

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

HUMBERTO RODRIGUES MACEDO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ELETRÔNICO E  
METODOLOGIA PARA ESTIMAR A CONCENTRAÇÃO DE DIÓXIDO  
DE CARBONO NA AQUICULTURA**

Toledo

2025

HUMBERTO RODRIGUES MACEDO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ELETRÔNICO E METODOLOGIA PARA  
ESTIMAR A CONCENTRAÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO NA AQUICULTURA**

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.

**Linha de pesquisa:** Aquicultura

**Orientador:** Prof. Dr. Aldi Feiden

**Coorientador:** Prof. Dr. Rafael Luis Bartz

Toledo

2025

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

Macedo, Humberto Rodrigues

Desenvolvimento de sistema eletrônico e metodologia para estimar a concentração de dióxido de carbono na aquicultura / Humberto Rodrigues Macedo; orientador Aldi Feiden; coorientador Rafael Luis Bartz. -- Toledo, 2025.  
90 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. Concentração de CO2. 3. Sistema eletrônico embarcado em estufas. I. Feiden, Aldi, orient. II. Bartz, Rafael Luis, coorient. III. Título.

HUMBERTO RODRIGUES MACEDO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ELETRÔNICO E METODOLOGIA PARA  
ESTIMAR A CONCENTRAÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO NA AQUICULTURA.**

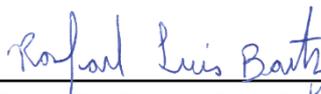
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos  
Pesqueiros e Engenharia de Pesca, da Universidade Estadual do  
Oeste do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do  
título de Doutor em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca.

APROVADA: 10 de junho de 2025.



---

Prof. Dr. Aldi Feiden  
Orientador (UNIOESTE)



---

Prof. Dr. Rafael Luis Bartz  
Coorientador (IFPR)



---

Prof. Dr. Altevir Signor  
(UNIOESTE)



---

Prof. Dr. Wilson Rogério Boscolo  
(UNIOESTE)



---

Prof. Dr. Valci Ferreira Victor  
(IFTO)



---

Prof. Dr. Luiz Fernando Delboni Lomba  
(IFMS)

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, Sr. Ernane Rodrigues da Silva, e à minha mãe, Sra. Ilza Macedo da Silva, cujos valores, exemplos de integridade e incansável dedicação foram e continuam sendo fonte inesgotável de inspiração na minha trajetória. A minha esposa e filhos, deixo minha mais sincera gratidão pelo apoio constante, pelas palavras de encorajamento e pela presença silenciosa, porém fundamental, ao longo desta caminhada acadêmica

## AGRADECIMENTOS

Dou graças a Deus porque Ele é bom e porque a Sua benignidade dura para sempre. Minha gratidão a Deus, pois o Teu nome é grandioso e sem Ele nada poderia fazer.

Agradeço ao meu professor orientador Dr. Aldi Feiden pelo tempo precioso de orientação, por ter guiado este trabalho e me inserido de forma intensiva na piscicultura através das visitas aos produtores, congressos, seminários e aulas na área de aquicultura. Agradeço por proporcionar a oportunidade de estudar por 3 anos no laboratório do Grupo de Estudos de Manejo na Aquicultura – GEMAQ que desempenha o papel ímpar na formação de recursos humanos e divulgação de conhecimento. Agradeço também ao meu coorientador, Prof. Dr. Rafael Luis Bartz, pelos ensinamentos e colaboração.

Agradeço aos meus amigos de curso que se tornaram amigos para a vida e juntos formamos uma equipe extraordinária de trabalho: Olavo José Luiz Junior pelas ideias compartilhadas e pela parceria neste trabalho; Pedro Rondon Werneck e Felipe Misael da Silva Morsoleto pelo companheirismo em tantos trabalhos publicados durante o doutorado. Ao meu colega de trabalho, professor Max Portuguez Obeso por ser diretamente responsável por apresentar-me o programa de doutorado em Engenharia de Pesca e Recursos Pesqueiros do Campus de Toledo.

Agradeço ao apoio do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Tocantins – IFTO, especialmente meus colegas de coordenação da área de indústria do Campus Palmas e a Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Toledo, que através dos professores: Altevir Signor, Fabio Bittencourt, Wilson Boscolo, Sérgio Makrakis, Maristela Makrakis, Edér Gubiani e Pitágoras Piana e da servidora Carla Meurer contribuíram para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

De forma especial quero agradecer à minha família, que foi meu lugar seguro, acreditou e incentivou-me nos desafios. Minha mãe Ilza Rodrigues da Silva e meu pai Ernane Rodrigues da Silva. À minhas irmãs Edilene e Eilene. Aos meus irmãos Anésio e Francisco (*in memoriam*). Com muito amor, agradeço à minha esposa Alessandra Amorim B. Macêdo pelo incentivo e apoio durante a jornada de estudos. Por fim, e tão importante, os meus filhos Sophia Amorim Macedo e Noah Amorim Macedo.

*"A Ti, Senhor, pertence a glória, a honra e o poder,  
pois Tu criaste todas as coisas, e por Tua vontade  
elas existem e foram criadas." — Apocalipse 4:11*

## APRESENTAÇÃO

Minha trajetória acadêmica e profissional reflete uma jornada contínua de aprimoramento técnico e científico, marcada pela experiência em ensino técnico, pesquisa aplicada e desenvolvimento tecnológico. A formação básica e acadêmica ocorreu integralmente em instituições públicas, em 1995 conclui o curso médio integrado ao profissional na área de Eletrônica. Durante os 14 anos seguintes, atuei no setor privado, com foco na manutenção e instalação de equipamentos bancários e de conectividade, o que proporcionou um sólido embasamento prático em eletrônica e automação industrial.

Em 2010, retornei ao ambiente acadêmico para cursar Tecnologia em Sistemas Elétricos de Potência, no Instituto Federal de Educação e Ciência e Tecnologia do Tocantins - IFTO, graduação concluída em 2013. No ano seguinte, fui aprovado em concurso público para professor do IFTO para o Campus Palmas, na área de Controle e Processos Industriais. Desde agosto de 2014, exerço atividades docentes em cursos como Engenharia Elétrica, Técnico em Automação Industrial, Técnico em Eletrotécnica e Técnico em Mecatrônica, lecionando disciplinas como Automação de Processos Industriais, Eletrônica, Eletricidade CA, Redes Industriais e Probabilidade e Estatística.

Para consolidar minha atuação acadêmica, realizei uma especialização em Telemática (IFTO) e, posteriormente, mestrado em Agroenergia pela Universidade Federal do Tocantins - UFT. Durante o mestrado, desenvolvi pesquisas voltadas à automação e sistemas supervisórios para plantas de produção automatizadas de biodiesel, aplicando conhecimentos previamente adquiridos em automação e sensores à pesquisa acadêmica. A conclusão do mestrado ocorreu em dezembro de 2018.

No âmbito institucional, atuei como coordenador de cursos técnicos em Automação Industrial, Eletrotécnica e Mecatrônica no IFTO - Campus Palmas, entre 2018 e 2021, período em que colaborei para o desenvolvimento de currículos e a formação de profissionais para a indústria nacional.

Durante a pandemia, fui convidado a participar de evento virtual relacionado a Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca, oportunidade que me permitiu conhecer o Programa de Pós-graduação em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca – PREP, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Campus de Toledo. Posteriormente, iniciei o doutorado nesse programa, sob a orientação do Prof. Dr. Aldi Feiden.

O período de doutorado foi particularmente enriquecedor, possibilitando o aprofundamento de conhecimentos, a publicação de diversos artigos científicos com participação no Grupo de Estudos de Manejo na Aquicultura - GEMAQ (ver Apêndice A) e a participação em visitas técnicas a produtores e entrepostos de pescado na região oeste do Paraná. Além disso, participei de seminários<sup>1</sup>, congressos internacionais<sup>2</sup> e oficinas de ordenamento territorial para pisciculturas<sup>3</sup>. Também atuei como monitor da disciplina de Delineamentos Experimentais e Análise de Dados, ministrada pelo Prof. Dr. Pitágoras Piana, nos semestres de 2022/2 e 2023/2, além de ter sido palestrante no ciclo de palestras do PREP em 2023 e membro discente<sup>4</sup> do colegiado do programa entre 2023 e 2024.

Essa trajetória acadêmica evidencia meu compromisso com a pesquisa científica e a formação de novos profissionais, consolidando uma base sólida para a continuidade dos meus projetos futuros.

---

<sup>1</sup> **XX Seminário de Extensão da Unioeste.** A extensão universitária e os objetivos do desenvolvimento sustentável. Marechal Cândido Rondon, Paraná, Brasil. 24 a 26 de março de 2021.

**XX Seminário de Extensão da Unioeste.** A extensão universitária e os objetivos do desenvolvimento sustentável. Marechal Cândido Rondon, Paraná, Brasil. 24 a 26 de março de 2021.

**III Seminário Internacional de Pós-graduação em Desenvolvimento Rural Sustentável & IV Workshop Internacional Pesquisa e Resiliência Ambiental.** Unioeste, Marechal Cândido Rondon, 23 a 25 de novembro de 2022.

<sup>2</sup> **International Fish Congress & Fish Expo Brazil** – IFC 2021, 2022, 2023 e 2024. Das Águas a mesa do consumidor. Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. <https://ifcbrasil.com.br/inicial>.

<sup>3</sup> **1º e 2ª Oficina Participativa com vista ao Ordenamento territorial da Piscicultura do Estado do Paraná.** Promovido pela Faculdade BIOPARK e EMBRAPA pesca e aquicultura, Toledo, Brasil, 29 de novembro de 2023 e 12 de agosto de 2024.

<sup>4</sup> **Membro discente do PREP** em 2023 - Portaria Nº 03/2023 CECE; Membro discente do PREP em 2024 – Portaria Nº 04/2024 PREP.

MACEDO, Humberto Rodrigues. **Desenvolvimento de sistema eletrônico e metodologia para estimar a concentração de dióxido de carbono na aquicultura**. 2025. 91f. Tese (Doutorado em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Toledo, 2025.

## RESUMO

A aquicultura é um setor produtivo em expansão no Brasil, que se consolidou como uma atividade econômica relevante no agronegócio nacional. Apesar do crescimento, a automação nesta área ainda é limitada em comparação com outros setores industriais, apresentando desafios e oportunidades para a melhoria da eficiência produtiva e a redução de impactos ambientais, como a pegada de carbono. Neste contexto, a automação pode contribuir significativamente para o monitoramento e controle das emissões de gases de efeito estufa, especialmente o Dióxido de Carbono - CO<sub>2</sub> durante o cultivo de organismos aquáticos em viveiros escavados. O objetivo deste estudo foi desenvolver um sistema eletrônico e uma metodologia para estimar a emissão de gás carbônico em ambientes de viveiros escavados utilizando microcontroladores ESP32 e sensores de temperatura e CO<sub>2</sub>. O sistema foi testado em estufas instaladas no oeste do Paraná, permitindo a coleta de dados em diferentes condições climáticas e períodos do dia. Os resultados preliminares revelaram correlações importantes entre temperatura e concentração de CO<sub>2</sub>, indicando que em ambientes externos, o aquecimento diurno tende a reduzir a concentração deste gás, enquanto no interior das estufas, os níveis de CO<sub>2</sub> permaneceram mais estáveis, em torno de 400 p.p.m para dias de céu limpo e 416 p.p.m para dias nublados. À noite, a concentração média de CO<sub>2</sub> foi de 588 p.p.m em ambientes externos e 416,8 p.p.m no interior das estufas. Os resultados demonstram a importância do uso de tecnologias de automação para o monitoramento preciso das emissões em sistemas aquícolas, fornecendo dados importantes para a estimativa da pegada de carbono e o desenvolvimento de estratégias de mitigação, alinhadas às demandas crescentes por sustentabilidade no setor. Ressalta-se a necessidade de novas pesquisas para fortalecer a base de conhecimento sobre emissões de carbono na aquicultura, promovendo a inovação e a competitividade deste setor no Brasil.

