Pegad@. Devido à limitação de sensor de OD, foi construído um único protótipo, de forma que as leituras nos tanques para testar a plataforma Pegad@ foram realizadas de forma não simultânea, em dias alternados.

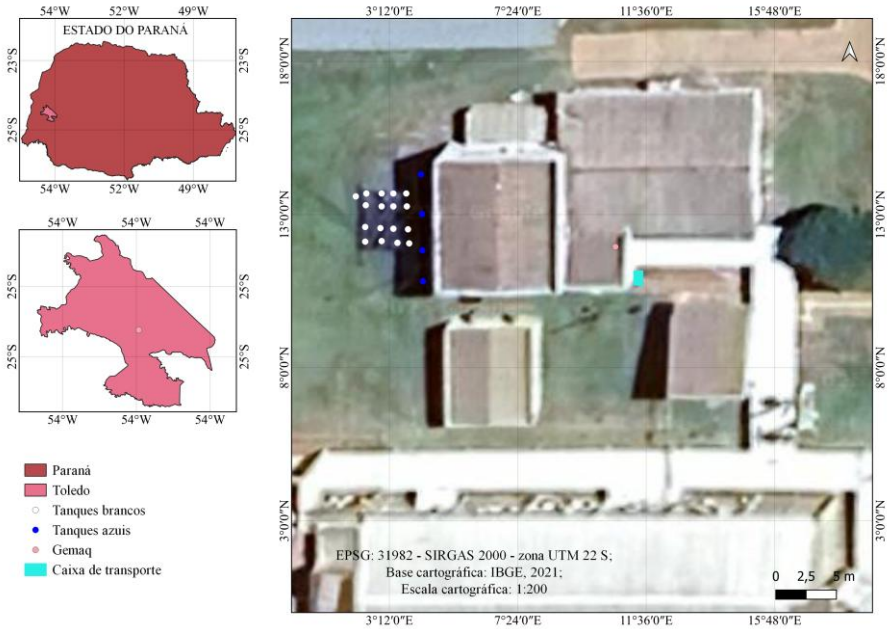
Figura 3. Esquema do experimento conjunto para avaliação dos sensores da plataforma.



Fonte: modificado pelo autor, a partir da proposta de mestrado de Analice de Araújo, 2025.

Adotou-se então um segundo local de testes para garantir conexão WiFi ao protótipo, permitindo assim o armazenamento dos dados na nuvem e a validação da interface de visualização dos parâmetros em tempo real. Neste local, foi utilizada como tanque uma caixa de transporte que recebeu cerca de 30 Lambaris (*Astyanax lacustris*). A Figura 4 caracteriza o local onde foi realizado o experimento.

Figura 4. Localização e pontos de coleta do experimento.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

As amostras obtidas foram utilizadas para elaborar gráficos tanto da correlação entre sensores comerciais e microcontrolados, como da comparação de OD com o CO_2 e de ambos com temperatura ambiente. Foi utilizado o Software R Studio® (R Core Team, 2022) e o pacote complementar GGPLOT2 (Wickham, 2016) para gerar os gráficos.

2.2 Descrição do Material

A lista de componentes utilizados para a construção do protótipo, equipada com os respectivos sensores eletrônicos, controlador programável e seus periféricos, compõe a Tabela 1. Todos os aspectos técnicos e operacionais dos principais componentes estão detalhados no Apêndice A, que contém também o esquema de interligação física entre os componentes.

Tabela 1. Componentes utilizados no protótipo Pegad@.

Componente	Função	Custo (R$)
ESP32 T-Beam com Suporte de Bateria, GPS e LoRa	Microcontrolador responsável pelo processamento dos dispositivos e comunicação dos dados	459,90
Relógio de Tempo Real (RTC) DS3232	Relógio para registro de data e hora das leituras dos sensores	27,92
Sensor MH-Z19B	Sensor infravermelho para detecção de Dióxido de Carbono (CO_2), modelo NDIR	351,57
Sensor DHT22	Sensor para captura de temperatura ambiente e umidade relativa do ar	30,87
Sensor BMP180	Sensor para captura de temperatura ambiente e pressão atmosférica	5,89
Sensor DO RS-LDO-N01	Sensor para captura de oxigênio dissolvido e temperatura da água do viveiro	1.350,00
Leitor Micro SD Card c/ cartão de 16GBytes	Unidade de gravação para registro das leituras dos sensores para redundância	29,46
Demais itens	Componentes eletrônicos, estufa plástica e acessórios	150,00
	Total	**R$ 2.405,61**

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Antes de iniciar o período de testes, procedeu-se a calibração do sensor de CO_2, conforme Erriez (2025), em uma prática que previa 12h de medição ao ar livre, que apresentou os resultados esperados. Foi realizada também a calibragem do sensor de OD, conforme Shandong Renke (2023), que previa a medição em uma solução a 0% de OD. Apesar da indicação do resultado do programa de que a calibração foi efetuada com sucesso, a leitura diferiu do esperado, haja vista que a medição diferiu do 0 absoluto.

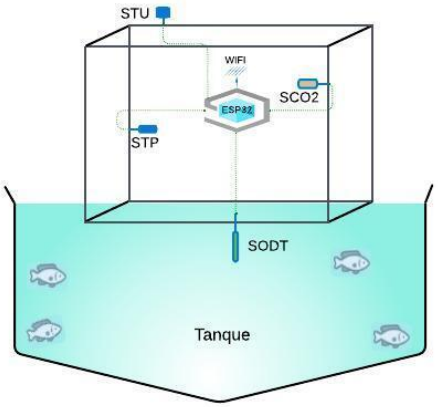
Como sonda comercial para as comparações, foi utilizado o equipamento YSI 550A, da empresa YSI Environmental. É um instrumento portátil para medição de OD e temperatura da água, projetado para uso em campo. Sua faixa de medição de OD abrange 0–50mg/L (precisão

de ±0,3mg/L ±2%). Possui uma câmara de calibração com esponja umidificada para calibração em ar saturado e armazenamento da sonda. Quanto à temperatura, a faixa de medição está entre -5°C a +45°C, com precisão de ±0.3°C e resolução de 0.1°C. O manual do produto indica não requerer calibração manual, pois utiliza um termistor de alta precisão calibrado de fábrica (YSI Environmental, 2006).

A estrutura física da plataforma utilizada no experimento, foi construída conforme o modelo esquematizado na Figura 5.

Figura 5. Diagrama do protótipo Pegad@.

Dispositivo	Descrição
ESP32	Controlador Programável
WIFI	Adaptador WI-FI
STU	Sensor de Temperatura Externa e Umidade Relativa
SCO2	Sensor de Gás Carbônico
STP	Sensor de Temperatura Interna e Pressão
SODT	Sensor de Oxigênio Dissolvido e Temperatura D'água



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

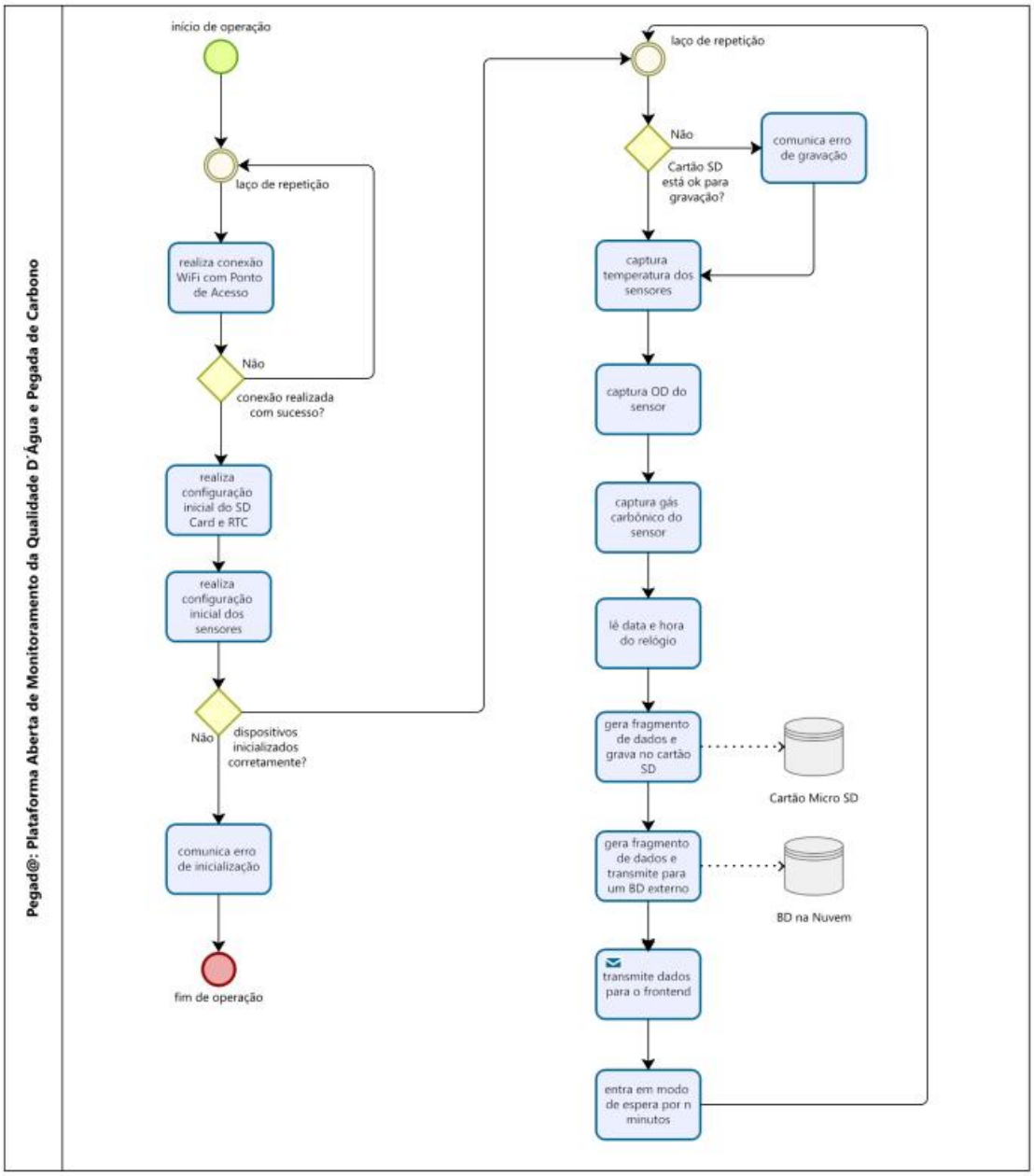
2.3 Descrição do Material

A Figura 6 apresenta a lógica da programação embarcada no microcontrolador da plataforma, uma visão do *backend* do sistema. A camada de *backend* é responsável pelo processamento lógico dos dados, gerenciamento do banco de dados e comunicação com servidores. Opera nos bastidores, garantindo a funcionalidade e integração entre a interface com o usuário e os recursos do sistema (Odeniran, 2023). O código em linguagem C++, desenvolvido para atender ao programa principal desta lógica, está apresentado no Apêndice B, devidamente comentado, contendo ainda o código de funcionamento do Sensor de OD, desenvolvido com base na documentação publicada por Bartzdev (2025), com as adaptações necessárias. Para os sensores de Temperatura e CO_2, os módulos seguiram a implementação publicada por Macedo (2025), requerendo apenas ajustes pontuais.

Detalhando o funcionamento da plataforma proposta, o sistema inicia realizando o teste e inicialização dos componentes físicos do sistema. Se algum componente fundamental para o funcionamento do protótipo apresentar erro, como o RTC, o funcionamento é interrompido. É

realizada então a conexão com um *Access Point* WiFi da rede pré-configurada para funcionamento do sistema, e inicia-se o ciclo de capturas.

Figura 6. Fluxograma lógico da programação do módulo principal do sistema Pegad@.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

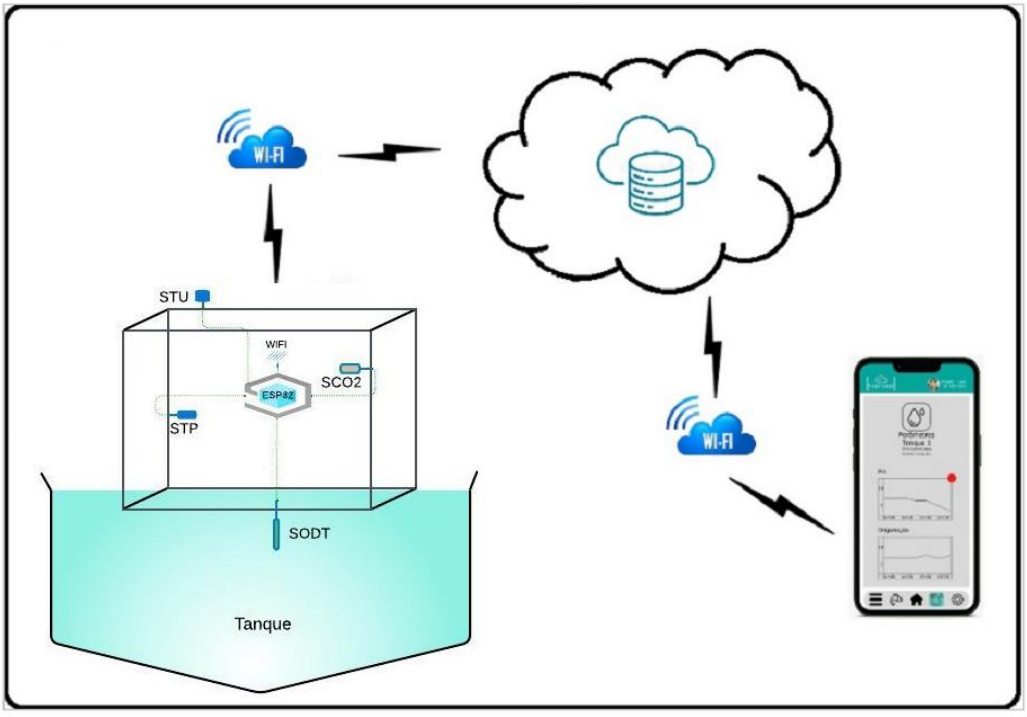
Os sensores foram programados para registrar leituras a um tempo pré-determinado *n*, que é definido conforme a premissa do pesquisador que fará uso das informações. Em nosso experimento, usamos intervalos de 1 ou 5 minutos, dependendo da fase da pesquisa. A cada evento de captura de informações dos sensores, é criado um registro com a data e hora da realização e os dados dos sensores, e essa informação é então gravada no *Data Logger* da

plataforma (cartão micro SD). Na sequência, o mesmo registro é enviado por meio da conexão WiFi para um banco de dados pré-configurado na Nuvem e para a implementação do *frontend* na plataforma ThingsBoard.

O banco de dados utilizado no projeto é o Supabase, uma plataforma em código aberto, análogo ao Firebase, conhecido pela comunidade acadêmica. Destaca-se por sua estrutura altamente escalável, compatibilidade com o padrão SQL e integração rápida tanto com aplicações móveis como web (Supabase, 2023). Além das características técnicas mencionadas, o Supabase destaca-se como uma opção viável para projetos de pesquisa devido à capacidade de seu plano gratuito (*Free Tier*), que inclui um Servidor Virtual de CPU compartilhada e 500 MBytes de memória RAM, permitindo banco de dados de até 500 MBytes, 5 GBytes de largura de banda mensal e limite de 2 projetos ativos simultâneos, oferecendo assim recursos suficientes para prototipagem e testes iniciais. Esta opção foi a utilizada para este projeto, haja vista que não haveria a necessidade de manter o banco de dados de forma perene.

O acesso remoto *on-line* pela Internet aos dados coletados possibilita que aplicações diversas possam ser desenvolvidas para a manipulação dos dados coletados, tanto em tempo real, como para realizar estatísticas e sumarizações, conforme a arquitetura apresentada na Figura 7.

Figura 7. Arquitetura de comunicações do sistema Pegad@.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

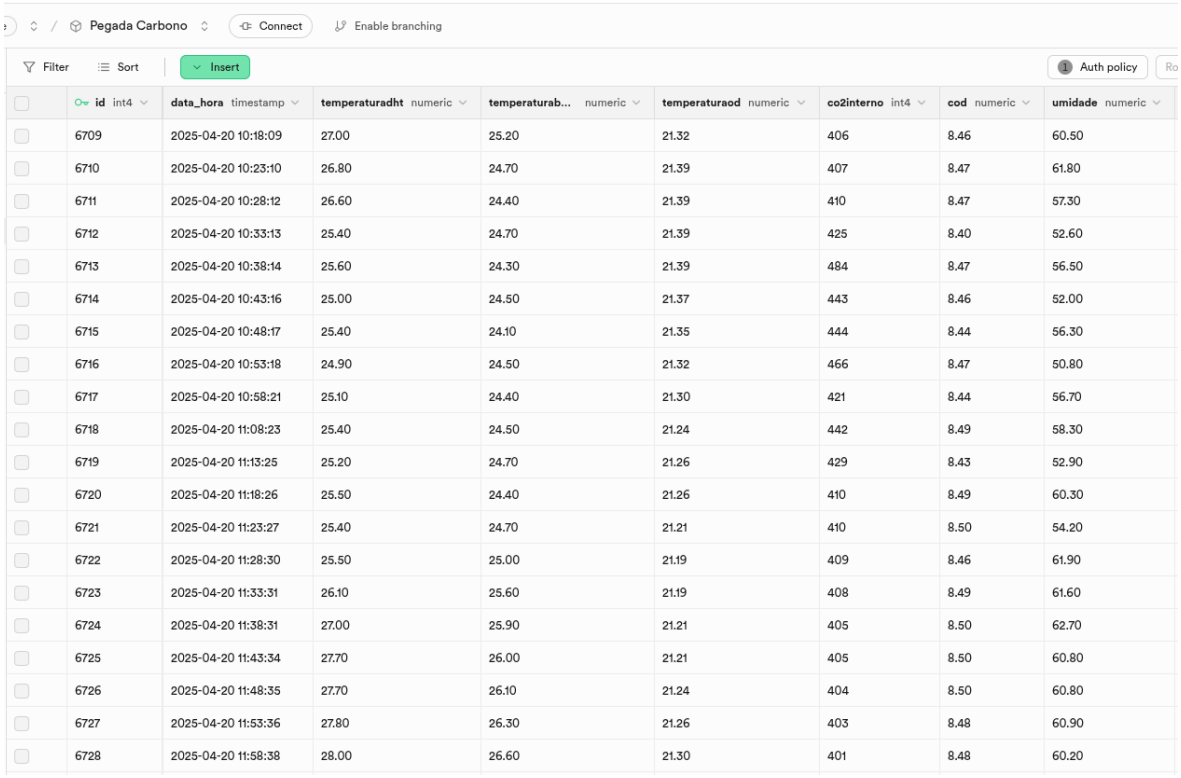
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos com o desenvolvimento e a aplicação da plataforma Pegad@.

3.1 Banco de Dados na Nuvem

A camada de dados faz parte do *backend* de sistemas computacionais (Odeniran, 2023). No Pegad@, os dados capturados por sensoriamento poderão ser utilizados para leitura e processamento dos pesquisadores por meio do acesso *on-line* a um banco de dados, ou, conforme eventual necessidade, por meio do arquivo gerado no *Data Logger*. A Figura 8 ilustra a implementação deste banco de dados na nuvem, exibindo um trecho das informações gravadas durante a execução do protótipo.

Figura 8. Visão do banco de dados na nuvem que armazena os parâmetros capturados no tanque.



id int4	data_hora timestamp	temperaturadht numeric	temperaturab... numeric	temperaturaod numeric	co2interno int4	cod numeric	umidade numeric
6709	2025-04-20 10:18:09	27.00	25.20	21.32	406	8.46	60.50
6710	2025-04-20 10:23:10	26.80	24.70	21.39	407	8.47	61.80
6711	2025-04-20 10:28:12	26.60	24.40	21.39	410	8.47	57.30
6712	2025-04-20 10:33:13	25.40	24.70	21.39	425	8.40	52.60
6713	2025-04-20 10:38:14	25.60	24.30	21.39	484	8.47	56.50
6714	2025-04-20 10:43:16	25.00	24.50	21.37	443	8.46	52.00
6715	2025-04-20 10:48:17	25.40	24.10	21.35	444	8.44	56.30
6716	2025-04-20 10:53:18	24.90	24.50	21.32	466	8.47	50.80
6717	2025-04-20 10:58:21	25.10	24.40	21.30	421	8.44	56.70
6718	2025-04-20 11:08:23	25.40	24.50	21.24	442	8.49	58.30
6719	2025-04-20 11:13:25	25.20	24.70	21.26	429	8.43	52.90
6720	2025-04-20 11:18:26	25.50	24.40	21.26	410	8.49	60.30
6721	2025-04-20 11:23:27	25.40	24.70	21.21	410	8.50	54.20
6722	2025-04-20 11:28:30	25.50	25.00	21.19	409	8.46	61.90
6723	2025-04-20 11:33:31	26.10	25.60	21.19	408	8.49	61.60
6724	2025-04-20 11:38:31	27.00	25.90	21.21	405	8.50	62.70
6725	2025-04-20 11:43:34	27.70	26.00	21.21	405	8.50	60.80
6726	2025-04-20 11:48:35	27.70	26.10	21.24	404	8.50	60.80
6727	2025-04-20 11:53:36	27.80	26.30	21.26	403	8.48	60.90
6728	2025-04-20 11:58:38	28.00	26.60	21.30	401	8.48	60.20

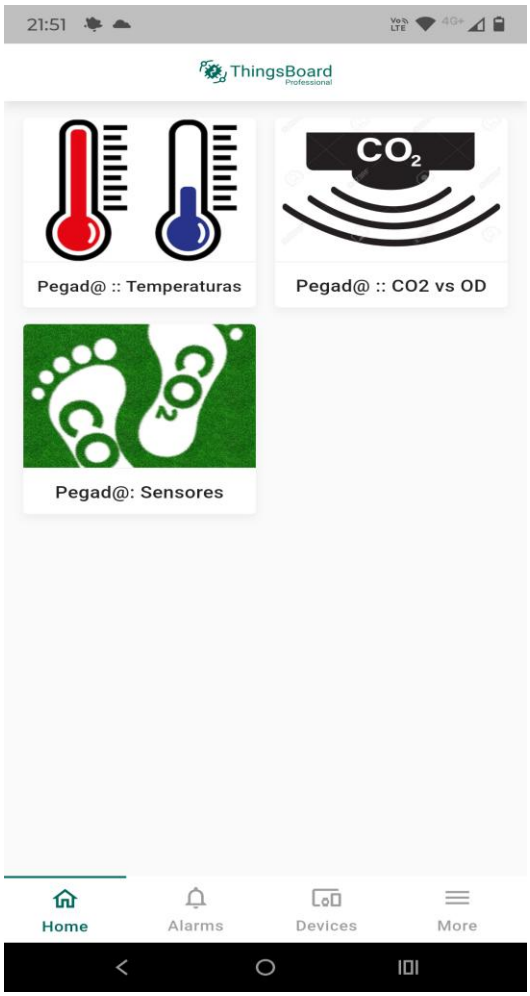
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

3.2 Interface de Acesso *On-Line*

Para validar a proposta da utilização em tempo real das informações coletadas pelo Pegad@, foi desenvolvido um *frontend* para testar a comunicação do sistema. *Frontend* é a camada visível de um sistema, que permite a interação do usuário com a aplicação (Odeniran,

2023). Esta interface se apresenta no Pegad@ no formato de *dashboard*, conceito de ferramenta visual que organiza, sintetiza e apresenta informações de forma concisa e pretende facilitar a análise e o monitoramento de uma coleção de dados (Yigitbasioglu & Velcu, 2012). O aplicativo foi desenvolvido por meio da ferramenta ThingsBoard, que funciona como um *framework* para o desenvolvimento de *dashboards* como ferramentas de IoT (ThingsBoard, 2025). A tela inicial do aplicativo é vista na Figura 9, como se apresenta no dispositivo móvel.