**Palavras-chave:** Aquicultura; Dióxido de Carbono; Estufas; Sensores Eletrônicos; Pegada de Carbono.

MACEDO, Humberto Rodrigues. **Development of an electronic system and methodology to estimate the concentration of carbon dioxide in aquaculture**. 2025. 91f. Thesis (PhD in Fisheries Resources and Engineering), State University of Western Paraná - Unioeste, Toledo, 2025.

## ABSTRACT

Aquaculture is a growing productive sector in Brazil, which has consolidated itself as a relevant economic activity in national agribusiness. Despite the growth, automation in this area is still limited compared to other industrial sectors, presenting challenges and opportunities for improving production efficiency and reducing environmental impacts, such as the carbon footprint. In this context, automation can make a significant contribution to monitoring and controlling greenhouse gas emissions, especially carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), during the cultivation of aquatic organisms in excavated ponds. In this study, an innovative electronic system and methodology were developed to estimate carbon dioxide emissions in excavated pond environments using ESP32 microcontrollers and temperature and CO<sub>2</sub> sensors. The system was initially tested in greenhouses installed in western Paraná, allowing data to be collected in different weather conditions and at different times of day. Preliminary results revealed significant correlations between temperature and CO<sub>2</sub> concentration, indicating that in outdoor environments, daytime heating tends to reduce the concentration of this gas, while inside the greenhouses, CO<sub>2</sub> levels remained more stable, at around 400 p.p.m for clear days and 416 p.p.m for cloudy days. At night, the average CO<sub>2</sub> concentration was 588 p.p.m outdoors and 416.8 p.p.m inside the greenhouses. These results highlight the importance of using automation technologies to accurately monitor emissions in aquaculture systems, providing crucial data for estimating the carbon footprint and developing mitigation strategies in line with the growing demands for sustainability in the sector. Further research is needed to strengthen the knowledge base on carbon emissions in aquaculture, promoting innovation and competitiveness in this sector in Brazil.

**Keywords:** Aquaculture; Carbon Dioxide; Greenhouses; Electronic Sensors; Carbon Footprint.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCD .....	Agência de Bibliotecas e Coleções Digitais
ABES .....	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
BDTD .....	Bibliotecas Digitais de Teses e Dissertações
CA .....	Corrente Alternada
CAPES.....	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CER .....	Reduções Certificadas de Emissões
CH4 .....	Metano
CNPq .....	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO2 .....	Gás Carbônico
CLP .....	Controlador Lógico Programado
DEAD .....	Delineamentos Experimentais e Análise de Dados
DHT .....	Sensor digital de temperatura e umidade
FAO .....	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
GEE .....	Gases de Efeito Estufa
GEMaq .....	Grupo de Estudos de Manejo na Aquicultura
HFC .....	Hidrofluorcarbono
hPa .....	hectopascals
IBICT .....	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
IFC .....	International Fish Congress & Fish Expo Brazil
IFTO .....	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
INMET.....	Instituto Nacional de Meteorologia
IoT .....	Internet of Things - Internet das Coisas
JCR® .....	Journal Citation Reports
LCA .....	Life Cycle Assessment - Análise do Ciclo de Vida
LoRa .....	Long Range
MDL .....	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MMA .....	Ministério do Meio Ambiente
N2O .....	Óxido Nitroso
ONU .....	Organização das Nações Unidas
PFC .....	Perfluorcarbono
PPG .....	Programas de Pós-graduação

PPM .....	Produção Pecuária Municipal
p.p.m .....	partes por milhão
PR .....	Estado do Paraná
PREP .....	Programa de Pós-graduação em Recursos Pesqueiros e Eng. da Pesca
PRONAF .....	Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar
REDD .....	Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação
RTC.....	Relógio de Tempo Real
SF6 .....	Hexafluoreto de Enxofre
SCO2 .....	Sensor de gás carbônico
ST .....	Sensor de temperatura
UFBA .....	Universidade Federal da Bahia
UFF.....	Universidade Federal Fluminense
UFPB .....	Universidade Federal da Paraíba
UFRGS .....	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ .....	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFRN .....	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UFRRJ .....	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
UFT .....	Universidade Federal do Tocantins
UFSC .....	Universidade Federal de Santa Catarina
UNESP .....	Universidade Estadual Paulista
UNIOESTE ....	Universidade Estadual do Oeste do Paraná
USP .....	Universidade de São Paulo

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

**Figura 1.** Modelo de automação para aquicultura, com sensores e atuadores para controle e monitoramento da qualidade e do nível d'água nos viveiros, com possibilidade de realizar o acionamento inteligente de aeradores, alimentadores, eletroválvulas, dentre outros..... 31

### CAPÍTULO II

**Figura 1.** Evolução dos trabalhos com o termo Pegada de Carbono em Programas de pós-graduação do Brasil..... 45

**Figura 2.** Ocorrência de teses e dissertações na área de avaliação CAPES interdisciplinar, em diferentes áreas do conhecimento do CNPq para o tema Pegada de Carbono..... 47

### CAPÍTULO III

**Figura 1.** Esquema unifilar do sistema eletrônico embarcado em estufa, para estimar a dinâmica da concentração de CO<sub>2</sub> em viveiros escavados da aquicultura..... 56

**Figura 2.** Placa ESP32 TTGO T-Beam com Suporte de Bateria e LoRa..... 58

**Figura 3.** Sensor de Temperatura e Pressão BMP180.....58

**Figura 4.** Módulo de sensor de Temperatura e Umidade DHT22..... 59

**Figura 5.** Sensor de Dióxido de Carbono MH-Z19B..... 59

**Figura 6.** Fluxograma para desenvolvimento da programação lógica do Sistema Eletrônico.....60

**Figura 7.** Mapa da localização da coleta de dados..... 62

**Figura 8.** Apresentação do sistema eletrônico para monitoramento da temperatura e CO<sub>2</sub> nas estufas..... 63

**Figura 9.** Diagrama esquemático da conexão lógica do microcontrolador ESP32 com os sensores..... 63

**Figura 10.** Sistema eletrônico embarcado em estufas durante testes preliminares.....67

<b>Figura 11.</b> Comparação entre a concentração de CO <sub>2</sub> (p.p.m) e a temperatura média para dias de céu limpo e dia nublado.....	69
<b>Figura 12.</b> Correlação entre a temperatura e a concentração de CO <sub>2</sub> Interno a estufa (azul) e Externo da estufa (vermelho) para dia de céu limpo.....	70
<b>Figura 13.</b> Correlação entre a temperatura e a concentração de CO <sub>2</sub> Interno a estufa (azul) e Externo a estufa (vermelho) para dia de céu nublado .....	70
<b>Figura 14.</b> Concentração de CO <sub>2</sub> (p.p.m) e a temperatura média observado no período noturno.....	71
<b>Figura 15.</b> Gráfico da correlação entre a temperatura e a concentração de CO <sub>2</sub> dentro da estufa e fora da estufa para dia de céu nublado .....	73

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO II

<b>Tabela 1.</b> Universidades que se destacaram em número de trabalhos finalizados com o tema pegada de carbono.....	45
<b>Tabela 2.</b> Classificação entre as áreas de conhecimento do CNPq e a área de avaliação CAPES dos programas de pós-graduação para os 87 trabalhos com o tema Pegada de Carbono.....	46
<b>Tabela 3.</b> Classificação Qualis dos trabalhos com o tema pegada de carbono que geraram publicações científicas.....	48

### CAPÍTULO III

<b>Tabela 1.</b> Principais materiais e componentes utilizados no sistema eletrônico embarcado nas estufas.....	57
<b>Tabela 2.</b> Código de importação de módulos.....	64
<b>Tabela 3.</b> Código de inicialização dos módulos.....	65
<b>Tabela 4.</b> Linhas e instrução lógica do código Loop para a leitura e registro dos dados coletados.....	66
<b>Tabela 5.</b> Estrutura dos dados armazenados no cartão de memória.....	66
<b>Tabela 6.</b> Média da concentração de CO <sub>2</sub> para o dia de céu limpo e nublado para os sensores posicionados dentro da estufa e os externos a estufa.....	68

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	19
<b><i>CAPÍTULO 1. PEGADA DE CARBONO E AUTOMAÇÃO NA AQUICULTURA .....</i></b>	<b>22</b>
RESUMO .....	22
ABSTRACT .....	23
1. INTRODUÇÃO .....	24
2. METODOLOGIA .....	25
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26
3.1 Pegada de Carbono na Aquicultura .....	26
3.2 Automação para a Aquicultura.....	30
4. CONCLUSÃO .....	33
REFERÊNCIAS .....	34
<b><i>CAPÍTULO 2. PEGADA DE CARBONO: ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA DE PUBLICAÇÕES DO BANCO DE TESES E DISSERTAÇÕES DA CAPES, BRASIL .....</i></b>	<b>37</b>
RESUMO .....	37
ABSTRACT .....	38
1. INTRODUÇÃO .....	39
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	42
2.1 Análises das Teses e Dissertações .....	43
2.2 Análise dos artigos publicados referentes as teses e dissertações .....	43
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
3.1 Das publicações de artigos provenientes de teses e dissertações .....	47
4. CONCLUSÃO .....	48
REFERÊNCIAS .....	49
<b><i>CAPÍTULO 3. DESENVOLVIMENTO E TESTES DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA ESTIMAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> EM VIVEIROS ESCAVADOS .....</i></b>	<b>52</b>
RESUMO .....	52

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>53</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>54</b>
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>55</b>
2.1 Descrição do sistema de monitoramento de dióxido de carbono.....	55
2.2 Descrição do Material.....	57
2.2.1 Microcontrolador.....	57
2.2.2 Sensores de temperatura.....	58
2.2.3 Sensor de CO2 .....	59
2.2.4 Procedimentos Iniciais: Calibração dos Sensores e Desenvolvimento da Programação .....	60
2.3 Testes Preliminares e Coleta de Dados .....	61
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>62</b>
3.1 Circuito Elétrico .....	62
3.2 Programação do Microcontrolador.....	64
3.3 Sistema Eletrônico Embarcado na Estufa .....	67
3.4 Testes Preliminares no Sistema Eletrônico .....	67
3.4.1 Resultados iniciais para condições climáticas de céu limpo e nublado .....	68
3.4.2 Resultados para o período noturno.....	71
<b>4. CONCLUSÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>5. TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>74</b>
<b><i>CAPÍTULO 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</i></b>	<b><i>77</i></b>
<b><i>APÊNDICES.....</i></b>	<b><i>80</i></b>
<b><i>APÊNDICE A – Artigos Publicados no Doutorado .....</i></b>	<b><i>80</i></b>
<b><i>APÊNDICE B – Programação do Microcontrolador .....</i></b>	<b><i>84</i></b>

## INTRODUÇÃO GERAL

A aquicultura tem se consolidado como uma atividade econômica estratégica em diversas regiões do mundo, desempenhando um papel fundamental na produção de proteína animal, geração de empregos e desenvolvimento econômico. O avanço da aquicultura ocorre em todas as regiões do Brasil, especialmente nas regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste, e tem transformado a geografia das microbacias, promovendo o surgimento de vários empreendimentos aquícolas (São José *et al.*, 2021)<sup>1</sup>. Embora esses sistemas produtivos apresentem vantagens como o uso eficiente de água e o aumento da produtividade, também podem impactar significativamente o ambiente, especialmente em relação às emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para a atmosfera.

O CO<sub>2</sub> é um dos principais gases de efeito estufa (GEE) responsáveis pelas mudanças climáticas globais. Sua concentração na atmosfera tem aumentado de forma constante desde a Revolução Industrial, alcançando níveis sem precedentes na história recente. Em 2023, a concentração média global de CO<sub>2</sub> atingiu aproximadamente 420 partes por milhão (ppm), representando um aumento expressivo em relação aos níveis pré-industriais (WMO, 2024)<sup>2</sup>. Esse cenário reforça a importância de iniciativas voltadas à mitigação das emissões de GEE e ao desenvolvimento de tecnologias para seu monitoramento e controle, incluindo no setor aquícola.