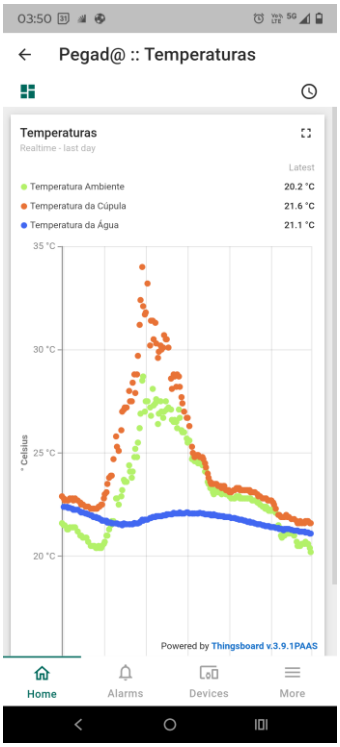
Figura 9. Esquema em montagem do experimento conjunto para validação da plataforma Pegad@.



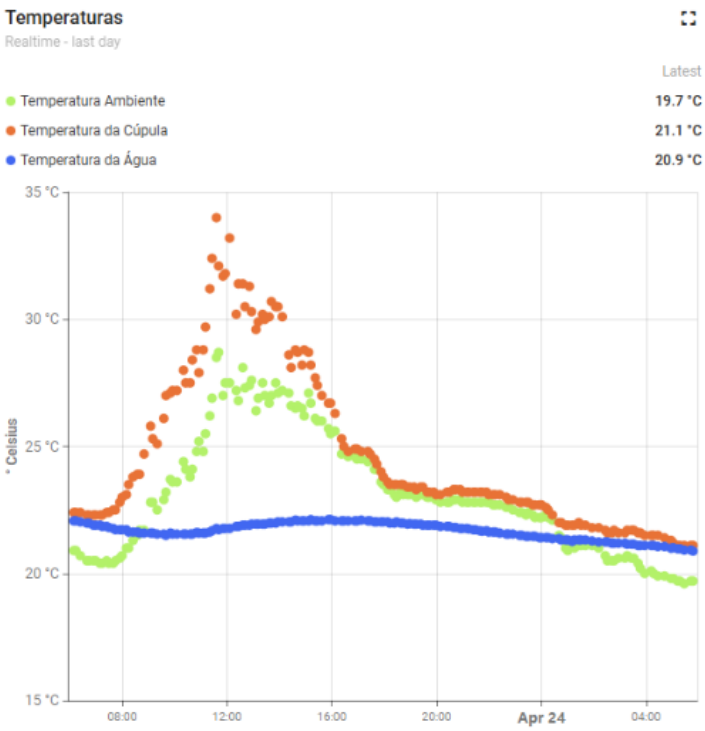
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

A funcionalidade “Pegad@ :: Temperaturas” disponibiliza um gráfico de monitoramento contínuo, apresentando em tempo real as temperaturas registradas nos três espaços distintos: na cúpula da estufa, no ambiente externo, e dentro do reservatório hídrico. Conforme demonstrado na Figura 10, é possível analisar a série temporal das últimas 24 horas, destacando variações significativas entre os ambientes.

Figura 10. Temperaturas Monitoradas (últimas 24h – visto às 6h da manhã).



(10a) Visão na tela do *smartphone*

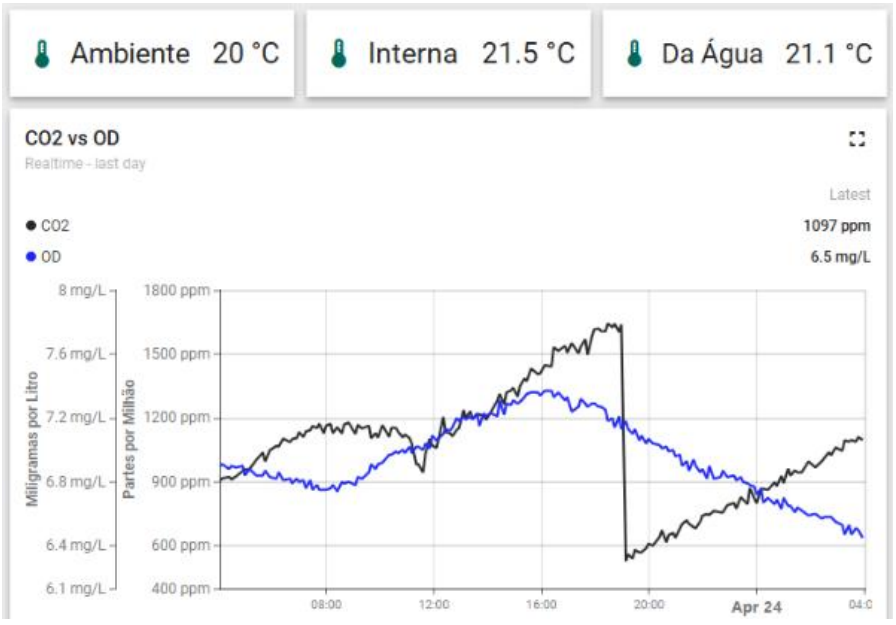


(10b) Visão ampliada

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

A Figura 11 mostra o resultado da opção “Pegad@ :: CO2 vs OD”. Além de apresentar as temperaturas instantâneas, exibe a variação simultânea das concentrações de CO_2 e OD no sistema monitorado nas últimas 24 horas.

Figura 11. Comparação CO_2 e OD (últimas 24h – visto às 4h da manhã).



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

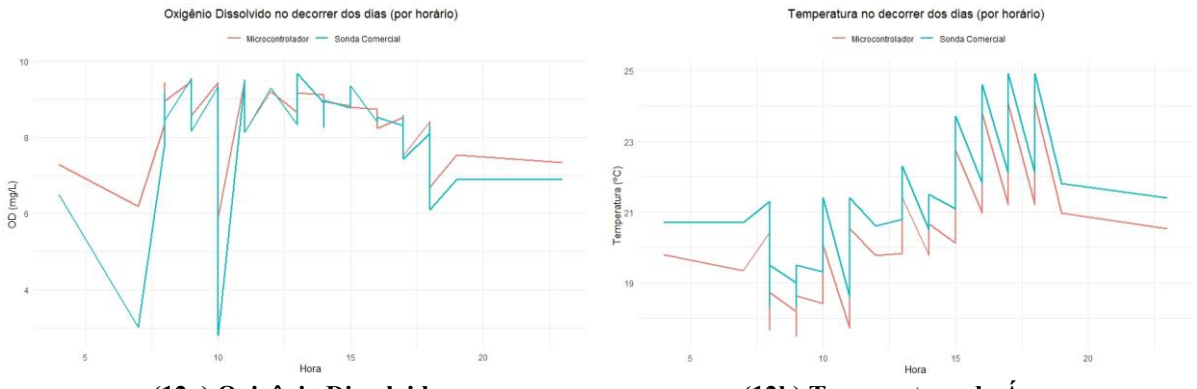
O gráfico apresenta os dados coletados entre as 04h dos dia 23/04/25 e às 04h do dia 24/04/25 e se identifica a relação inversa entre os parâmetros CO_2 e OD durante o período, com maiores flutuações durante a noite e madrugada. Para fins de apresentação, procedeu-se a renovação do ar da cúpula da estufa às 19h do dia 23, o que explica esta queda acentuada apresentada no gráfico exatamente neste horário, com a retomada da trajetória de aumento do índice de gás carbônico na sequência.

A opção "Pegad@ :: Sensores" vai apresentar em uma próxima versão do *frontend* os valores instantâneos de todos os sensores, inclusive outros dados que são capturados pelo protótipo mas não foram levados em consideração neste trabalho, como Umidade Relativa do Ar, Pressão Atmosférica e Posicionamento GPS do equipamento.

3.3 Análise Comparativa das Sondas de Oxigênio Dissolvido e Temperatura da Água

Durante duas semanas, foram conduzidas leituras experimentais de OD e temperatura da água nos diferentes tanques, com o objetivo de comparar a acurácia entre os sensores integrados ao protótipo microcontrolado e uma sonda comercial. As medições foram realizadas em horários aleatórios, abrangendo períodos diurnos e noturnos, a fim de capturar diferentes condições ambientais. Estudos demonstram que sensores de baixo custo, quando devidamente calibrados, podem fornecer medições confiáveis de temperatura e OD em ambientes de aquicultura (Parra *et al*., 2018; Eze & Ajmal, 2020). A Figura 12 ilustra a comparação gráfica dos parâmetros medidos por ambos os sensores.

Figura 12. Comparação dos parâmetros obtidos por ambos os sensores utilizados.



(12a) Oxigênio Dissolvido **(12b) Temperatura da Água**

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

A análise estatística indicou que a sonda acoplada ao microcontrolador registrou temperaturas sistematicamente inferiores às da sonda comercial. A regressão linear correspondente — *Temperatura_microcontrolada = 0,98 × Temperatura_comercial – 0,86* —

indica uma relação quase proporcional entre as medições, mas com um viés negativo no intercepto, evidenciando a tendência de uma subestimação pelo sensor do protótipo.

No caso do OD, a correlação entre as medições foi satisfatória até concentrações de aproximadamente 6 mg/L, conforme a equação de regressão linear *OD_microcontrolado = 1,02 × OD_comercial + 0,15*. No entanto, em leituras abaixo de 4 mg/L com a sonda comercial, a microcontrolada apresentou leituras mais elevadas, sugerindo uma possível limitação em sua sensibilidade em ambientes com baixos níveis de OD.

A Tabela 2 apresenta as médias e os desvios padrão observados nas medições de temperatura e OD para ambas as sondas.

Tabela 2. Médias e desvios padrão das variáveis temperatura da água e OD.

Métrica	Sonda Comercial (Temperatura)	Microcontrolada (Temperatura)	Sonda Comercial (OD)	Microcontrolada (OD)
Média	21,03 °C	20,17 °C	8,23 mg/L	8,47 mg/L
Desvio Padrão	1,77 °C	1,81 °C	1,76 mg/L	1,15 mg/L

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O desvio padrão da temperatura mostrou-se semelhante entre as sondas (~1,8 °C), indicando que ambas são igualmente sensíveis às variações térmicas, apesar da diferença sistemática nos valores médios. Em relação ao OD, a sonda microcontrolada apresentou menor variabilidade, o que pode indicar uma menor capacidade de detecção de variações críticas, especialmente em ambientes com baixos níveis de oxigênio, como observado no tanque alimentado com água de poço artesiano, onde a concentração de OD tende a ser naturalmente mais baixa devido à menor presença de algas e trocas gasosas limitadas (Mercante *et al*., 2007).

Por outro lado, nos tanques de tratamento controle do experimento de alcalinidade, com condições ambientais mais estáveis, as diferenças entre as leituras de ambos os sensores foram mínimas, indicando que, sob condições uniformes, ambos os dispositivos fornecem resultados comparáveis, reforçando a viabilidade do sistema microcontrolado para medições de campo, desde que devidamente calibrados e revisados (Camargo *et al.*, 2023).

Foram conduzidas análises estatísticas comparativas aos dois métodos de medição considerando um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), levando-se em consideração as leituras realizadas em todos os tanques. As distribuições de temperatura para ambas as sondas passaram nos testes de normalidade e homogeneidade de variância. O teste t indicou que as médias de temperatura não são significativamente diferentes ($p=0,0738$), demonstrando concordância satisfatória. As distribuições de OD para ambos os dispositivos não passaram no teste de normalidade, mas apresentaram variâncias homogêneas. Mesmo assim, o teste t indicou

que as médias de OD são significativamente diferentes ao nível de 5% de confiança ($p<0,0001$). A divergência observada para OD pode estar relacionada a diferenças nos princípios de funcionamento dos sensores, na calibração dos equipamentos ou na sensibilidade às condições ambientais específicas do experimento, lembrando que a diferença se mostrou representativa em níveis mais baixos de OD. É importante ressaltar que é recomendado substituir anualmente a película fluorescente do sensor de OD microcontrolado (Shandong Renke, 2023). Como não foi possível fazer esta troca antes do experimento, é possível que essa condição pode estar associada à diferença detectada.

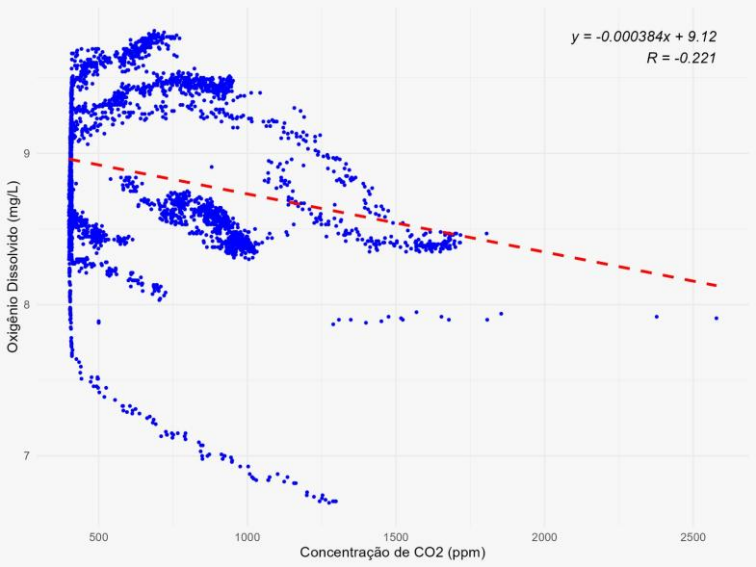
No que se refere à comparação de valores, não tivemos acesso ao valor de aquisição do equipamento comercial utilizado no experimento. Encontramos esta mesma sonda com valores entre US$ 180,00 e US$ 500,00 em páginas internacionais de venda de equipamentos usados, em junho de 2025. Equipamentos novos com a mesma função (OD e temperatura da água), foram encontrados no mercado brasileiro no mesmo período com valores entre R$ 3.282,00 e R$ 5.810,00. Se considerarmos sondas multiparamétricas que incluem mais parâmetros, como pH, os valores aumentam consideravelmente, entre R$ 5.940,00 e R$ 30.257,00. Estes valores mostram um custo benefício favorável à plataforma Pegad@. Além disso, há outros diferenciais operacionais do sistema microcontrolado, como a possibilidade de gerar gráficos em tempo real, de forma customizada, por meio da programação, funcionalidade não presente na sonda comercial.

3.4 Relações entre as leituras de Oxigênio Dissolvido, CO_2 e Temperatura da Água

Foi realizada uma análise das relações entre as leituras de OD, CO_2 e Temperatura, com base em dados experimentais coletados. Por meio de modelos de regressão linear, procurou-se identificar padrões e correlações entre essas variáveis, bem como a intensidade dessas interações, como a possível independência entre o OD e CO_2 no contexto estudado e a influência da temperatura ambiente na dinâmica do CO_2 e OD.

A Figura 13 mostra uma correlação fracamente negativa, indicando que altas concentrações de CO_2 estão ligeiramente associadas a menores níveis de OD, mas a relação é pouco significativa (R próximo de 0). A inclinação quase horizontal da reta reforça essa conclusão. Não há evidência forte de que o CO_2 afete diretamente o OD nos dados apresentados. Outras variáveis podem ser mais relevantes para explicar as variações de OD.

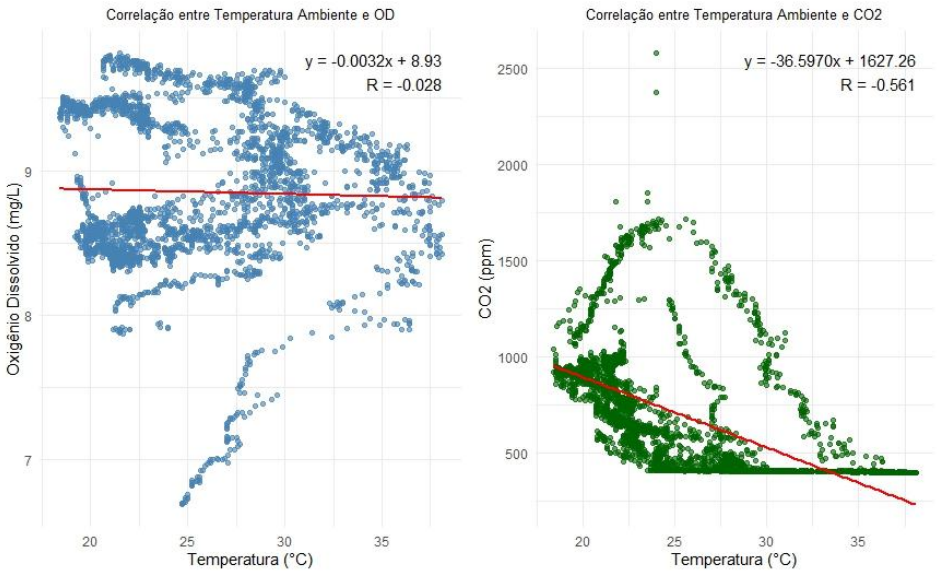
Figura 13. Correlação entre OD e CO_2.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

A Figura 14 indica que não há uma relação linear significativa entre o OD e a temperatura no intervalo estudado, haja vista que a correlação é quase nula (R≈0). A leve inclinação negativa sugere um efeito mínimo (se houver) da temperatura no OD. Quanto ao CO_2, há uma correlação moderadamente negativa, indicando que à medida que a temperatura aumenta, a concentração de CO_2 tende a diminuir.

Figura 14. Correlação da Temperatura Ambiente com OD e CO_2.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Embora os dados mostrem não haver correlação linear entre temperatura e OD, e uma correlação negativa entre temperatura e CO_2, é importante considerar que essas relações podem

variar conforme o contexto ambiental específico. Fatores como profundidade da água, presença de organismos fotossintetizantes, taxas de decomposição, níveis de pH, compostos carbonatados na água e outros parâmetros podem influenciar essas correlações, como apresentado em estudos citados na introdução. Portanto, é recomendável realizar análises adicionais, como testes de hipóteses e modelagem estatística, para compreender melhor essas dinâmicas em seu estudo específico. Também é importante ressaltar que as presentes comparações são realizadas em ambientes distintos, haja vista que o CO_2 medido é o do ambiente e não do corpo d'água, por conta do sensor utilizado, que é aderente à atual metodologia proposta. Evoluções na metodologia podem utilizar o sensoreamento do CO_2 dentro do corpo d'água.

Apenas para ilustrar essa diferença das condições da água na medições de CO_2 e OD, traçamos o gráfico das leituras efetuadas em duas situações distintas. A Figura 15a mostra as leituras nos tanques do experimento sobre alcalinidade, realizadas para comparação entre as sondas comercial e microcontrolada durante 4 dias. Já a Figura 15b mostra as leituras realizadas durante outros 4 dias no tanque utilizado para os testes de conectividade e acesso *on-line* da plataforma.

Vê-se na Figura15a um nível médio maior de OD e menor de CO_2 nos tanques, e um comportamento de alternância dos níveis durante os dias. Os tanques envolvidos nas medições da Figura 15a, um tanque a cada dia, tinham um mecanismo de aeração, e no tanque da Figura 15b não houve oxigenação forçada. A água com que foi alimentado o segundo tanque foi retirada de poço artesiano, enquanto a água dos primeiros tanques é proveniente do Lago Municipal de Toledo, potencialmente mais rica em organismos fotossintetizantes, como fitoplânctons.

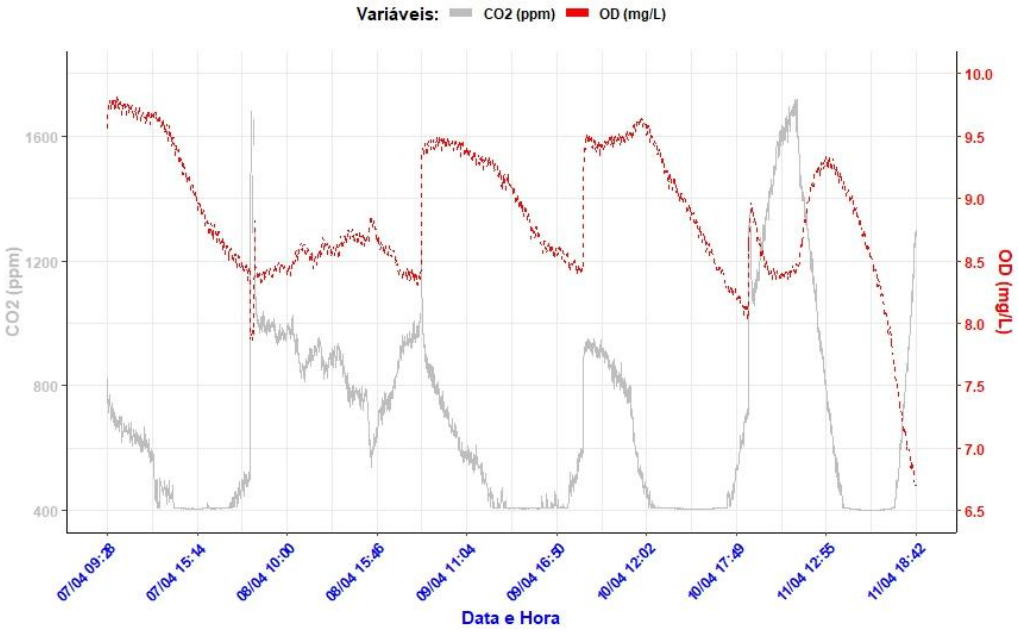
Apesar da densidade de estocagem nos tanques da Figura 15a ser consideravelmente superior, as condições limnológicas observadas nesses ambientes foram, de maneira geral, mais favoráveis. Ressalta-se que, embora os períodos de monitoramento pertençam a semanas distintas, as condições meteorológicas apresentaram-se semelhantes, com predominância de céu claro e elevada incidência solar. Como observações, o crescimento da curva de CO_2 na Figura 15b é quase contínuo, sendo interrompido apenas quando houve renovação do ar na cúpula da estufa por algum manejo no protótipo, enquanto vê-se na Figura 15a que os mínimos de leitura de CO_2 se dão sempre à tarde, momento de maior incidência de luz solar e potencialmente de fotossíntese na água.

Uma consideração relevante diz respeito aos níveis de CO_2 medidos na cúpula. Os índices máximos registrados indicam concentrações que potencialmente seriam letais para os peixes, mas refletem índices acumulados ao longo do tempo, que, em condições normais, teriam se dissipado ao ar livre. Esses resultados reforçam a necessidade de aprimorar a metodologia, especialmente no que tange à definição do tempo de medição e à liberação controlada dos gases, além de avaliar outros sensores de CO_2, tanto de superfície quanto submersos.