O presente trabalho integra uma pesquisa de caráter mais amplo, cujo objetivo é o desenvolvimento de um sistema e de uma metodologia voltados à estimativa da pegada de carbono na aquicultura. Este estudo representa uma etapa importante dentro desse escopo, destinado à validação de conceitos, à consolidação de procedimentos experimentais e à obtenção de dados preliminares que servirão de base para o aprimoramento das etapas subsequentes. A pesquisa é conduzida por um grupo composto pelo Prof. Dr. Aldi Feiden, pelos pesquisadores Olavo José Luiz Junior e Humberto Rodrigues Macedo, além de futuros pesquisadores que poderão se somar à equipe no decorrer dos próximos desenvolvimentos.

Diante desse contexto, o principal objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema eletrônico, embarcado em estufas, utilizando sensores e um microcontrolador, para estimar a

---

<sup>1</sup> São José, F. D., Novo, Y. D. C., Farias, A., Magalhães, L., & Fonseca, M. (2022). Mapeamento de viveiros escavados para aquicultura no Brasil por sensoriamento remoto. Embrapa Territorial, Campinas, São Paulo.

<sup>2</sup> World Meteorological Organization. (2024). *WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 20: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023*. World Meteorological Organization. Available at <https://library.wmo.int/idurl/4/69057>

concentração de CO<sub>2</sub> em viveiros escavados destinados à aquicultura. Além disso, este estudo busca realizar testes preliminares do sistema, coletando dados em diferentes condições climáticas e períodos do dia (diurno e noturno). Com base nesses dados, pretende-se avaliar as melhorias necessárias para, em trabalhos futuros, desenvolver um sistema inicial capaz de estimar a pegada de carbono em sistemas aquícolas de forma precisa e eficiente. Para estruturar a discussão e apresentar os resultados obtidos, esta tese foi organizada em 4 capítulos:

O capítulo 1 apresenta o artigo intitulado *Carbon Footprint and Automation in Aquaculture*<sup>3</sup>, cujo objetivo é fomentar os estudos iniciais sobre a utilização de processos automatizados para estimar a concentração de CO<sub>2</sub> em viveiros escavados, visando, a longo prazo, calcular a pegada de carbono na aquicultura durante a fase de criação dos peixes. Além disso, este capítulo discute o estado atual da automação na aquicultura e o estado da arte sobre a pegada de carbono no setor.

No capítulo 2 apresenta-se o artigo *Carbon Footprint: Scientometric Analysis of Publications From The CAPES Thesis and Dissertations Database, Brazil*<sup>4</sup>, que realiza uma análise cienciométrica sobre o tema pegada de carbono na aquicultura, com base nas teses e dissertações da CAPES. Os resultados dessa análise indicam que o tema 'pegada de carbono' tem despertado crescente interesse na comunidade científica. Contudo, observou-se a ausência de estudos voltados para a estimativa da pegada de carbono em viveiros escavados na piscicultura.

O Capítulo 3 - Descreve o desenvolvimento de um sistema eletrônico embarcado em estufas, projetado para coletar e monitorar dados em tempo real, como concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura ambiente, entre outros. Esse sistema utiliza um microcontrolador ESP32 e sensores eletrônicos, além de possuir a versatilidade para expansão com o uso de outros sensores. Outro objetivo desse capítulo é testar o sistema em dias nublados e de céu limpo, bem como durante o período noturno, a fim de analisar a dinâmica da concentração de CO<sub>2</sub> nos viveiros escavados e identificar possíveis melhorias no equipamento e na metodologia. Esse esforço visa, em última instância, contribuir para o desenvolvimento de um sistema automático que permita estimar a pegada de carbono na aquicultura de forma remota e robusta.

No capítulo 4, serão apresentadas as considerações finais deste estudo, nas quais se discutem os principais resultados obtidos, as contribuições do trabalho para a área de pegada

---

<sup>3</sup> *Carbon Footprint and automation in aquaculture, Brazil*. (2024). <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n11-115>

<sup>4</sup> *Carbon Footprint: Scientometric Analysis of Publications from The Capes Thesis and Dissertations Database, Brazil*. (2024). <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n9-143>

de carbono na aquicultura, bem como as limitações encontradas e as perspectivas para futuros desenvolvimentos. Este capítulo visa consolidar as informações desenvolvidas ao longo da pesquisa, evidenciando a relevância do sistema proposto e apontando caminhos para a continuidade dos estudos.

Com essa estrutura, espera-se que esta tese contribua para o avanço no desenvolvimento de tecnologias de monitoramento de CO<sub>2</sub>, em sistemas aquícolas, promovendo uma compreensão mais precisa da dinâmica das emissões de carbono nesses ambientes e auxiliando no desenvolvimento de um sistema automático e confiável, que seja capaz de estimar a pegada de carbono na aquicultura.

## CAPÍTULO 1. PEGADA DE CARBONO E AUTOMAÇÃO NA AQUICULTURA

Humberto Rodrigues Macedo <sup>1</sup>  
Olavo José Luiz Junior <sup>2</sup>  
Pedro Rondon Werneck <sup>3</sup>  
Aldi Feiden <sup>4</sup>

### RESUMO

O desenvolvimento da eletrônica e da automação, tão presentes nas atividades cotidianas e nas indústrias podem contribuir com a utilização de sensores e microcontroladores para estimar a pegada de carbono em sistemas de produção na aquicultura. Este trabalho propõe uma pesquisa sobre o tema automação e pegada de carbono, ambos relacionado com a aquicultura, observando o estado da arte deste tema. Metodologia foi baseada em pesquisas científicas, de abordagem qualitativa sobre a automação e a pegada de carbono na aquicultura. Os resultados demonstram que os níveis de automação utilizados na aquicultura ainda são baixos em relação as demais atividades econômicas, especialmente a indústria. Contudo o avanço da tecnologia permitiria que a automação na aquicultura estivesse em patamar mais alto. A automação também poderia corroborar com metodologias baseadas em sensores e controle para estimar a pegada de carbono durante a fase de criação dos animais em viveiros escavados.

**Palavras-chave:** Controladores lógico; Efeito estufa; Piscicultura; Sensores; Viveiros escavados.

---

<sup>1</sup> Instituto Federal do Tocantins - IFTO, Palmas, TO, Brasil. E-mail: humberto.macedo@ifto.edu.br

<sup>2</sup> Instituto Federal do Paraná, Assis Chateaubriand, PR, Brasil. E-mail: olavo.junior@ifpr.edu.br

<sup>3</sup> Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, Brasil. E-mail:prondonwerneck@gmail.com

<sup>4</sup> Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, Brasil. E-mail:aldifeiden@gmail.com

## **CARBON FOOTPRINT AND AUTOMATION IN AQUACULTURE**

### **ABSTRACT**

The development of electronics and automation, so present in everyday activities and industries, can contribute to estimating the carbon footprint of aquaculture production systems. This paper proposes research on the theme of automation and carbon footprint in aquaculture, looking at the state of the art of this subject. The methodology was based on scientific research with a qualitative approach on automation and the carbon footprint in aquaculture. The results show that the levels of automation used in aquaculture are still low compared to other economic activities, especially industry. However, advances in technology would allow automation in aquaculture to be at a higher level. Automation could also corroborate methodologies based on sensors and control to estimate the carbon footprint during the rearing phase of animals in excavated ponds.

**Keywords:** Logic controllers; Greenhouse effect; Fish farming; Sensors; Excavated ponds.

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade do desenvolvimento sustentável das atividades industriais e econômicas tem desafiado a comunidade científica e os líderes de nações a promoverem políticas que visam buscar um equilíbrio entre o crescimento e a preservação de seus recursos naturais. Com a evolução da questão ambiental e das condições que o planeta apresenta, o cultivo racional de organismos aquáticos, atividade conhecida como aquicultura, também enfrenta o desafio de moldar-se ao conceito de sustentabilidade, o que implica em agregar novos conhecimentos à produção e às práticas do setor (Eler & Millani, 2007).

O dióxido de carbono – CO<sub>2</sub>, ou gás carbônico, é um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa, e sua concentração na atmosfera contribui para as alterações climáticas do nosso planeta, favorecendo o chamado aquecimento global. Em 2020, as emissões de CO<sub>2</sub> fóssil até diminuíram por conta da pandemia da COVID-19, porém, ainda assim ficaram na casa das 34 Giga toneladas – 2,4 bilhões de toneladas a menos que em 2019. Contudo, em 2022 a emissão global de CO<sub>2</sub> atingiu 36,8 Giga toneladas, um acréscimo de 321 milhões de toneladas (0,9%) em relação ao ano de 2021, sendo os principais setores econômicos que mais emitem GEE: transporte (28%); energia elétrica (25%); e indústria com 23% (Climate Policy Initiative, 2023). No Brasil, as emissões brutas de GEE durante o ano de 2020 chegaram a 2,16 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (tCO<sub>2</sub>e), um aumento de 9,5% em relação ao ano anterior (Pontes, 2021).

Impactos causados por atividades antrópicas que emitem gás carbônico na atmosfera formam a chamada Pegada de Carbono (Radu *et al.*, 2013). Pegada de Carbono consiste em um valor de emissão de CO<sub>2</sub>, medido em toneladas, geralmente mensal ou anual. Esta informação é utilizada para projetar ações para a mitigação de emissões, e possibilitar ações de compensação para as emissões atuais (Campos, 2011).

O avanço da tecnologia e do uso da automação nas atividades econômicas é um processo irreversível e que traz consigo inúmeros benefícios e consequências para a sociedade. Como exemplo, a automação nos campos com o uso das colheitadeiras, permitiu a ampliação da produção de alimentos e retirou mão de obra do campo, sendo responsável pelo êxodo rural e aumento da população urbana. Este aumento da população urbana ocasionou problemas sociais e falta de emprego nas cidades, uma vez que não estavam preparadas para receber a população outrora rural (*Food and Agriculture Organization [FAO]*, 2022).

A automação de processos utilizando as tecnologias disponíveis tem a finalidade de contribuir para a melhoria na eficiência da execução das atividades e na redução do uso de

peças em tarefas repetitivas, e por fim, reduz os custos com mão de obra (Haight & Keckojevic, 2005). Em nível industrial, a automação tem avançado substancialmente, contudo o avanço da automação na piscicultura não segue a mesma velocidade. Vários fatores favorecem o menor avanço da automação nas pisciculturas e dentre eles, pode-se observar no contexto do setor: atividade realizada por pequenos produtores e de sucessão familiar; viabilidade econômica das pisciculturas, mesmo sem ou com baixo nível de automação; custo da automação e das manutenções; resistência a mudança, uma vez que produtores podem ter dificuldades com novas tecnologias, entre outras.

No desenvolvimento das cadeias produtivas do pescado existem fatores importantes, como a qualidade da água, a sustentabilidade econômica e ambiental. A aquicultura vem se destacando como fonte promissora de renda, com uma diversidade de sistemas produtivos na criação de peixes (Riedo, 2017). Diante do avanço da aquicultura na produção de alimentos e na geração de renda para impulsionamento de economias locais, observa-se que a utilização de equipamentos eletrônicos, visando a automação da produção na aquicultura pode contribuir com a qualidade da produção, através do monitoramento e das intervenções automáticas, garantindo a qualidade da água, a homogeneidade no acionamento de alimentadores, aeradores e demais itens necessários para uma boa produtividade. Na agricultura, por exemplo, cada vez mais estão sendo utilizados sensores no processo produtivo, tanto para facilitar a tomada de decisões, como para fazer os acionamentos de equipamentos (Zhang *et al.*, 2013; Shen *et al.*, 2017).

O objetivo desta pesquisa foi fomentar o estudo inicial para utilização de processos de automação para estimar a pegada de carbono na aquicultura durante a fase de criação dos peixes em viveiros escavados, a fim de conhecer o desenvolvimento atual da automação praticada na aquicultura e o estado da arte sobre a pegada de carbono para aquicultura.