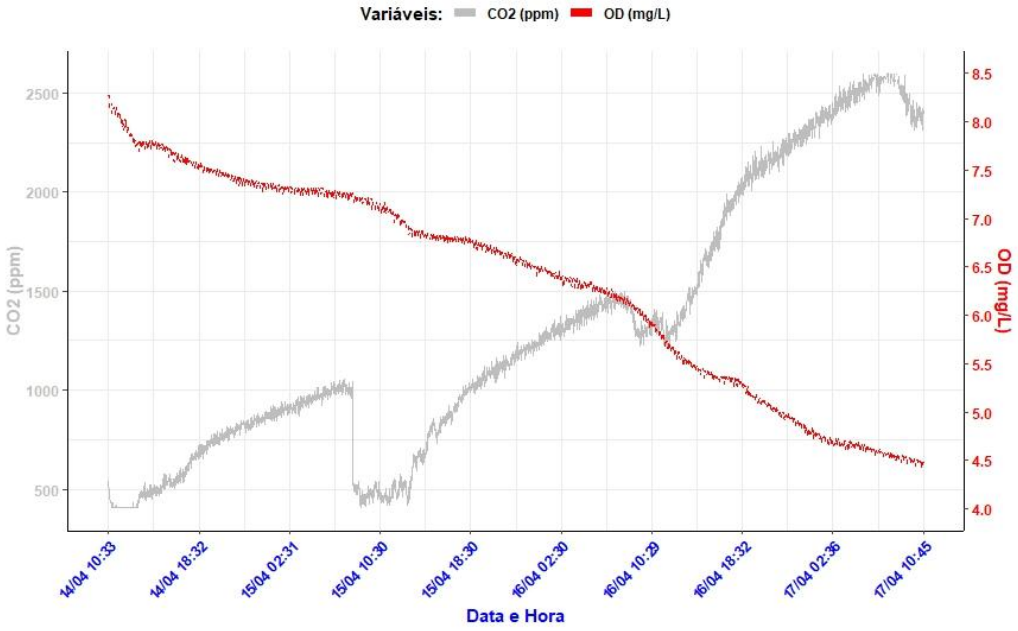
Assim, lembrando que os principais objetivos deste projeto estão associados à validação da plataforma desenvolvida, verifica-se uma limitação deste estudo no que se refere à captura dos níveis de CO_2 pela curta duração do experimento, associada ao número limitado de repetições, o que pode ter influenciado os resultados e sua representatividade. Portanto, destaca-se a relevância de realizar novos experimentos com períodos mais longos e maior número de repetições, permitindo a obtenção de dados mais robustos e confiáveis. Estudos conduzidos em um intervalo de tempo mais extenso possibilitam avaliar com maior precisão os efeitos estudados, considerando flutuações sazonais, variáveis ambientais e condições realistas que contribuam para conclusões mais abrangentes e fundamentadas.

Embora não tenha sido objetivo do estudo realizar comparações estatísticas, o perfil dos gráficos apresentados na Figura 15 evidencia a relevância do monitoramento contínuo e em tempo real desses parâmetros, apontando como a plataforma Pegad@ pode auxiliar fortemente no controle da variabilidade das condições de cultivo dos viveiros.

Figura 15. Leituras de CO_2 e OD nos diferentes tanques no decorrer do tempo.



(15a) Tanques com Tilápias e Água do Lago



(15b) Tanque com Lambaris e Água do Poço

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

4. CONCLUSÃO

Este capítulo detalhou o processo de desenvolvimento e validação da plataforma Pegad@, uma solução multiparamétrica aberta para monitoramento da qualidade da água e estimativa da concentração de dióxido de carbono em viveiros de piscicultura. O protótipo, baseado em microcontrolador ESP32 e sensores de baixo custo, demonstrou ser uma ferramenta

eficaz para a coleta e exibição dos dados em tempo real, integrando as medições de CO_2, OD, temperatura da água, bem como a temperatura ambiente.

A comparação entre os sensores da plataforma e sondas comerciais revelou que, embora existam diferenças sistemáticas, especialmente em baixas concentrações de OD, os dispositivos de baixo custo apresentaram desempenho satisfatório para aplicações práticas, desde que devidamente calibrados.

A implementação de um banco de dados em nuvem e um aplicativo para acesso remoto permitem o monitoramento contínuo e a visualização dos dados em tempo real, validando a viabilidade da plataforma como ferramenta de pesquisa e gestão aquícola. A arquitetura modular e de código aberto facilita futuras adaptações nesta plataforma de IoT, como a inclusão de novos sensores ou a aplicação de técnicas de IA para análise preditiva.

Além disso, os resultados obtidos evidenciaram uma correlação negativa entre CO_2 e OD, com flutuações mais acentuadas durante a noite, corroborando estudos prévios sobre a dinâmica desses gases em ambientes aquícolas, em que pese ser necessário uma experimentação mais prolongada, com mais repetições, e em ambientes diferentes para validar estes resultados, haja vista que neste projeto o foco maior estava no desenvolvimento da plataforma.

Em síntese, a proposta da plataforma Pegad@ representa um avanço no monitoramento automatizado para viveiros, alinhando-se aos princípios da Aquicultura 4.0. Seu caráter acessível e replicável, por contemplar tecnologias abertas e de baixo custo, a torna uma solução promissora para pesquisadores e produtores, contribuindo para práticas mais sustentáveis e eficientes na piscicultura.

5. TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos nesta pesquisa apontam para diversas oportunidades de investigação futura. Primeiramente, a incorporação de sensores de baixo custo para monitoramento de outras variáveis ambientais relevantes, como pH, amônia e CO_2 submerso, expandiria as capacidades de análise ambiental do protótipo desenvolvido.

Embora o sistema proposto seja modular e de arquitetura aberta visando justamente sua escalabilidade e facilitando futuras expansões, recomenda-se o desenvolvimento de um suporte impresso em 3D para acomodação adequada dos sensores e microcontrolador. Esta solução proporcionaria melhor organização e proteção dos componentes eletrônicos, além de facilitar a manutenção e substituição de elementos do sistema.

Do ponto de vista metodológico, sugere-se a implementação de um mecanismo automatizado para liberar periodicamente os gases da estufa de forma a criar uma mensuração mais precisa da concentração de CO_2 neste ambiente ao redor do tempo, correlacionando estes dados com a densidade populacional e biomassa dos peixes nos tanques. Esta abordagem permitiria o desenvolvimento de uma metodologia mais robusta para quantificação da pegada de carbono do sistema produtivo.

Por fim, a operação contínua deste sistema em uma estação de pesquisa por período prolongado possibilitaria a construção de uma base de dados consistente e abrangente. Este conjunto de dados históricos viabilizaria estudos científicos mais aprofundados e análises estatísticas que contribuam para o avanço do conhecimento na área.

REFERÊNCIAS

Abd El-Hack, M. E., El-Saadony, M. T., Nader, M. M., Salem, H. M., El-Tahan, A. M., Soliman, S. M., & Khafaga, A. F. (2022). Effect of environmental factors on growth performance of Nile tilapia (Oreochromis niloticus). International Journal of Biometeorology, 66(11), 2183-2194.

Bartzdev. (2025). RenkeDissolvedOxygenSensor. Disponível em: https://github.com/bartzdev/Renke_DissolvedOxygen_Sensor. Acesso em: 27 mar 2025.

Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (2012). Pond aquaculture water quality management. Springer Science & Business Media.

Boyd, C. E. (2018). Aquaculture pond fertilization. *CABI Reviews*, 1-12.

Camargo, E. T. de, Spanhol, F. A., Slongo, J. S., da Silva, M. V. R., Pazinato, J., de Lima Lobo, A. V., ... & Martins, L. D. (2023). Low-cost water quality sensors for IoT: A systematic review. Sensors, 23(9), 4424.

DM1CR Electronics. (2021) CO_2 Sensor Comparison: SCD30, MH-Z19B, BME680, VZ89TE, SGP30. DM1CR Electronics Blog. Disponível em: https://dm1cr.de/co2-sensor-comparison-scd30-mh-z19b-bme680-vz89te-sgp30. Acesso em: 10 mar 2025.

Dubey, Ravish; Telles, Arina; Nikkel, James; Cao, Chang; Gewirtzman, Jonathan; Raymond, Peter A.; Lee, Xuhui. (2024). Low-Cost CO_2 NDIR Sensors: performance evaluation and calibration using machine learning techniques. Sensors, [S.L.], v. 24, n. 17, p. 5675.

Elnady, M. A., Elwahed, R. K., & Gad, G. H. (2017). Evaluating oxygen dynamics, water quality parameters and growth performance of Nile tilapia by applying different dietary nitrogen levels. Journal of American Science, 13(1).

Erriez. (2025). ErriezMHZ19B. Disponível em: https://github.com/Erriez/ErriezMHZ19B. Acesso em: 05 abr 2025.

Eze, E., & Ajmal, T. (2020). Dissolved oxygen forecasting in aquaculture: A hybrid model approach. Applied Sciences, 10(20), 7079.

Gao, Guandong; Xiao, Ke; Chen, Miaomiao. (2019). An intelligent IoT-based control and traceability system to forecast and maintain water quality in freshwater fish farms. Computers And Electronics In Agriculture, [S.L.], v. 166, p. 105013.

Hamad, A. M., Handeland, S. O., Karlsen, Ø., & Jørgensen, E. H. (2023). Individual and combined effects of hypoxia and hypercapnia on feeding and feed utilization in Nile tilapia (Oreochromis niloticus). Aquaculture, 570, 739395.

Huang, Y.-P.; Khabusi, S.P. (2025). Artificial Intelligence of Things (AioT) Advances in Aquaculture: A Review. Processes 2025, 13, 73.

Khanna, Harshit; Fan, Y.W.; Chan, S.N. (2022). Automated Secchi disk depth measurement based on artificial intelligence object recognition. Marine Pollution Bulletin, v. 185, 2022, p. 114378. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114378. Acesso em: 15 ago. 2024.

Liu, Chien-Sheng; Chen, Xin-Ting; Shih, Wen-Yu; Lin, Chia-Chen; Yen, Jung-Hong; Huang, Chung-Jui; Yen, Yu-Teng. (2023). Smart Water Quality Monitoring Technology for Fish Farms Using Cellphone Camera Sensor. Sensors and Materials, v. 35, n. 8, p. 3019-3029. Disponível em: https://doi.org/10.18494/SAM4513. Acesso em: 15 ago. 2024.

Macedo, Humberto Rodrigues. (2025). Desenvolvimento de sistema eletrônico e metodologia para estimar a concentração de dióxido de carbono em viveiros escavados. 2025. 75 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo-PR.

Macedo, H. R., Luiz Junior, O. J., Werneck, P. R., & Feiden, A. (2024). Carbon footprint and automation in aquaculture. Revista de Gestão Social e Ambiental, 18(11), 1-15.

Mercante, C. T. J., Martins, Y. K., Carmo, C. F. do, Osti, J. S., Pinto, C. S. R. M., & Tucci, A. (2007). Qualidade da água em viveiro de Tilápia do Nilo (Oreochromis niloticus): caracterização diurna de variáveis físicas, químicas e biológicas, São Paulo, Brasil. Bioikos, 21(2). Recuperado de https://periodicos.puc-campinas.edu.br/bioikos/article/view/843.

Mostafa, T.; Youssief, N.; Labib, H.; ElSabry, E. (2024). Impact of IOT Technology on Aquaculture Industry. Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries, v. 28, n. 5, p. 1281–1297.

Mota, V. C., Nilsen, T. O., Gerwins, J., Gallo, M., Ytteborg, E., Baeverfjord, G., ... & Terjesen, B. F. (2019). The effects of carbon dioxide on growth performance, welfare, and health of Atlantic salmon post-smolt (Salmo salar) in recirculating aquaculture systems. Aquaculture, 498, 578-586.

Odeniran, Q. (2023). Comparative analysis of fullstack development technologies: Frontend, backend and database (dissertação de mestrado, Georgia Southern University). Electronic Theses and Dissertations, 2663. https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/etd/2663

Parra, L., Sendra, S., García, L., & Lloret, J. (2018). Design and deployment of low-cost sensors for monitoring the water quality and fish behavior in aquaculture tanks during the feeding process. Sensors, 18(3), 750.

R CORE TEAM. R. (2022). A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/.

Rodrigues, C. J., Mercante, C. T. J., Carmo, C. F. D., Tucci, A., Osti, J. A. S., & Genaro, A. C. D. (2010). Diurnal dynamic of inorganic carbon and oxygen dissolved in a Nile tilapia (Oreochromis niloticus Linnaeus, 1758) fish pond, São Paulo, Brasil. Acta Limnologica Brasiliensia, 22, 466-473.

Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. (2019). Piscicultura: Manejo da qualidade da água (Coleção SENAR, nº 262). SENAR.

Sensor One-Stop, China. (2024). A Comparative Analysis of NDIR, Semiconductor, and Thermal Conductor CO_2 Sensors. Disponível em: https://sensor1stop.com/knowledge/analysis-of-ndir-semiconductor-and-thermal-conductor-co2-sensors/. Acesso em: 10 fev 2025.

Shandong Renke Control Technology (2023). RS-LDO-N01-1 Fluorescence Dissolved Oxygen Transmitter: User manual, Version: 2.0.

Siam, Shakhrul Iman; Ahn, Hyunho; Liu, Li; Alam, Samiul; Shen, Hui; Cao, Zhichao; Shroff, Ness; Krishnamachari, Bhaskar; Srivastava, Mani; Zhang, Mi. (2024) Artificial Intelligence of Things: a survey. Acm Transactions On Sensor Networks, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 1-75, 27 jan. 2025.

Supabase. (2023). Supabase documentation: The open source Firebase alternative. https://supabase.com/docs. Acesso em: 06 abr. 2025.

ThingsBoard. (2025). IoT dashboard features. https://thingsboard.io/features/dashboards. Acesso em: 28 mar 2025.

Tina, F.W.; Afsarimanesh, N.; Nag, A.; Alahi, M.E.E. (2025). Integrating AIoT Technologies in Aquaculture: A Systematic Review. Future Internet 2025, 17, 199.

Valenti, Wagner C.; Barros, Helenice P.; Moraes-Valenti, Patricia; Bueno, Guilherme W.; Cavalli, Ronaldo O. (2021). Aquaculture in Brazil: past, present and future. Aquaculture Reports, [S.L.], v. 19, p. 100611.

Wei, Yaoguang; Jiao, Yisha; An, Dong; Li, Daoliang; Li, Wenshu; Wei, Qiong (2019). Review of Dissolved Oxygen Detection Technology: from laboratory analysis to online intelligent detection. Sensors, [S.L.], v. 19, n. 18, p. 3995.

Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York, 2016. https://ggplot2.tidyverse.org.

Yigitbasioglu, O. M., & Velcu, O. (2012). A review of dashboards in performance management. International Journal of Accounting Information Systems, 13(1), 41-59.

YSI Environmental. (2006). YSI 550A dissolved oxygen instrument: Operations manual (Rev. B). YSI Incorporated.

CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo central o desenvolvimento e a validação de uma plataforma multiparamétrica aberta, denominada Pegad@, destinada ao monitoramento automatizado da qualidade da água e da concentração de CO_2 em sistemas de piscicultura em viveiros escavados, aprimorando a proposta de Macedo (2025). A proposta inseriu-se no contexto da Aquicultura 4.0, integrando sensores de baixo custo, microcontroladores e conectividade em nuvem, e buscando contribuir para o estudo da pegada de carbono na atividade aquícola. A investigação foi estruturada em três frentes: um estudo bibliométrico sobre a pegada de carbono na aquicultura; uma análise sistemática das TIC com foco em IoT aplicadas ao monitoramento da piscicultura; e o desenvolvimento prático e a validação do protótipo Pegad@.

Contribuições do trabalho

A principal contribuição desta pesquisa reside na concepção de uma solução tecnológica acessível, replicável e alinhada aos preceitos de sustentabilidade e inovação tecnológica. O sistema Pegad@ revelou-se funcional para o monitoramento em tempo real de variáveis críticas à piscicultura, como temperatura, oxigênio dissolvido e dióxido de carbono, e a relação entre elas, o que representa um avanço, especialmente no que se refere à escassa literatura e prática de mensuração contínua de CO_2 no setor.

Além disso, propõe um modelo de baixo custo que pode ser adotado por pequenos e médios produtores, haja vista que a validação prática do protótipo confirmou sua eficácia na coleta de dados em tempo real e na visualização remota, oferecendo uma base robusta para a tomada de decisões.

A arquitetura modular e de código aberto da Pegad@ fomenta a colaboração e facilita futuras expansões, como a incorporação de novos sensores e a integração com técnicas de Inteligência Artificial das Coisas, pavimentando o caminho para análises preditivas e uma gestão mais eficiente e ambientalmente responsável na piscicultura.

Limitações e Perspectivas Futuras

Os resultados deste trabalho indicam oportunidades para evoluir a plataforma Pegad@, ampliando seu alcance na aquicultura.

Para aprimorar o protótipo em busca de uma ferramenta para quantificar a pegada de carbono da produção com este sensor de CO_2, propõe-se automatizar a liberação periódica de gases acumulados pelo protótipo, permitindo correlacionar diretamente as emissões de CO_2 com os novos parâmetros capturados e com a biomassa dos peixes.

Um avanço seria a integração de sensores de baixo custo para monitorar parâmetros ambientais adicionais, como pH e amônia, complementando a análise da qualidade da água. Embora demande maior investimento, a incorporação de um sensor de CO_2 submerso proporcionaria análises mais completas no protótipo.

O desenvolvimento de um suporte físico otimizado para acomodar os sensores e o microcontrolador de forma mais organizada e protegida, possivelmente impresso em 3D, facilitaria a instalação, manutenção e durabilidade do protótipo em campo.

Sugere-se validar a plataforma em diferentes ambientes aquícolas, de pesquisa ou produção, para a consolidação da solução. Essa abordagem, combinada com uma operação mais contínua, geraria dados consistentes para alimentar modelos preditivos de IA, alavancando pesquisas e soluções para tomada de decisões autônomas na aquicultura.

Considerações Finais

O presente trabalho culminou no desenvolvimento e validação da plataforma multiparamétrica aberta Pegad@, um avanço significativo para o monitoramento automatizado da qualidade da água e da concentração de CO_2 em sistemas de piscicultura. Alinhada aos princípios da Aquicultura 4.0, esta tese abordou a lacuna na literatura sobre a pegada de carbono e o monitoramento de CO_2 em ambientes aquícolas, conforme identificado nos estudos bibliométricos e de revisão. O protótipo Pegad@ demonstrou ser funcional, replicável e economicamente viável, utilizando sensores de baixo custo e conectividade em nuvem para fornecer dados em tempo real. Os resultados confirmaram a correlação inversa entre CO_2 e oxigênio dissolvido, especialmente durante a noite, e validaram a eficácia dos sensores de baixo custo para aplicações práticas, apesar de pequenas variações em comparação com equipamentos comerciais. A arquitetura modular e de código aberto da plataforma permite integração com tecnologias emergentes, facilitando futuras expansões. A proposta não só preenche uma lacuna científica, mas também oferece uma ferramenta acessível para pesquisadores e produtores, impulsionando práticas mais sustentáveis e eficientes na aquicultura.

Ponderações

A filosofia de tecnologias abertas adotada neste trabalho, com o uso de *hardware* e *software* de código aberto, é uma reflexão sobre o poder da democratização do conhecimento e da inovação. Ao tornar a tecnologia acessível e replicável, fomenta-se uma comunidade de prática onde a colaboração e o aprimoramento contínuo são incentivados, acelerando o desenvolvimento de soluções adaptadas às realidades locais.

A colaboração entre áreas tão distintas como a engenharia de pesca, a ciência da computação, a eletrônica e outras, foi fundamental para o sucesso deste projeto, evidenciando que as melhores soluções surgem da combinação de diferentes conhecimentos.

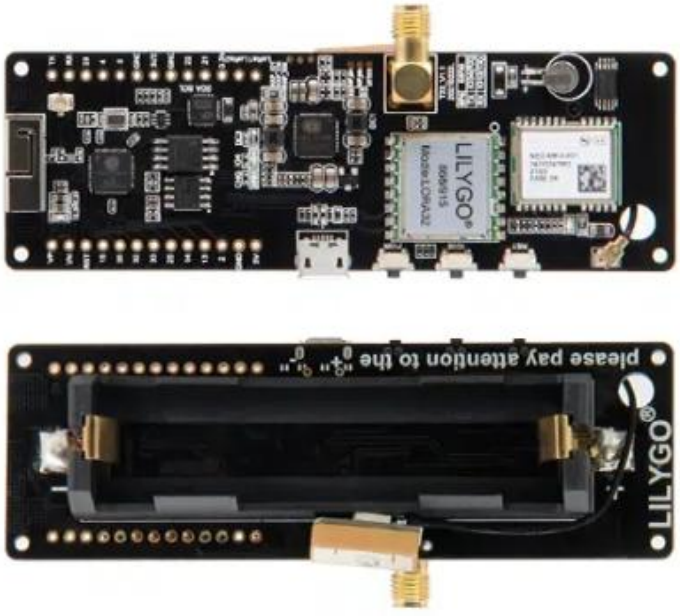
APÊNDICE A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS

Este projeto utiliza um conjunto de módulos microcontrolados e sensores para criar um protótipo capaz de medir parâmetros de qualidade da água e do ambiente. Este documento detalha as especificações técnicas, funcionalidades e vantagens de cada componente, destacando suas faixas de operação.

1. MICROCONTROLADOR

Como controlador do projeto foi escolhido um módulo microcontrolador ESP32 que possui recursos voltados à criação de aplicações de Internet das Coisas - IoT. O módulo ESP32 é conhecido por sua robustez e eficiência energética, integrando um microcontrolador de 32 bits numa placa de pequena dimensão e peso, exibida na Figura 1. Uma das grandes vantagens deste módulo é o fato dele possuir conectividade WiFi e Bluetooth integrados, além de suporte adicional a LoRa (Long Range). O ESP32 já é projetado para funcionar com eficiência de consumo graças a recursos avançados de gerenciamento de energia, e este modelo possui ainda um suporte para bateria removível que simplifica a criação de aplicações móveis e autônomas, na eventual ausência de fornecimento de energia pela rede no local dos experimentos.

Figura 1. Placa ESP32 TTGO T-Beam com Suporte de Bateria.



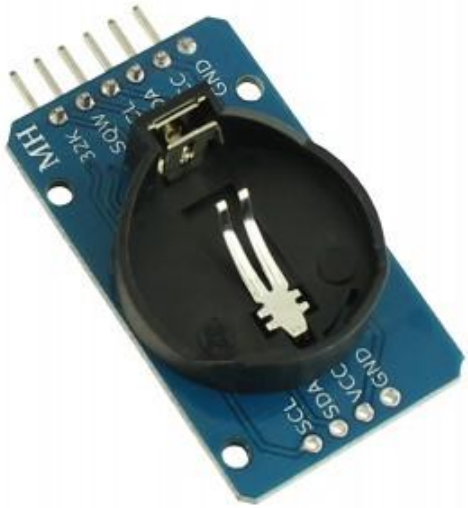
Fonte: Makerhero (2025).