## **2. METODOLOGIA**

Esta pesquisa utilizou a metodologia tipo tecnológica de abordagem exploratória, unindo-se com a metodologia de pesquisa bibliográfica em repositórios, tais como google acadêmico, para fornecer informações e dados tanto qualitativos quanto quantitativos que permitem conhecer melhor o tema do trabalho (Martelli *et al.*, 2020). Observações foram realizadas durante o período de 2022 a 2024 em visitas as pisciculturas no oeste do Paraná e em feiras de tecnologias da cadeia do pescado. A metodologia de pesquisa exploratória é

amplamente utilizada e flexível. Os métodos utilizados incluem pesquisas de fontes secundárias, pesquisas empíricas, estudos de casos seletivos e observações informais (Mattar, 2008). Neste contexto, a pesquisa exploratória pode ser utilizada para estruturar trabalhos em fases preliminares, com a finalidade de conhecer o limite científico do tema da pesquisa e abrir possibilidades para ampliar a discussão e o avanço do tema, neste caso o tema automação e pegada de carbono na aquicultura.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **3.1 Pegada de Carbono na Aquicultura**

No contexto global da sustentabilidade do planeta, a preocupação com a relação entre a emissão de Gases de Efeito Estufa - GEE e a temperatura da Terra é crescente, como observado durante a realização da Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, edição de 2021, a COP-26. Nesta conferência obteve-se a mudança de postura de países como China e Estados Unidos em relação a Agenda 2030 pelo desenvolvimento sustentável da ONU. Estes países comprometeram-se a controlar suas emissões de gases de efeito estufa, entre outras ações (United Nations, 2021). Essas ações devem ampliar a demanda por créditos de carbono pelo mundo, nos próximos anos.

A Estimativa da Pegada de Carbono nas atividades produtivas tem sido realizada por meio da Análise do Ciclo de Vida (do acrônimo em inglês Life Cycle Assessment - LCA) de sua produção. A LCA é um método padronizado desenvolvido para avaliar potenciais impactos ambientais associados à produção, quantificando e analisando os recursos consumidos e as emissões para o meio ambiente, em todos os estágios da produção, da extração da matéria-prima até o descarte dos resíduos e das embalagens (Kimpara *et al.*, 2012; Galindro *et al.*, 2019). Exemplos de trabalhos sobre a LCA na agricultura brasileira podem ser vistos em de Oliveira Bordonal *et al.* (2024) e Coltro *et al.* (2024).

Muitas atividades podem se apresentar como devedoras de carbono, devendo identificar medidas de mitigação por meio de reduções de emissão ou mesmo buscando a neutralização com a aquisição junto a sistemas produtivos superavitários em créditos de carbono. Fazendo um pequeno histórico, o mercado de créditos de carbono surgiu, como proposta, durante a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, a ECO-92, no Rio de Janeiro (Quarrie, 1992), e em 1997, alguns países assinaram o Protocolo de Quioto, que

contemplava compromissos para a redução das emissões de GEE, com o objetivo de mitigar as mudanças climáticas, fazendo um cálculo geral da emissão de Carbono e de outros gases de efeito estufa, tais como: Metano - CH<sub>4</sub>, Óxido Nitroso - N<sub>2</sub>O, Hexafluoreto de Enxofre - SF<sub>6</sub> e duas famílias de gases, Hidrofluorcarbono - HFC e Perfluorcarbono - PFC, que tiveram suas emissões chamadas de Carbono Equivalentes (Campos, 2011).

O protocolo de Quioto somente entrou em vigor em 2005, quando conseguiu atingir o nível mínimo preconizado, de ter incluídos a maioria dos países que representassem 55% das emissões globais. Assim, pelo protocolo, governos e empresas dos principais países desenvolvidos, maiores responsáveis pelas concentrações atuais de GEE emitidos na atmosfera, deveriam procurar diminuir, controlar e/ou compensar as emissões de CO<sub>2</sub> equivalentes que não puderem evitar, com a compra de créditos de carbono. A partir deste evento, a redução das emissões de gases de efeito estufa passa a ter valor econômico, criando o mercado internacional de créditos de carbono (Souza & Corazza, 2017).

O Protocolo de Quioto estabeleceu o mercado de créditos de carbono de forma que os países desenvolvidos que apresentarem sobras nos seus limites de emissões, podem vender o excedente para outras nações que se encontram acima do limite. O protocolo também estabeleceu a chamada implementação conjunta, nesta modalidade, os países desenvolvidos podem atuar em conjunto com outros países para alcançar suas metas, por meio de um acordo de cooperação, ambos podem dividir custos para redução das emissões e ainda transferir tecnologia entre si. Já o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL é a oportunidade de criação de projetos de redução de emissão de gases de efeito estufa, em países em desenvolvimento, que não possuem metas fixadas pelo Protocolo de Quioto. Dessa maneira, os países podem obter Reduções Certificadas de Emissões (*Certified Emission Reduction* - CER), que representam o crédito pela redução de cada tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente, e negociá-las com as nações que assinaram o documento, mas que não consigam atingir suas metas. No Brasil, estes projetos devem ser inicialmente aprovados pela Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima, entidade escolhida pela ONU, para fazer a creditação dos projetos no Brasil (Campos, 2011).

Além do mercado regulado, estipulado pelo Protocolo de Quioto, existe o mercado voluntário, no qual instituições e empresas podem acumular créditos de carbono, por meio de iniciativas de redução voluntárias de emissões, desde que auditadas e aprovadas por uma entidade acreditadora independente. Nesta estratégia, os créditos são chamados de Redução Voluntária de Emissões (*Voluntary Emission Reduction* - VER). São iniciativas menos

burocráticas, que não podem ser agregadas às reduções de metas dos países, mas conseguem incluir projetos não reconhecidos pelo mercado regulado. Temos como exemplos os projetos de Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries - REDD+ -*). Trata-se de um mecanismo de compensação financeira para os países em desenvolvimento ou para comunidades desses países, pela preservação de suas florestas nativas. Um exemplo de projeto neste modelo é o Fundo Amazônia, criado para captar doações para investimentos em ações de prevenção, monitoramento, combate ao desmatamento, e de promoção da conservação e do uso sustentável da Amazônia Legal (Fundo Amazônia, 2024).

Os créditos de carbono podem ser vistos como uma espécie de “moeda ambiental” no mercado internacional, uma unidade de medida utilizada para emissões de gases do efeito estufa. A cada tonelada de CO<sub>2</sub> não emitido, ou compensado por uma neutralização de carbono, um crédito de carbono é gerado, e pode ser negociado no mercado de crédito de carbono por meio de empresas especializadas em quantificar e determinar os créditos que reduzem as pegadas de carbono (Campos, 2011).

Qualquer atividade produtiva que gere superavit; por exemplo, uma produção rural que tenha uma área para plantio, ou outro tipo de mecanismo de cultivo que sequestram carbono da atmosfera, pode comercializar seus créditos de carbono gerados, em que pese ser necessário superar os processos burocráticos de aprovação, que devem ser estudados e clarificados. De qualquer forma, é algo que pode gerar uma nova vertical de receitas para a atividade produtiva, por meio da obtenção de CER. Além do potencial retorno monetário deste investimento, é importante frisar a possibilidade de agregação da marca à esta iniciativa, trazendo ganhos pelo apelo benéfico motivado pelo menor impacto ambiental provocado pela atividade ao meio ambiente, agregando valor aos produtos gerados e comercializados, utilizando a chamada estratégia do “Marketing Verde” para mostrar-se como uma atividade ambientalmente sustentável (Campos, 2011).

Grande parte destas reduções certificadas são obtidas por meio de plantio de árvores, pois oferecem maior facilidade de implementação, custo baixo, preservação do solo, além de serem excelentes estratégias de Marketing. Observa-se a necessidade de pesquisas voltadas a entender a emissão de gases de efeito estufa, e métodos viáveis para o sequestro do carbono emitido pelos sistemas produtivos, dentre eles, destacamos a aquicultura.

A *FAO* propõe um código de conduta para a pesca responsável, com princípios e disposições, em apoio às práticas sustentáveis para o desenvolvimento da aquicultura, na qual

a aquicultura precisa ser sustentável e justa. Dentre os princípios para uma abordagem de ecossistema para a aquicultura de água doce, estão o desenvolvimento e a gestão da aquicultura, que devem levar em consideração toda a gama de funções e serviços deste ecossistema (Allsopp *et al.*, 2013).

A aquicultura é um dos setores de produção de alimentos que mais cresce no mundo, tornando-se importante e desejável avaliar a sustentabilidade de seus sistemas de produção. Alcançar a sustentabilidade não é tarefa trivial, e deve ser realizada passo a passo, por meio de intervenções sustentáveis nestes sistemas (Valenti *et al.*, 2018). A definição de aquicultura sustentável, dada por Valenti (2008), apresenta-se como produção lucrativa de organismos aquáticos, mantendo uma interação harmônica e duradoura com os ecossistemas e as comunidades humanas locais. Existem muitos métodos propostos para avaliar a sustentabilidade de sistemas produtivos, mas ainda é limitada a aplicação dos mesmos em sistemas agropecuários, inclusive na aquicultura (Kimpara *et al.*, 2012).

Para alcançar uma aquicultura sustentável é importante estimar a sustentabilidade das técnicas de manejo e das novas tecnologias adotadas. Uma atividade pode ser altamente lucrativa, sob o ponto de vista econômico porque não estão sendo computados e valorados os serviços da natureza, que são bens comuns (de toda a sociedade), que estão sendo gastos no processo de produção (Valenti *et al.*, 2018).

A sustentabilidade dos sistemas de produção ainda está muito longe de ser atingida, mas um caminho possível é a adoção de processos, sistemas e práticas mais sustentáveis. É essencial medir a sustentabilidade dos sistemas, estabelecendo metas factíveis e gerando ações definidas para atingi-las. Estas metas devem ser reformuladas quando atingidas, projetando-se limites mais ambiciosos. As avaliações sobre a sustentabilidade dos sistemas produtivos devem ser observadas, como parte de um processo dinâmico, para atingir sistemas mais sustentáveis. O aprendizado contínuo e participação de todos os atores envolvidos nas cadeias produtivas são requisitos essenciais do processo (Valenti *et al.*, 2012).

Para Valenti *et al.* (2018), as principais contribuições ambientais positivas prestadas pela aquicultura são: o sequestro de fósforo e nitrogênio de um corpo d'água que são retidos na biomassa produzida; acúmulo de água; melhoria da umidade relativa do ar, no caso de regiões secas; e a absorção de CO<sub>2</sub> da atmosfera. Embora a aquicultura seja uma das atividades que mais cresce no mundo, a quantificação da emissão ou sequestro de carbono realizada pela atividade no campo, ainda é muito pequena. Costa *et al.* (2018) apresentam um estudo neste sentido, oriundo de experimento em carcinicultura marinha. As amostras de gás foram coletadas

nas fases de povoamento dos viveiros; metade do cultivo e na despesca. Neste estudo, os resultados indicaram que o CO<sub>2</sub> correspondeu a 99% dos gases emitidos ou assimilados.

Os consumidores modernos de alimentos provenientes da aquicultura geralmente apoiam a produção sustentável (Simões *et al.*, 2014; Risius *et al.*, 2017). Assim, rotular um alimento como “sustentável” agrega valor ao produto. Ferramentas para avaliar fazendas e setores de aquicultura são necessárias para fornecer uma certificação consistente e realista. O conjunto de indicadores proposto por Valenti *et al.* (2018), na visão do autor, atende às necessidades das organizações certificadoras.

Embora a pegada de carbono seja um tema crescente nas produções científicas, e objeto de pesquisa em programas de pós-graduação de diferentes áreas de concentração, a pegada de carbono durante a fase de criação, em viveiros escavados, por exemplo, ainda necessita de desenvolvimento de pesquisas científicas (Luiz Junior *et al.*, 2022; Macedo *et al.*, 2024).