Outra característica importante é a disponibilidade de portas de conexão com dispositivos, sejam sensores ou atuadores, em uma quantidade inferior a algumas placas, como da família Arduino, mas suficientes para viabilizar uma quantidade adequada de componentes que operacionalizem uma estação multiparamétrica. Mais uma funcionalidade que pode estender as características deste microcontrolador é a integração com tecnologias de geolocalização, por meio do módulo GPS presente na placa (Espressif, 2025).

2. MÓDULO DE RELÓGIO DE TEMPO REAL (RTC)

A aplicação do Módulo Relógio Tempo Real DS3231 (*Real Time Clock* ou RTC), Figura 2, é conectar-se em placas microcontroladoras com a função de registrar e controlar as datas e o tempo corretos, registros utilizados por meio de programação específica de acordo com a necessidade do projeto.

Figura 2. Módulo de Real Time Clock DS3231.



Fonte: Usinainfo (2025b).

O Módulo possui um compartimento para uma bateria de lítio 2032, de 3 Volts, que permite que o mesmo continue em operação mesmo diante da falta de energia na placa microcontroladora (Analog Devices, 2015).

3. MÓDULO GRAVADOR DE CARTÃO MICRO SD

Este componente permite a gravação de dados em cartões eletrônicos de dados do tipo Micro SD (Figura 3), sendo uma solução para armazenamento de informações em projetos que exigem registro de dados, como logs de eventos e leituras de sensores.

Figura 3. Módulo Micro SD Card.

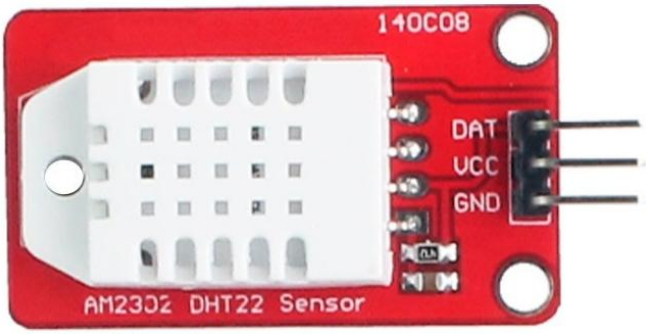
Fonte: Usinainfo (2025a).

Em caso de falta de energia, os dados armazenados no cartão Micro SD permanecem seguros, garantindo a integridade das informações, permitindo criar o que chamamos de *Data Logger*. Assim, mesmo em protótipos que transmitem suas informações em tempo real, é uma solução de redundância para uma eventual falta de comunicação, tornando-se um mecanismo de *backup* das informações.

4. SENSOR DE TEMPERATURA E UMIDADE

Para a mensuração da temperatura ambiente, externa à estufa, foi incluído o módulo DHT22, que é um sensor digital de temperatura e umidade relativa do ar (Figura 4). É um sensor de pequena dimensão, com um tempo de resposta rápido, com aproximadamente 2 segundos para alterações de temperatura e umidade, dependendo das condições ambientais.

Figura 4. Módulo sensor de Temperatura e Umidade DHT22.



Fonte: Usinainfo (2025c).

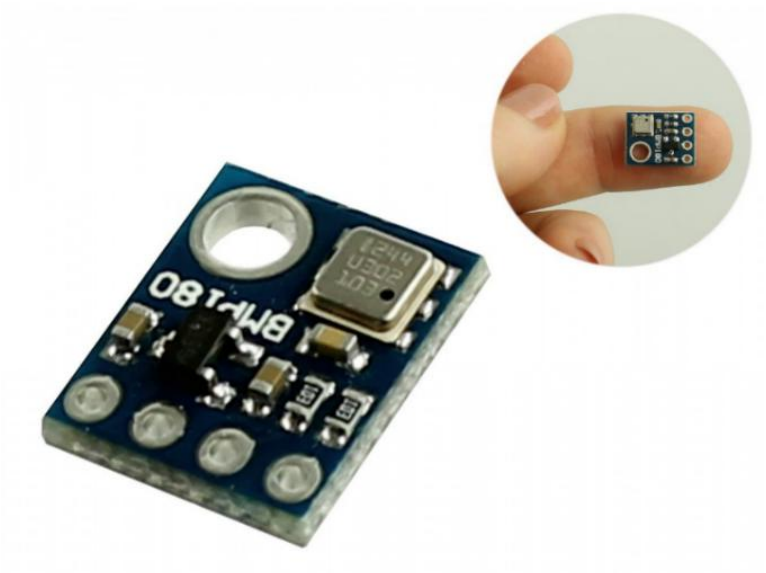
A especificação do sensor possibilita medir temperaturas de -40 a 80°C, com uma precisão de ± 0,5°C, e umidade de 0 a 100%, com precisão de ± 2% e, conforme o fabricante,

a calibração de fábrica assegura medições confiáveis sem ajustes adicionais (Aosong Eletronics, 2023).

5. SENSOR DE TEMPERATURA, ALTITUDE E PRESSÃO

O BMP180 é um sensor de temperatura de pequena dimensão (Figura 5), precisão e baixo consumo de energia, utilizado para medir a temperatura dentro da estufa. É um sensor que também mede a pressão barométrica e estima a altitude a partir das medições de pressão e temperatura.

Figura 5. Sensor de temperatura e pressão BMP180.



Fonte: Usinainfo (2025e).

Sua documentação (Bosch Sensortec, 2013) informa que a faixa de leitura está compreendida entre temperaturas de 0°C a 85°C, com precisão de ± 1%. Quanto à pressão barométrica, a faixa está entre 300 hPa e 1.100 hPa (hectopascais), com precisão de aproximadamente ± 0.12 hPa.

6. SENSOR DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO E TEMPERATURA DA ÁGUA

Trata-se de um sensor analógico projetado para medir a concentração de oxigênio dissolvido (OD) em soluções líquidas, baseado no princípio de fluorescência, não consumindo oxigênio nem eletrólito (Figura 6). Utiliza uma interface RS485 com protocolo Modbus RTU para conexão com o microcontrolador por meio de uma placa controladora TTL.

Figura 6. Sensor de oxigênio dissolvido e temperatura RS-LDO-N01.

Fonte: Module More (2025), modificada pelo autor.

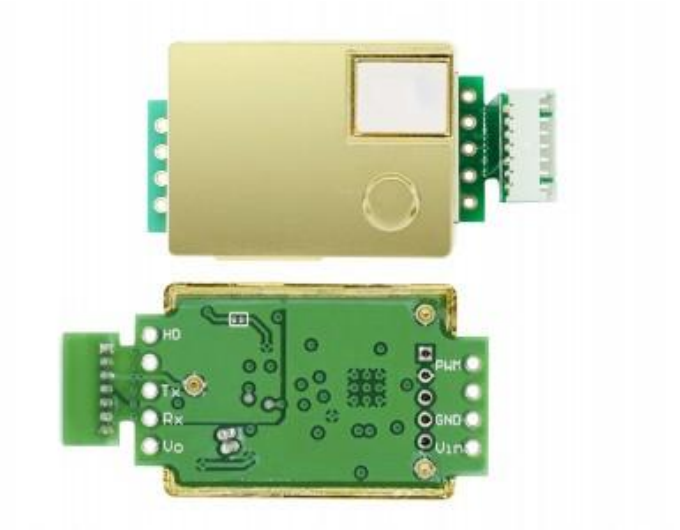
Mede a temperatura em graus Celsius e a concentração de OD expressa em mg/L (miligramas por litro) ou ppm (partes por milhão). Sua faixa de medição típica mede concentrações de OD variando de 0 a 20 mg/L, ou 0% a 200% de saturação. Alcança uma precisão de ±0,3 mg/L e ±0,5ºC, dependendo das condições de operação. Ainda segundo o material técnico, a resolução das leituras é de 0,01 mg/L e 0,1°C e o tempo de resposta menor que 60 segundos (Shandong Renke, 2023).

7. SENSOR DE CO_2

O sensor utilizado para mensurar a concentração de gás carbônico na estufa em ppm (partes por milhão), foi o modelo MH-Z19B (Figura 7). É um sensor de dióxido de carbono (CO_2) baseado na tecnologia de absorção infravermelha não dispersiva (NDIR) para medir concentrações de CO_2 em tempo real.

Sua faixa de medição é de 0 a 5000 ppm, com precisão de ±50 ppm + 5% da leitura. O tempo de resposta é menor ou igual a 120 segundos. Realiza calibração automática para garantir medições consistentes ao longo do tempo (Zhengzhou Winsen, 2015).

Figura 7. Sensor de Dióxido de Carbono MH-Z19B

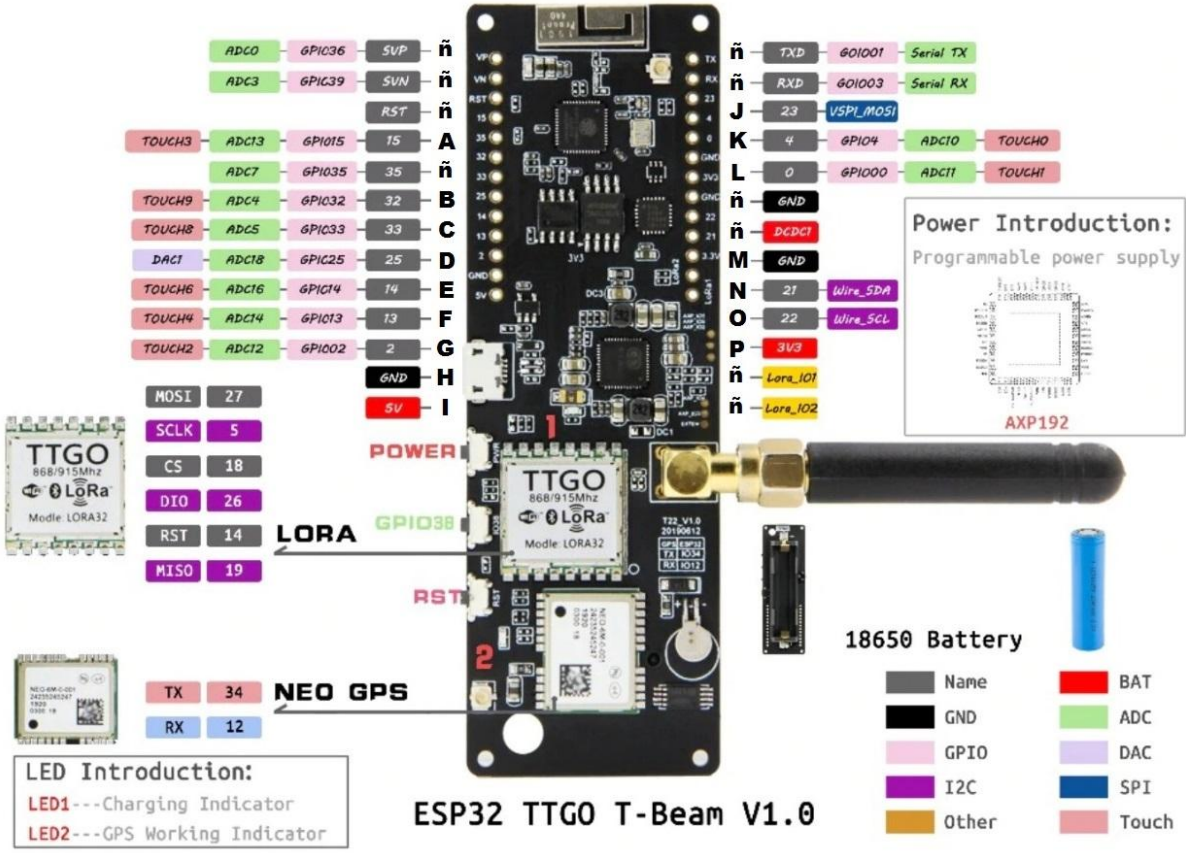


Fonte: Usinainfo (2025d).

8. DIAGRAMA DE UTILIZAÇÃO DOS PINOS NO MICROCONTROLADOR

A documentação precisa dos pinos utilizados no ESP32 que controla o projeto é importante para garantir a reprodutibilidade, manutenção e escalabilidade para os pesquisadores que queiram utilizar a solução. Saber em quais pinos estão conectados os sensores e atuadores evita conflitos de hardware, simplifica a depuração e facilita futuras modificações, principalmente para profissionais que não são experientes na construção de circuitos, como pode ocorrer em projetos multidisciplinares. Além disso, uma descrição clara das conexões — seja em tabelas, diagramas ou comentários no código — poupa tempo na replicação do projeto e reduz erros de implementação. Para cumprir essa finalidade, a Figura 8 registra as conexões utilizadas neste projeto, fazendo a ligação entre o microcontrolador com os sensores e outros dispositivos.

Figura 8. Esquema de uso dos pinos do ESP32 no protótipo



Legenda	Pino do ESP32	Dispositivo Conectado	Pino do Dispositivo
A	15	DHT22	DAT
B	32	MH-Z19B	RX
C	33	MH-Z19B	TX
D	25	SD Reader	CS
E	14	TTL	DI
F	13	TTL	RO
G	2	TTL	DE_RE
H	GND	barra de aterramento 5V	DHT22, MH-Z19B, SD e TTL
I	5V	barra de alimentação 5V	DHT22, MH-Z19B, SD e TTL
J	23	SD Reader	MISO
K	4	SD Reader	MOSI
L	0	SD Reader	SCK
M	GND	barra de aterramento 3V	RTC e BMP180
N	22	RTC e BMP180	SCL
O	21	RTC e BMP180	SDA
P	3V	barra de alimentação 3V	RTC e BMP180

ñ	**pinos não utilizados**	**- * -**	**- * -**

Fonte: LiliGO (2024), modificado pelo autor (2025).

REFERÊNCIAS

Analog Devices (2015). Data sheet DS3231, Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal, Revision 10.

Aosong Eletronics (2023). DHT22, Temperature and humidity module AM2302 Product Manual, Revision 10.

Bosch Sensortec (2013). Data sheet BMP180 Digital pressure sensor, BST-BMP180-DS000-09. Revision 2.5.

Espressif (2025). ESP32-WROOM-32 Datasheet, Version 3.5.

LiliGO (2024). TTGO-T-Beam. Disponível em: https://github.com/LilyGO/TTGO-T-Beam. Acesso em: 15 set 2024.

Makerhero (2025). Módulo WiFi ESP32 com suporte de bateria, GPS e LoRa 915MHz. [Fotografia]. Disponível em: https://www.makerhero.com/produto/modulo-wifi-esp32-com-suporte-de-bateria-gps-e-lora-915mhz/. Acesso em: 20 fev. 2025.

Module More (2025). Analog Dissolved Oxygen Sensor / Meter Kit for Arduino. [Fotografia]. Disponível em: https://www.modulemore.com/en/product/2627/do-sensor-water-rs-ldo-n01-2-20-dissolved-oxygen-sensor-output. Acesso em: 21 abr. 2025.

Shandong Renke Control Technology (2023). RS-LDO-N01-1 Fluorescence Dissolved Oxygen Transmitter: User manual, Version: 2.0.

Usinainfo (2025). Módulo Micro SD Card DS3231. [Fotografia]. Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/outros-modulos-arduino/sd-card-para-arduino-leitor-micro-sd-card-2637.html. Acesso em: 20 fev. 2025.

Usinainfo (2025). Módulo Relógio Tempo Real RTC com Sensor de Temperatura DS3231. [Fotografia]. Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/rtc-arduino/modulo-relogio-tempo-real-rtc-com-sensor-de-temperatura-ds3231-4674.html. Acesso em: 20 fev. 2025.

Usinainfo (2025). Módulo Sensor de Umidade e Temperatura AM2302 DHT22. [Fotografia]. Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-umidade-arduino/modulo-sensor-de-umidade-e-temperatura-am2302-dht22-40-a-80c-4613.html. Acesso em: 20 fev. 2025.

Usinainfo (2025). Sensor de CO_2 MH-Z19B infravermelho. [Fotografia]. Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-gas-arduino/sensor-de-co2-mh-z19b-infravermelho-5000ppm-cabo-6089.html. Acesso em: 21 fev. 2025.

Usinainfo (2025). Sensor de Pressão e Temperatura BMP180. [Fotografia]. Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-pressao-arduino/sensor-de-pressao-e-temperatura-bmp180-3411.html. Acesso em: 20 fev. 2025.

Zhengzhou Winsen Electronics Technology (2015). Sensor Intelligent Infrared CO_2 Module: Model MH-Z19 User's Manual. Version: 1.0.

APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR

```
// Módulos e bibliotecas do sistema
#include "sdcard.h"
#include "datetime.h"
#include "WiFiClientSecure.h"
#include "PubSubClient.h"
#include "sensor_dht22.h"
#include "sensor_co2.h"
#include "sensor_bmp180.h"
#include "bancodados_nuvem.h"
#include <WiFi.h>
#include <WiFiClientSecure.h>
#include <PubSubClient.h>

// Configurações do Thingsboard
const char* thingsboardServer = "mqtt.thingsboard.cloud";
const char* token = "Modificado Por Sigilo";
WiFiClientSecure espClient;
PubSubClient client(espClient);

// Configurações do Sensor de OD
#include <SoftwareSerial.h>
#include <RenkeDissolvedOxygenSensor.h>
#define DI_PIN 14 //DRIVER INPUT (MODULE RX PIN)
#define DE_RE_PIN 2 //DRIVER/RECEIVER ENABLE INPUT/OUTPUT
#define RO_PIN 13 //RECEIVER OUTPUT (MODULE TX PIN)
SoftwareSerial modbusSerial(RO_PIN, DI_PIN);  //rx, tx
RDOSensor doSensor(&modbusSerial, DE_RE_PIN);
double cOD = 0.0;
double sOD = 0.0;
double temperaturaOD = 0.0;

// Parâmetros da Conexão Wifi
String nomeWifi = "Modificado Por Sigilo"; // SSID da WiFi a ser utilizada
byte mac[6];  // Guardar o MAC address do WiFi, para cadastro na rede

int minutosEntreLeituras = 1; // padrão = 5 min;
bool prontoParaLeitura = false;

void setup() {
        // Conexão Serial
        Serial.begin(9600);  // Monitor Serial
        Serial.println("-----------------------------------");
        Serial.println("Setup iniciado...");
        modbusSerial.begin(4800);  // Conexão servidor de OD

        // Conexão Wifi
        Serial.print("Tentando conexão com WiFi");
        WiFi.begin(nomeWifi);
        while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
                delay(1000);
                Serial.print(".");
        }
        Serial.println("");
        Serial.println("WiFi Conectado na rede "+nomeWifi);
        // Construindo o MAC Address do adaptador WiFi
```

```
        WiFi.macAddress(mac);
        Serial.print("MAC Address da WiFi: ");
        Serial.print(mac[0],HEX); Serial.print(":");
        Serial.print(mac[1],HEX); Serial.print(":");
        Serial.print(mac[2],HEX); Serial.print(":");
        Serial.print(mac[3],HEX); Serial.print(":");
        Serial.print(mac[4],HEX); Serial.print(":");
        Serial.println(mac[5],HEX);
        // Apresenta o IP Address recebido pelo adaptador WiFi
        Serial.print("Endereço de IP recebido pelo dispositivo: ");
        Serial.println(WiFi.localIP());

        // Conecta MQTT do ThingsBoard
        espClient.setInsecure(); // Ignora certificado (para testes)
        client.setServer(thingsboardServer, 8883);
        connectMQTT();

        // Chamada das funções de inicialização dos dispositivos
        if (getMinute() % minutosEntreLeituras == 0) {
                prontoParaLeitura = true;
                initCloudDatabase();
                initRTC();
                initSDCard();
                initCO2();
                initOD();
                initDHT22();
                initBMP180();
        } else {
                prontoParaLeitura = false;
        }
        Serial.println("Setup finalizado! Leituras serão realizadas a cada "
                        + String(minutosEntreLeituras) + " minuto(s).");
        delay(10000);
}


void loop() {
        // Conexão com o servidor ThingsBoard
        if (!client.connected()) {
                connectMQTT();
        }
        client.loop();

        // Realiza a leitura dos sensores
        if (prontoParaLeitura) {
                Serial.println("-------------------------------------");
                Serial.println("Realizando leituras...");

                // Lê RTC
                String dataHora = getFormatedDateTime();
                // Lê sensor DHT22
                double temperaturaDHT = readTemperatureDHT22();
                double umidade = readHumidityDHT22();
                // Lê sensor BMP180
                double temperaturaBMP = readTemperatureBMP180();
                double pressao = readPressure();
                double altitude = readAltitude();
                // Lê sensor MH-Z19B
                int co2 = readCO2();
```

```
                // Lê sensor OD
                if (doSensor.readSensorData()) {
                        cOD = doSensor.getOxygenConcentration();
                        temperaturaOD = doSensor.getTemperature();
                }


                // Mostra leituras no Monitor Serial
                Serial.println("Data e Hora: " + getFormatedDateTime());
                        Serial.println("Temperatura Interna (BMP): " +
                        String(temperaturaBMP)
                        + "ºC; Pressão Barométrica: " + String(pressao)
                        + "Pa; Altitude: " + String(altitude) + "m; ");
                Serial.println("Temperatura Externa (DHT): " +
                        String(temperaturaDHT)
                        + "ºC; Umidade Relativa do Ar: " + String(umidade)
                        + "%; ");
                Serial.println("Temperatura Submersa (OD): "
                        + String(temperaturaOD) + "ºC; ");
                Serial.println("CO2: " + String(co2) + " ppm; ");
                Serial.println("Concentração OD (OD): " + String(cOD)
                        + "mg/L; Saturação OD: " + String(sOD) + "%; ");
                Serial.println("-------------------------------------");

                // Grava o registro de dados no cartão SD
                writeSDCard("carbono.txt", dataHora + ";"
                                + String(temperaturaBMP) + ";"
                                + String(temperaturaDHT) + ";"
                                + String(temperaturaOD) + ";"
                                + String(umidade) + ";"
                                + String(co2) + ";" + ";"
                                + String(cOD), true);
                Serial.println("Dados gravados com sucesso no SDCard!");

                // Grava o registro de dados no Banco de Dados Supabase
                writeCloudDatabase(dataHora, temperaturaBMP, temperaturaDHT,
                                temperaturaOD, umidade, co2, cOD);

                // Prepara payload JSON para o ThingsBoard
                String payload = "{";
        payload += "\"temperaturabmp\":" + String(temperaturaBMP) + ",";
        payload += "\"temperaturadht\":" + String(temperaturaDHT) + ",";
        payload += "\"temperaturaod\":" + String(temperaturaOD) + ",";
        payload += "\"umidade\":" + String(umidade) + ",";
        payload += "\"co2\":" + String(co2) + ",";
        payload += "\"cod\":" + String(cOD);
        payload += "}";
                // Publica no Thingsboard
                if (client.publish("v1/devices/me/telemetry", payload.c_str())){
                                Serial.println("Dados enviados com sucesso para o ThingsBoard!");
                } else {
                        Serial.println("Falha no envio para o ThingsBoard!");
                }
                delay(minutosEntreLeituras*60000);
        } else {
        Serial.println("Não chegou a hora da leitura ainda. Aguardando...");
        }
}
```

```
void connectMQTT() {
        String clientId = "ESP32-" + String(random(0xffff), HEX);
        while (!client.connect(clientId.c_str(), token, NULL)) {
                Serial.println("Falha na conexão MQTT. Tentando novamente...");
                delay(5000);
        }
        Serial.println("Conectado ao Thingsboard!");
}
```