Com base nesta contextualização, observa-se a necessidade de mais pesquisas voltadas a entender a emissão de gases de efeito estufa nos sistemas produtivos, e, principalmente métodos viáveis para o sequestro do carbono, emitido por estes sistemas, e mais especificamente na piscicultura. Além disto é promissora a área de pesquisa e desenvolvimento, a fim de criar mecanismos facilitadores, para agregar valor aos créditos de carbono sequestrados, tanto no que se refere às ações operacionais de quantificação destes sequestros, como às ações administrativas e burocráticas junto a instituições certificadoras.

### **3.2 Automação para a Aquicultura**

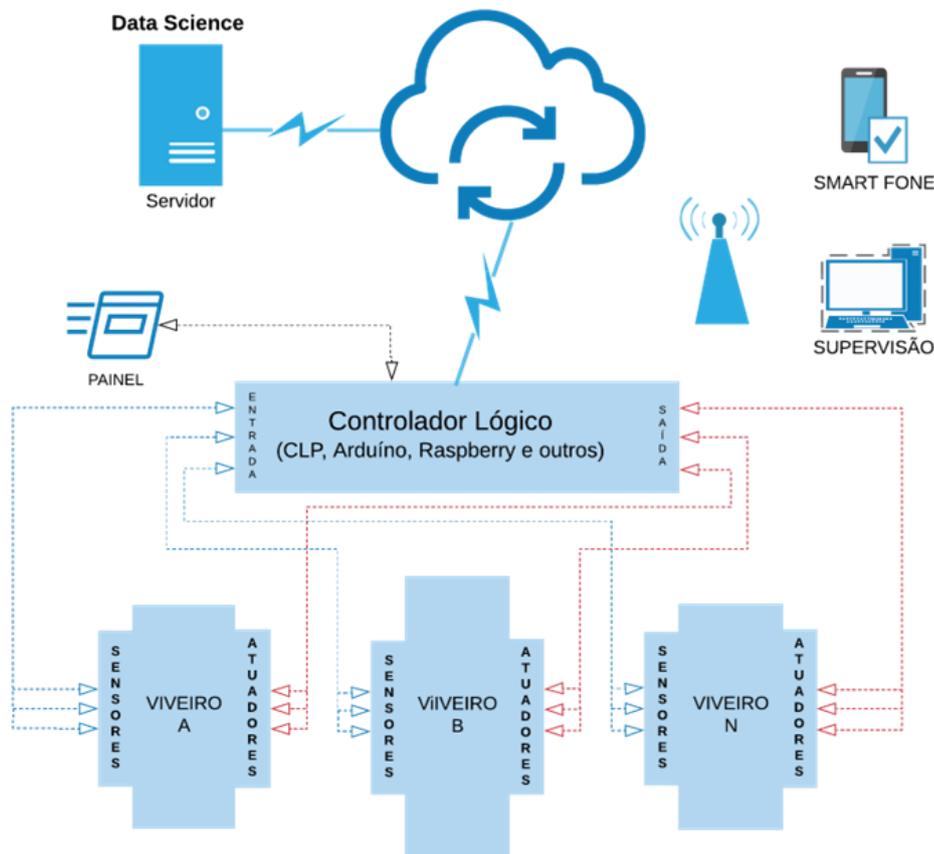
A utilização de sistemas de monitoração e acionamentos automáticos contribui para conservação e manutenção das espécies nativas, uma vez que pode ser utilizado para o monitoramento das águas em tanques e nos rios, e seus dados utilizados para pesquisas que busquem a melhoria da qualidade das águas. A maior produtividade na aquicultura pode levar a redução da pesca extrativista, podendo assim contribuir para a manutenção e reprodução das espécies nativas em seus habitats naturais.

O oxigênio dissolvido em produções com alta densidade na aquicultura tem se tornado um fator limitante para grandes produções (Kubitza *et al.*, 2014). No período noturno, onde os níveis de oxigenação em tanques com pequena renovação de água se tornam críticos, é fundamental a utilização de aeradores. Neste aspecto, o controle automático do processo se torna indispensável. Os equipamentos de controle e automação utilizados para grandes

produções na aquicultura, em sua maioria são importados, portanto concebidos para espécies de peixes cultivados em outras regiões, como o salmão.

O monitoramento do oxigênio dissolvido, tem sido determinante para o sucesso dos tanques de produção na aquicultura. Observa-se que a automação na aquicultura se iniciou devido à necessidade da utilização de sensores de qualidade d'água para acionamento de aeradores e equipamentos eletroeletrônicos para a arraçamento dos peixes em viveiros e tanques (Winter & Mota, 2021; Toigo, 2022). Um exemplo de diagrama modelo de automação para aquicultura é apresentado pelos autores na Figura 1.

**Figura 1.** Modelo de automação para aquicultura, com sensores e atuadores para controle e monitoramento da qualidade e do nível d'água nos viveiros com possibilidade de realizar o acionamento inteligente de aeradores, alimentadores, eletroválvulas, dentre outros.



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

A falta de energia elétrica é um fator preocupante na produção de pescado intensivo, e os controladores lógicos também podem ser utilizados para monitorar a energia elétrica da propriedade, e acionar o sistema de alimentação reserva (geração própria) se disponível. A utilização do Controlador Lógico Programável - CLP para automação da produção de salmão

trouxe economicidade de recursos ambientais e menores taxas de mortalidade (Mehranzadeh & Gholami, 2015). A indústria eletrônica avança para fornecer, cada vez mais, sensores e equipamentos de alta confiabilidade, qualidade e custo-benefício.

A automação da despesca exige mais investimentos financeiros, e começa a se desenvolver com a utilização de bombas de sucção e esteiras de transporte, facilitando o transporte dos viveiros até o caminhão transportador. Entretanto, considera-se ainda a necessidade de maior nível de automação da despesca, que deverá, em algum momento, avançar para a despesca completa dos viveiros escavados, sem a necessidade, por exemplo, de mão de obra para passagem de redes para cercar os peixes em área reduzida do tanque. A automação desta etapa poderá reduzir o tempo necessário para a despesca dos peixes e eliminar o trabalho repetitivo e muitas vezes insalubre realizado pelas equipes responsáveis por essa tarefa.

A evolução da automação para despesca pode ter vários caminhos. Na visão dos autores deste trabalho, uma possibilidade passa pelo planejamento dos viveiros em sua construção, adotando-se, ou atualizando-se o formato dos viveiros em figuras geométricas, como retângulo, círculos ou quadrados, construídos com a presença de trilhos no fundo dos viveiros ou em armações aéreas que permitam a movimentação de diferentes telas utilizando motores controlados automaticamente. Estas telas realizariam a segregação dos peixes a serem despescados, em um local do viveiro previamente construído, para realizar o transporte automático dos peixes e realizar a biometria deles, enquanto são transportados até o caminhão que os levará aos entrepostos de pescado para beneficiamento. Entretanto, a evolução dos equipamentos elétricos pode apresentar diferentes soluções para automação da despesca.

O desenvolvimento da automação na aquicultura, pode levar os aquicultores a terem vantagens, tais como:

- Acesso ao painel do operador, ou via celular, com informações sobre os viveiros ativos, espécies sendo produzidas em cada viveiro, tempo de cultivo, densidade média estimada dos animais no viveiro, entre outros.
- O supervisório com o desenho da planta e os dados online do processo podem ser disponibilizados para computadores e smartphones (Macedo *et al.*, 2020). Portanto, em qualquer lugar onde tenha internet, o produtor poderá saber o estado atual do processo, poderá visualizar a temperatura dos viveiros, o nível de oxigênio, saber se os aeradores e alimentadores foram ou estão acionados e intervir no processo remotamente.

O sistema utilizando CLP ou ESP32 têm a flexibilidade de atender a produtores que possuam poucos tanques, até mesmo grandes produtores com dezenas de tanques, bastando para

isso acrescentar módulos de expansão, cartões de memória ou ampliando a quantidade de controladores utilizados. O tamanho dos tanques também não é problema, os sensores podem ser instalados em tanques pequenos até tanques maiores. Para tanques maiores pode ser necessário colocar mais sensores e atuadores em paralelo, usando a mesma entrada/saída do controlador lógico. A confiabilidade do CLP, já consolidada na indústria, pode ser uma alternativa viável econômica e técnica para a automação das pisciculturas, devida sua robustez e segurança (Groover, 2011; Huh, 2017). Atualmente existem vários fabricantes de CLP, como Siemens, Rockwell, Weg, Schneider Electric, entre outros.

Uma alternativa cada vez mais marcante frente aos CLP são os microcontroladores desenvolvidos na indústria concebidos sobre o conceito de Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT). São equipamentos que surgiram como plataformas de prototipação, permitindo a criação mais facilitada de equipamentos direcionados para a resolução de problemas de nichos específicos, aliando a disponibilidade de diversos sensores e atuadores de custo mais baixo com a criatividade de seus desenvolvedores. A placa controladora mais conhecida deste novo conceito é a italiana Arduino, porém atualmente existem outros projetos, como o Esp32, de adoção crescente. Aplicações IoT para a aquicultura tem sido desenvolvido por meio da disponibilidade paulatina de sensores destinados a medir parâmetros aquáticos, como turbidez, temperatura, pH e oxigênio dissolvido. Exemplos de trabalhos científicos publicados a partir da criação destes dispositivos podem ser observados em Leal Junior *et al.* (2019), Zamzari *et al.* (2022) e Bartz & Feiden (2023).

Assim, a utilização destes controladores de baixo custo, além de alternativas com mais processamento, como as placas Raspberry PI, não devem ser descartados, porém devem exigir uma quantidade maior de testes, antes serem apresentados como produtos de forma comercial.

#### 4. CONCLUSÃO

O desenvolvimento de pesquisa com metodologia tipo tecnológica e de abordagem exploratória permitiu alcançar o objetivo de conhecer o avanço científico no tema de automação e pegada de carbono na aquicultura. Essa pesquisa permitiu verificar que não existem metodologias certificadas para análise da pegada de carbono durante as fases de criação e alevinagem. O nível de automação nas pisciculturas encontra-se ainda distante dos níveis de outras atividades econômicas, como a indústria e a agricultura, contudo, aos poucos a

automação vem avançando na aquicultura, motivada pela expansão da produção e pelo aproveitamento dos recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS

- Allsopp, M., Santillo, D., & Dorey, C. (2013). Sustainability in aquaculture: present problems and sustainable solutions. *Ocean Yearbook*, 27(1), 1-22.
- Bartz, R. L., & Feiden, A. (2023). Water transparency analysis in fish farming environment through unmanned aerial vehicles. *Journal of applied research and technology*, 21(6), 912-920.
- Campos, R. F. (2011). PEGADA DE CARBONO: A RELAÇÃO ENTRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E HÁBITOS INSUSTENTÁVEIS. *Revista Geográfica de América Central*, 2, 1-16.
- Climate Policy Initiative. (2023). *Global Landscape of Renewable Energy Finance 2023*.
- Coltro, L., Tavares, M. P., & Sturaro, K. B. (2024). Life cycle assessment of conventional and organic Arabica coffees: from farm to pack. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-16.
- Costa, C. M., Valenti, W. C., & Kimpara, J. M. (2018). A carcinicultura marinha emite ou sequestra carbono? In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AQUICULTURA E BIOLOGIA AQUÁTICA, 8., 2018, Natal. Resumos. [Natal: Aquabio], 2018.
- de Oliveira Bordonal, R., Tenelli, S., da Silva Oliveira, D. M., Chagas, M. F., Cherubin, M. R., Weiler, D. A., ... & Carvalho, J. L. N. (2024). Carbon savings from sugarcane straw-derived bioenergy: Insights from a life cycle perspective including soil carbon changes. *Science of the Total Environment*, 947, 174670.
- Eler, M. N., & Millani, T. J. (2007). Métodos de estudos de sustentabilidade aplicados a aquicultura. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 36, 33-44.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The state of food and agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems*. Rome: FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9479en>
- Fundo Amazônia (2024). O Brasil cuida. O mundo apoia. Todos ganham. [Web page]. Retrieved from <http://www.fundoamazonia.gov.br/pt/home/>.
- Galindro, B. M., Zanghelini, G. M., & Soares, S. R. (2019). Use of benchmarking techniques to improve communication in life cycle assessment: A general review. *Journal of Cleaner Production*, 213, 143-157.
- Groover, M. P. (2011). *Automação industrial e sistemas de manufatura*. Pearson Education do Brasil.
- Haight, J. M., & Kecojevic, V. (2005). Automation vs. human intervention: What is the best fit for the best performance? *Process Safety Progress*, 24(1), 45-51.
- Huh, J. H. (2017). PLC-based design of monitoring system for ICT-integrated vertical fish farm. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 7, 1-19.

- Leal Junior, W. B., Nunes, R. M., & de Andrade, L. (2019). Development of a Low-Cost System for Monitoring Water Quality applied to Fish Culture.
- Luiz Junior, O. J., Macedo, H. R., Miranda, E. B., Bartz, R. L., & Feiden, A. (2022). Bibliometric study on carbon footprint in aquaculture. *Research, Society and Development*, 11(5), e8111527717-e8111527717.
- Kimpara, J. M., Zadjband, A. D., & Valenti, W. C. (2012). Métodos para medir a sustentabilidade na aquicultura.
- Kubitza, F., Campos, J. L., Ono, E. A., & Istchuk, P. I. (2012). Panorama da piscicultura no Brasil: Espécies cultivadas, sistemas de produção, perfil tecnológico e de gestão e os principais canais de mercado da piscicultura. *Panorama da Aquicultura*, 22(133), 16-31.
- Macedo, H. R., Junior, J. C. Z., Victor, V. F., & Serra, J. C. V. (2020). Modelo de planta automático e algoritmo de lógica e controle para produção de biodiesel. *Brazilian Journal of Development*, 6(8), 59168-59181.
- Macedo, H. R., Junior, O. J. L., & Feiden, A. (2024). Carbon Footprint: Scientometric Analysis of Publications from The Capes Thesis and Dissertations Database, Brazil. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(9), e7675-e7675.
- Martelli, A., de Oliveira Filho, A. J., Guilherme, C. D., Dourado, F. F. M., & Samudio, E. M. M. (2020). Análise de metodologias para execução de pesquisas tecnológicas. *Brazilian Applied Science Review*, 4(2), 468-477.
- Mattar, F. N. (2008). O setor de pesquisas de marketing, opinião e mídia no Brasil. *PMKT: Revista Brasileira de Pesquisas de Marketing, Opinião e Mídia*, 1(1), 8-14.
- Mehranzadeh, M., & Gholami, M. H. (2015). A Comparative Study on Productivity of Salmon Aquaculture in Conventional and PLC-equipped Ponds. *JOURNAL OF ADVANCES IN AGRICULTURE*, 4(3), 450–454. <https://doi.org/10.24297/jaa.v4i3.4276>.
- Pontes, Nádia. (2021). Deutsche Welle Brasil. Desmatamento impulsiona emissões de CO2 no Brasil em 2020 [Web page]. Retrieved from <https://www.dw.com/pt-br/desmatamento-impulsiona-emiss%C3%B5es-de-co2-no-brasil-em-2020/a-59657521>.
- Quarrie, J. (Ed.). (1992). *Earth Summit'92. The United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro 1992* (pp. 240pp+).
- Radu, A. L., Scrieciu, M. A., & Caracota, D. M. (2013). Carbon footprint analysis: Towards a projects evaluation model for promoting sustainable development. *Procedia Economics and Finance*, 6, 353-363.
- Riedo, I. G. (2017). Desenvolvimento da piscicultura em pequenas propriedades rurais: análise no contexto da trílice hélice. Retrieved from <http://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/1188>.
- Risius, A., Janssen, M., & Hamm, U. (2017). Consumer preferences for sustainable aquaculture products: Evidence from in-depth interviews, think aloud protocols and choice experiments. *Appetite*, 113, 246-254.
- Shen, K., Lu, H., Baig, S. A., Jiang, G., McManus, J. W., & Wang, M. R. (2017). Laser-based water depth measurement system deployed via unmanned aerial vehicle. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(3), 032409-032409.

- Simoes, J. S., Mársico, E. T., da Cruz, A. G., de Freitas, M. Q., Doro, L. H., & Conte-Junior, C. A. (2015). Effect of sustainability information on consumers' liking of freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(15), 3160-3164.
- Souza, M. C. O., & Corazza, R. I. (2017). Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*.
- Toigo, V. H. (2022). SISTEMA AUTOMATIZADO DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ÁGUA NA PISCICULTURA. *Revista Brasileira de Educação e Inovação da Univel (REBEIS)*, 1(3), 8-27.
- United Nations. (2021). UN chief welcomes China-US pledge to cooperate on climate action [web page]. Retrieved from <https://news.un.org/en/story/2021/11/1105512>.
- Valenti, W. C. (2008). A aquicultura brasileira é sustentável. Palestra apresentada durante o IV Seminário Internacional de Aqüicultura, Maricultura e Pesca, Aquafair, 13-15.
- Valenti, W. C., Kimpara, J. M., Preto, B. D. L., & Moraes-Valenti, P. (2018). Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. *Ecological indicators*, 88, 402-413.
- Winter, L., & Mota, S. H. R. (2021). Sistema automatizado de monitoramento e arraçamento aplicado à criação de tilápias em tanques-rede. *Revista Thêma et Scientia*, 11(2), 96-113.
- Zamzari, N. Z., Kassim, M., & Yusoff, M. (2022). Analysis and Development of IoT-based Aqua Fish Monitoring System. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 12(10), 191-197
- Zhang, Y., Hua, J., & Wang, Y. B. (2013). Application effect of aquaculture IOT system. *Applied mechanics and materials*, 303, 1395-1401.

## **CAPÍTULO 2. PEGADA DE CARBONO: ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA DE PUBLICAÇÕES DO BANCO DE TESES E DISSERTAÇÕES DA CAPES, BRASIL**

Humberto Rodrigues Macedo <sup>1</sup>  
Olavo José Luiz Junior <sup>2</sup>  
Aldi Feiden <sup>3</sup>

### **RESUMO**

A aquicultura é um dos setores produtivos que mais crescem no Brasil. Portanto, são necessárias pesquisas para conhecer/estimar a Pegada de Carbono desta importante atividade, bem como determinar ações para mitigar os danos causados ao meio ambiente pelos gases produzidos durante a produção aquícola. Este artigo realizou um estudo bibliométrico da produção científica em teses e dissertações, com base nos dados da CAPES, visando caracterizar as tendências de pesquisa na atividade aquícola. Os resultados evidenciam um crescente envolvimento dos pesquisadores dos Programas de Pós-Graduação brasileiros, refletindo o avanço e a diversificação dos estudos em relação ao tema Pegada de Carbono, com 87 trabalhos científicos concluídos, saltando de 2 trabalhos em 2010 para 13 trabalhos em 2023, que geraram 44 artigos científicos. Estes trabalhos foram realizados em programas de pós-graduação de diferentes áreas de concentração, com destaque para área de Ciências Agrárias. Entretanto, em relação ao setor aquícola, foi observado a quase inexistência de pesquisas nos programas de pós-graduação voltadas à emissão de carbono.

**Palavras-chave:** Estudo bibliométrico; Citação em revistas; Neutralização de Carbono; Scopus, Web of Science.

---

<sup>1</sup> Instituto Federal do Tocantins, Palmas, TO, Brasil. E-mail: humberto.macedo@ifto.edu.br

<sup>2</sup> Instituto Federal do Paraná, Assis Chateaubriand, PR, Brasil. E-mail: olavo.junior@ifpr.edu.br

<sup>3</sup> Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, Brasil. E-mail: aldifeiden@gmail.com

## **CARBON FOOTPRINT: SCIENTOMETRIC ANALYSIS OF PUBLICATIONS IN THE CAPES THESES AND DISSERTATIONS DATABASE, BRAZIL**

### **ABSTRACT**

Aquaculture is one of the fastest growing productive sectors in Brazil. Research is therefore needed to understand/estimate the Carbon Footprint of this important activity, as well as to determine actions to mitigate the damage caused to the environment by the gases produced during aquaculture production. This article carried out a bibliometric study of scientific production in thesis and dissertations, based on the CAPES database to analyze the interest of research on this theme, applied to aquaculture activity. The result showed a progressive interest in Brazilian postgraduate programs on the issue of Carbon Footprint, with 87 scientific works concluded, growing from 2 works in 2010 to 13 papers in 2023. These studies were carried out in postgraduate programs in different areas of concentration, especially in Agricultural Sciences. However, in relation to the aquaculture sector, there was very little research in postgraduate programs on carbon emissions.

**Keywords:** Bibliometric study; Journals citation; Carbon neutralization; Scopus; Web of science.

## 1. INTRODUÇÃO

O dióxido de carbono - CO<sub>2</sub>, ou gás carbônico, é um dos gases responsáveis pelo efeito estufa, e sua concentração na atmosfera contribui para as mudanças climáticas em nosso planeta, favorecendo o que é conhecido como aquecimento global. O impacto das atividades do homem sobre a natureza, a partir da quantidade de CO<sub>2</sub> emitida na atmosfera, forma a chamada Pegada de Carbono, termo criado pelos pesquisadores William Rees e Mathis Wackernagel (Radu *et al.*, 2013). Assim, a Pegada de Carbono consiste em um valor de emissão de CO<sub>2</sub>, medido em toneladas, geralmente mensal ou anual, informação utilizada para projetar ações de mitigação de emissões e para possibilitar ações de compensação das emissões atuais (Campos, 2011).

A preocupação com a relação entre a emissão de Gases de Efeito Estufa - GEE e a temperatura global é crescente e tem desafiado as nações a encontrarem um equilíbrio entre o crescimento e a preservação de seus recursos naturais, fato este, comprovado pelo intenso movimento global sobre o tema durante a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, a COP-26. Como um dos resultados dessa conferência, até mesmo grandes países emissores de GEE, como Estados Unidos e China, que antes se opunham significativamente à Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável da ONU, comprometeram-se a controlar suas emissões de gases de efeito estufa, entre outras ações (Nações Unidas, 2021).

Observa-se a necessidade de pesquisas voltadas para o estudo das emissões de gases de efeito estufa durante os processos de produção, buscando entender e avaliar os possíveis impactos ambientais associados à produção, quantificando e analisando os recursos consumidos e as emissões para o meio ambiente, desde a extração de matérias-primas até o descarte de resíduos (Kimpara *et al.*, 2012; Galindro *et al.*, 2019). Entre os sistemas de produção está a aquicultura, a área de interesse desta pesquisa.

Diferentes campos de estudo podem ser desenvolvidos com boas pesquisas, que apresentem a evolução e o estado da arte de sua área do conhecimento. Frequentemente, os primeiros passos referentes ao estudo de determinado tema são realizados nos programas de pós-graduação e seus grupos de pesquisa, por meio dos doutoramentos e mestrados dos novos pesquisadores, ao realizarem suas pesquisas e experimentos, com a finalidade da evolução do conhecimento. Este conhecimento pode ser compartilhado com a comunidade científica de várias formas. Porém, o mais imediato é a publicação do resultado por meio do trabalho final

da pós-graduação, seja uma tese de doutorado ou uma dissertação de mestrado, acadêmico ou profissional.

A publicização das teses e dissertações de programas de pós-graduação desempenha um papel relevante no avanço do conhecimento e na disseminação de descobertas acadêmicas. Valoriza o esforço dos pesquisadores e promove a transparência e o compartilhamento do conhecimento, impulsionando o desenvolvimento intelectual e social (Dantas, 2004).

Existem duas fontes principais de acesso às teses e dissertações no Brasil, ambas acessíveis através do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES. A CAPES é uma fundação vinculada ao Ministério da Educação do Brasil, que atua na expansão e consolidação da pós-graduação *stricto sensu* em todos os estados brasileiros. Uma delas é o Catálogo de Teses e Dissertações da própria CAPES, sistema oficial do governo brasileiro para a submissão de trabalhos acadêmicos, verificado pelo Ministério da Educação. A outra é o Banco de Teses do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia – IBICT, sendo uma ferramenta de busca que agrega as Bibliotecas Digitais de Teses e Dissertações - BDTD das instituições de ensino superior brasileiras, que adotam o sistema do IBICT. Ambas permitem a consulta online de trabalhos acadêmicos de diversas universidades. Contudo, uma vantagem do Catálogo da CAPES consiste em possuir o banco de dados de todas as teses e dissertações brasileiras, isto porque o depósito das teses e dissertações são obrigatórios por parte dos programas de pós-graduação (Unesp, 2024), mesmo aquelas que não tem seu texto integralmente disponibilizado para a comunidade.

Teses e dissertações são monografias que constituem em comunicação científica, e habilitam os pesquisadores a um título acadêmico. Outra produção científica importante oriunda destes trabalhos são os artigos científicos, normalmente extratos da pesquisa principal. Alguns programas de doutorado de vários países têm optado por permitir aos alunos da pós-graduação substituírem a redação dos capítulos da tese por artigos (Nassi-Calò, 2016). Independente desta possibilidade, a apresentação dos resultados do trabalho por meio de artigos publicados, em revistas científicas, é uma prática difundida, necessária e incentivada pela comunidade acadêmica. No Brasil, tanto os estudantes como os programas de pós-graduação possuem ferramentas de difusão de sua produção.

Os programas de pós-graduação são classificados e organizados por áreas de conhecimento, que abrangem 9 grandes áreas e se distribuem em 49 áreas de avaliação CAPES, conforme pode ser visto em CAPES (2022a). Esta classificação em áreas proporciona as instituições de ensino, pesquisa e extensão, uma maneira de organizar e sistematizar as

informações resultantes dos projetos de pesquisas desenvolvidos nos programas de pós-graduação (CAPES, 2022a).

O Currículo Lattes faz parte de uma plataforma do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, órgão que fomenta a ciência, tecnologia e inovação no Brasil, e que reúne a trajetória de pesquisadores, permitindo a inclusão de suas produções acadêmicas de forma padronizada, tornando-se assim uma base de consulta importante sobre as pesquisas que tem movimentado a ciência no Brasil, nas diversas áreas do conhecimento. O Currículo Lattes se tornou um padrão no registro da vida acadêmica de pesquisadores, adotado pela maioria das instituições de fomento, universidades e institutos de pesquisa do país (CNPQ, 2024). Por conta desta alternativa de divulgação, é fundamental que os pesquisadores mantenham seus currículos sempre atualizados, de forma a comporem com precisão esta poderosa ferramenta de busca sobre a pesquisa científica brasileira.

O Qualis Periódicos, da CAPES, é um dos instrumentos utilizados no Brasil para avaliar a produção intelectual de pesquisadores que publicam seus trabalhos em revistas científicas, e consiste num indicador utilizado na classificação dos periódicos. A classificação atual da CAPES, referente ao quadriênio 2017-2020, categoriza os periódicos nos seguintes estratos, do mais elevado ao menos relevante: Qualis A, dividido em A1, A2, A3 e A4, considerados estratos superiores; Qualis B, dividido em B1, B2, B3 e B4; Qualis C, este sem divisões e com peso zero na relevância de publicação (CAPES, 2023). Trabalhos publicados em anos anteriores à esta classificação, podem possuir estratos que não estejam nesta lista, como o B5. A CAPES utiliza o Qualis Periódicos das publicações científicas, de seus pesquisadores, na avaliação quadrienal dos programas de pós-graduação do Brasil (CAPES, 2024).

Além do Qualis, muito valorizado apenas no Brasil, o pesquisador tem acesso a outros conhecidos índices de referência de qualidade. O número de citações que o trabalho recebe por outros pesquisadores é um deles, principalmente quando realizadas em artigos publicados em reconhecidas bases de conteúdo científico, como *Scopus* e *Web of Science*. Ambas são bases de dados com publicações revisadas por pares, oferecendo abrangente produção sobre as pesquisas do mundo inteiro. A primeira agrega principalmente as áreas de ciências, tecnologia, medicina, ciências sociais, artes e humanas. A segunda, as áreas de ciências, ciências sociais e artes & humanidades. Ambas, inclusive, recebem indicação diferenciada a cada citação recebida pelo trabalho em publicações indexadas nestas bases, exibidas na seção “Artigos completos publicados em periódicos” do Currículo Lattes.

Outra métrica amplamente utilizada, apesar de controversa no meio científico, é o Fator de Impacto, que é um método bibliométrico para avaliar periódicos científicos com base nas citações que recebem (Ruiz *et al.*, 2009; Sperber & Kern, 2019). O fator de impacto é calculado somando-se as citações recebidas no ano corrente e dividindo pelo total de artigos publicados, nos dois anos anteriores. O *Journal Citation Reports* - JCR<sup>®</sup> é um índice reconhecido e responsável por atribuir o Fator de Impacto, analisando citações de mais de 11 mil revistas indexadas na *Web of Science*, conforme Agência de Bibliotecas e Coleções Digitais – ABCD, da USP (ABCD, 2023). Essa métrica também é apresentada na seção “Artigos completos publicados em periódicos” do Currículo Lattes, nos artigos publicados em revistas que o possuem.

Neste contexto, utilizar o Catálogo de Teses de Dissertações e o Currículo Lattes como origem de dados permite fazer estudos cientométricos sobre áreas de pesquisa no país. A Cientometria “é definida como o estudo da mensuração e quantificação do progresso científico, estando a pesquisa baseada em indicadores bibliométricos” (Silva & Bianchi, 2001). Assim, levando em consideração estes aspectos referentes à bibliometria, o objetivo desta pesquisa foi a análise cientométrica do tema Pegada de Carbono na aquicultura, considerando a produção acadêmica dos programas de Pós-graduação *Stricto Sensu* no Brasil.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa pode ser classificada como descritiva, de abordagem quantitativa, quanto ao seu objetivo. Na pesquisa descritiva, cabe ser feito, por parte do pesquisador, estudo, análise, registro e interpretação dos fatos, sem manipular ou interferir nos mesmos, devendo somente descobrir a frequência com que o fenômeno ocorre (Barros & Lehfeld, 2007; Gil, 2020). A pesquisa foi realizada por meio de um estudo bibliométrico. Nesta técnica, busca-se analisar uma base de pesquisas de publicações, usando parâmetros estatísticos, com objetivo de obter indicadores sobre autores, periódicos, ano e país de publicação, entre outros, para assim observar a direção da comunidade científica quanto a um determinado tema pesquisado (Gil, 2020; Paul & Criado, 2020).

## 2.1 Análises das Teses e Dissertações

O levantamento inicial de dados foi realizado por meio de pesquisa às teses e dissertações produzidas pelos Programas de Pós-graduação (PPG) de Instituições de Ensino Superior Brasileiras. A base de dados de publicações utilizada foi o Catálogo de Teses e Dissertações, disponível no Portal da CAPES (CAPES, 2022b). Tomou-se como base a metodologia adotada por Riedo e Feiden (2021). A busca na base de dados CAPES foi realizada no início do mês de maio de 2024.

A proposição inicial era investigar trabalhos que apresentassem pesquisas ligadas ao tema Pegada de Carbono associado à área da Aquicultura, a fim de aprofundar a pesquisa realizada em Luiz Junior *et al.* (2022). No primeiro momento a expressão de busca utilizada foi “PEGADA DE CARBONO” AND “AQUICULTURA”. O retorno somente de uma dissertação respondendo ao critério utilizado, levantou uma segunda questão de pesquisa: o quanto o tema pegada de carbono tem sido objeto de estudo nos diversos programas brasileiros de mestrado e doutorado, e quanto conhecimento científico sobre o tema tem sido criado a partir destes estudos? Buscou-se então entender qual a trajetória do estudo da pegada de carbono nos programas de pós-graduação.

Portanto, foi refeita a busca, na mesma base de dissertações e teses, reduzindo o termo de pesquisa para “PEGADA DE CARBONO”. Após a busca, realizou-se ainda um trabalho de revisão sistemática entre os resultados, o que confirmou que apenas um dos trabalhos foi realizado no contexto da aquicultura. Assim, o resultado sobre Pegada de Carbono permitiu uma análise quantitativa referente a: número de produções anuais, áreas do conhecimento dos trabalhos, programas aos quais os autores são vinculados e disposição em compartilhar as teses e dissertações. Para verificar as áreas de concentração do CNPq e de avaliação CAPES dos programas de pós-graduação brasileiros foi necessário extrair tais informações diretamente de suas páginas na internet.

## 2.2 Análise dos artigos publicados referentes as teses e dissertações

Restava ainda o interesse em saber o quanto estes estudos estavam gerando e compartilhando conhecimento por meio de artigos publicados em revistas científicas. Buscou-se então o levantamento das publicações originadas pelos trabalhos. A base de dados utilizada foi o currículo dos autores, disponível na Plataforma Lattes, no Portal do CNPq, conforme realizado em trabalhos semelhantes (Arboit *et al.*, 2011; Fernandes, 2022). Foram analisados

os trabalhos inseridos na seção “Artigos completos publicados em periódicos” do Currículo Lattes. Como premissas para a investigação foram delimitados os trabalhos em que o título do artigo fosse correlacionado à produção da pós-graduação finalizada pelo doutorando/mestrando, e que este tenha sido registrado como primeiro autor do artigo. A pesquisa identificou os autores que efetivamente conseguiram publicar e permitiu ainda uma análise quantitativa destas publicações.

Adicionalmente, permitiu verificar qualitativamente os periódicos que receberam estas publicações contendo o tema Pegada de Carbono, verificando índices como: número de citações *Scopus* e *Web of Science*, índice SCR<sup>®</sup> de Fator de Impacto e o Qualis CAPES. O Qualis observado foi o correspondente ao ano da publicação, de acordo com a classificação do Qualis, disponível no site da Plataforma Sucupira.

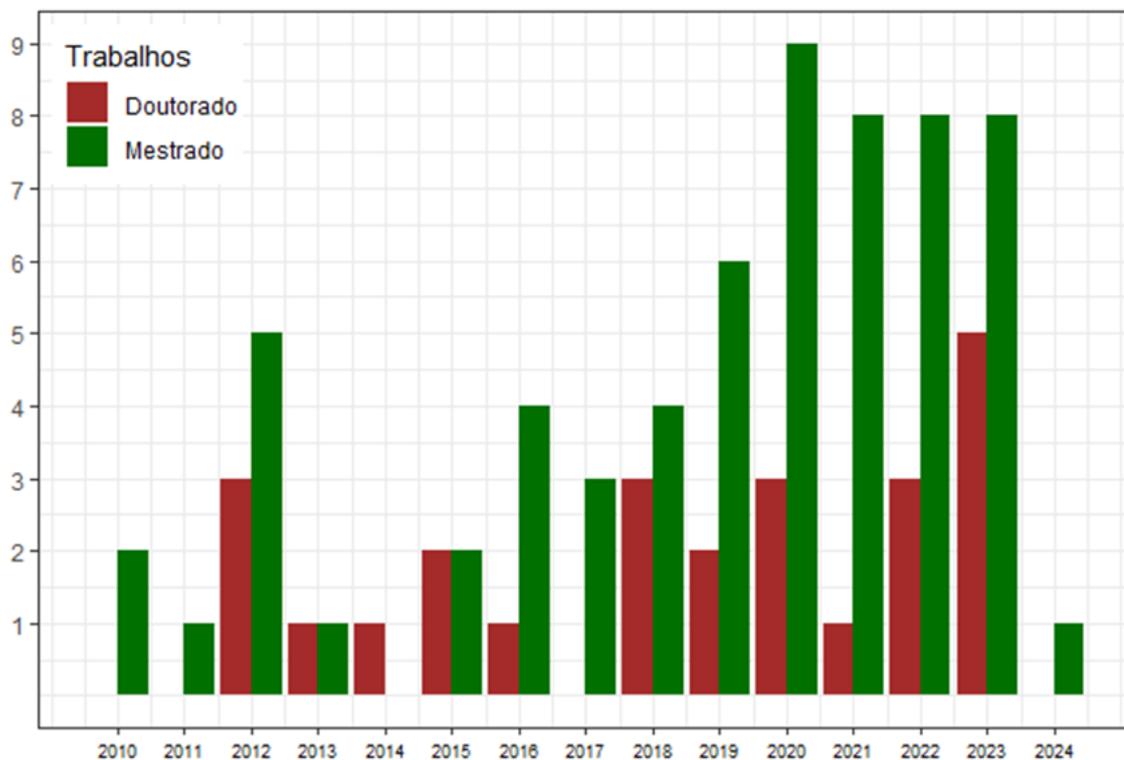
### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O trabalho inicial de busca, apresentou apenas um trabalho ligado à Pegada de Carbono na Aquicultura, que foi a dissertação de Petroski (2016), cujo objetivo era caracterizar os impactos ambientais decorrentes da produção de alevinos, para identificar pontos críticos e possibilidades de correção, e trabalhar na sustentabilidade ambiental nesta etapa da piscicultura. O mecanismo utilizado no trabalho foi o da Avaliação do Ciclo de Vida, metodologia para o levantamento da Pegada de Carbono no processo produtivo, encontrada ainda, em outros trabalhos verificados nesta pesquisa, e em conformidade com o observado por Luiz Junior *et al.* (2021).

A busca subsequente, que levou em consideração todos os trabalhos que tinham Pegada de Carbono como parte do estudo, trouxe um resultado de 87 trabalhos: sendo 25 teses, 62 dissertações (54 de mestrado acadêmico e 8 conclusões de mestrado profissional). A primeira ocorrência de trabalhos com esse tema deu-se no ano de 2010 e, desde então, a pesquisa apresenta uma crescente evolução de trabalhos ao longo dos anos. A Figura 1 apresenta essa evolução, segmentada pelo tipo de produção. Destaca-se o ano de 2023 com 13 trabalhos concluídos.

As universidades que mais se destacaram, em número de trabalhos concluídos, podem ser vistas na Tabela 1. A Universidade de São Paulo - USP apresentou a maior quantidade de trabalhos. O estado do Rio de Janeiro, se destacou entre os entes da federação, com as universidades (UFRJ, UFF e UFRRJ), somando 13 trabalhos concluídos.

**Figura 1.** Evolução dos trabalhos com o termo Pegada de Carbono em Programas de pós-graduação do Brasil.



Fonte: elaborado pelos autores. Dados: CAPES, 2024.

**Tabela 1.** Universidades que se destacaram em número de trabalhos finalizados com o tema pegada de carbono.

Qtd	Universidade	Teses	Dissertações	Mestrado Profissional
7	Universidade de São Paulo (USP)	2	5	0
6	Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)	3	2	1
5	Estadual Paulista (Unesp)	2	2	1
4	Federal Fluminense (UFF)	1	1	2
4	Federal da Paraíba (UFPB)	1	3	0
4	Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)	0	4	0
4	Federal de Santa Catarina (UFSC)	2	2	0
3	Federal da Bahia (UFBA)	1	2	0
3	Federal da Grande Dourados (UFGD)	1	2	0
3	Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)	1	2	0
3	Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)	0	2	1

Fonte: elaborado pelos autores (2024). Dados: CAPES, 2024.

A Tabela 2 apresenta a divisão entre as áreas de conhecimento do CNPQ e a área de avaliação CAPES dos programas de pós-graduação do Brasil que tiveram 87 trabalhos publicados com o tema Pegada de Carbono, na base CAPES de teses e dissertações. Os

programas de pós-graduação na área de concentração de Ciências Agrárias e de Engenharias destacaram-se nas pesquisas. Em relação as áreas de avaliação CAPES, as áreas de Ciências Agrárias I, Engenharias I e Zootecnia e Recursos Pesqueiros apresentaram 28, 11 e 8 trabalhos concluídos, respectivamente. A área de avaliação CAPES de Artes e Filosofia que pertencem a área do conhecimento de Ciências Humanas teve um trabalho concluído, cada. Portanto, a Tabela 2 demonstra que o assunto Pegada de Carbono tem sido objeto de estudo e pesquisas em diferentes áreas de conhecimento, demonstrando o caráter multidisciplinar do tema. Esta tendência se observa com a presença de 14 trabalhos concluídos na área de avaliação CAPES interdisciplinar referente a 4 áreas de conhecimento diferentes do CNPQ (Figura 2).

**Tabela 2.** Classificação entre as áreas de conhecimento do CNPq e a área de avaliação CAPES dos programas de pós-graduação para os 87 trabalhos com o tema Pegada de Carbono

QTD	Área do Conhecimento CNPQ	Área de Avaliação CAPES	Nº Trab.
40	Ciências Agrárias	Ciências Agrárias I	28
		Zootecnia e Recursos Pesqueiros	8
		Interdisciplinar	4
26	Engenharias	Engenharias I	10
		Engenharias II	6
		Engenharias III	5
		Engenharias IV	1
		Interdisciplinar	4
14	Ciências Sociais Aplicadas	Adm. Pub. e de Emp., Ciências Cont. e Turismo	5
		Interdisciplinar	5
		Comunicação e Informação e Museologia	1
		Direito	1
		Economia	1
4	Ciências Humanas	Arquitetura, urbanismo e Design	1
		Artes	1
		Filosofia	1
		Ciência Política e Relações Internacionais	1
1	Ciências da Saúde	Interdisciplinar	1
2	Ciências Exata e da Terra	Nutrição	1
2		Ciência da Computação	2
<b>87</b>		<b>Total</b>	<b>87</b>

Fonte: elaborado pelos autores, 2024. Dados: CAPES, 2024.

O Catálogo de Teses e Dissertações possui uma área de interação que permite disponibilizar à comunidade acadêmica, o resultado do trabalho em formato de documento digital, o que não é obrigatório. Muitos pesquisadores não o fazem por motivos de propriedade

intelectual, caso tenham a intenção de transformar o trabalho em uma patente, por exemplo. Neste caso, haverá a mensagem “trabalho não possui divulgação autorizada”. Um total de 25 trabalhos se encontraram nessa condição. Porém, alguns, notadamente os mais recentes, podem não ter sido incluídos ainda por não ter se passado tempo suficiente após a defesa da tese ou dissertação, e registro na respectiva biblioteca. Outros 2 trabalhos são anteriores à Plataforma Sucupira, e não possuem documentos disponíveis, o que é explicado no Catálogo. Assim, das 87 teses e dissertações, 60 encontram-se disponíveis para download.

**Figura 2.** Ocorrência de teses e dissertações na área de avaliação CAPES interdisciplinar, em diferentes áreas do conhecimento do CNPq para o tema Pegada de Carbono.

	CNPq - Área do conhecimento	Nº Trab.
CAPES - Área de avaliação Interdisciplinar	Ciências Sociais Aplicadas	5
	Ciências Ágrarias	4
	Engenharias	4
	Ciências Humanas	1

Fonte: elaborado pelos autores, 2024. Dados: CAPES, 2024.

### 3.1 Das publicações de artigos provenientes de teses e dissertações

A análise individual, realizada no Currículo Lattes de cada autor para identificar a existência de publicações oriundas das Teses e Dissertações resultou numa quantidade de 47 destes trabalhos que não apresentaram artigos publicados, em periódicos, até o momento da pesquisa. Além destes, 2 autores não possuem Lattes, então também foram marcados como sem publicações. As publicações encontradas somaram 44 artigos, oriundas de 38 trabalhos, isto devido a possibilidade de uma pesquisa gerar mais que uma (1) publicação. Estes 44 artigos foram publicados em 35 diferentes periódicos.

No que se refere às revistas científicas que se destacaram quanto ao número de publicações, oriundas dos trabalhos finalizados nos PPG com o tema Pegada de Carbono, 3 destacaram-se. O “Journal of Cleaner Production”, editado pela Elsevier, apareceu com 6 publicações, sendo 3 a partir de doutorados e 3 de mestrados. Esta é uma revista com índice JCR de 11,1, e um Qualis CAPES A1 (quadriênio 2017-2020). “The International Journal of Life Cycle Assessment”, editado pela Springer também se destacou, com 3 ocorrências (2 de doutorado e 1 de mestrado). Esta é uma revista que também possui Qualis CAPES A1, e seu índice JCR é de 4,8. Na sequência, outro destaque foi a revista científica “Engenharia Sanitária e Ambiental” da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, também

com 3 publicações, sendo 1 de doutorado e 2 de mestrado. Esta é uma revista citada no JCR, com índice de 0,5 e Qualis CAPES A4.

A análise dos índices Qualis CAPES dos periódicos pode ser vista na Tabela 3. Importante ressaltar que se levou em consideração a classificação do periódico, de acordo com a tabela Capes, relativa ao ano da sua publicação.

**Tabela 3.** Classificação Qualis CAPES dos periódicos com o tema pegada de carbono que geraram publicações científicas.

<b>Estrato</b>	<b>Qualis CAPES</b>	<b>Quantidade</b>
Superior	A1	10
Superior	A2	4
Superior	A3	1
Superior	A4	2
Inferior	B1	2
Inferior	B2	3
Inferior	B3	1
Inferior	B4	1
Inferior	B5	1
Sem	C	3
Sem	Sem Qualis	7

Fonte: elaborado pelos autores, 2024. Dados: CAPES, 2024.

O total de 87 trabalhos concluídos (teses e dissertações) identificados nesta pesquisa sobre o tema Pegada de Carbono gerou 44 artigos. Destes, 22 artigos foram indexados na base de dados Scopus e receberam 628 citações, enquanto 23 artigos foram indexados na base de dados Web of Science e receberam 586 citações. O artigo com maior número de citações, tanto na Scopus, com 94, quanto na Web of Science, com 86, foi o artigo Life cycle assessment in Brazilian agriculture facing worldwide trends, publicado no Journal of Cleaner Production em 2012, periódico com JCR de 11,1 e Qualis CAPES A1 (Ruviano *et al.*, 2012). Esse artigo foi proveniente da tese de doutorado em Agronegócios da UFRGS, do pesquisador Cláudio Favari Ruviano, intitulada Avaliação do ciclo de vida na produção de carne bovina no Brasil (Ruviano, 2012).

#### 4. CONCLUSÃO

A pesquisa atingiu o objetivo de analisar o interesse acadêmico sobre a pegada de carbono, e demonstrou que o tema teve uma crescente exploração pelos pesquisadores dos

Programas de Pós-graduação do Brasil, principalmente em programas de pós-graduação nas áreas de Ciências Agrárias, Interdisciplinar e Engenharias. Contudo, o tema Pegada de Carbono relacionado a Aquicultura teve apenas uma única dissertação na Base CAPES, demonstrando a necessidade de avanços de pesquisas para estimar a Pegada de Carbono na Aquicultura e aprofundar o estudo de soluções para alcançar uma aquicultura mais sustentável, especialmente no que se refere às emissões de carbono.

## REFERÊNCIAS

- ABCD, Agência de Bibliotecas e Coleções Digitais da USP. (2023). Clarivate lança Journal Citation Reports 2023. Available at: <https://www.abcd.usp.br/noticias/journal-citation-reports-2023/>. Accessed on: May 09, 2024.
- Arboit, A. E., Bufrem, L. S., & González, J. A. M. (2011). A produção Brasileira em Ciência da Informação no exterior como reflexo de institucionalização científica. *Perspectivas em Ciência da Informação*, 16(3), 75-92. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-99362011000300005>
- Barros., A. J. da S., & Lehfeld, N. A. de S. (2007). *Fundamentos de metodologia científica*. São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- Campos, R. F. (2011). Pegada de carbono: a relação entre mudanças climáticas e hábitos insustentáveis. *Revista Geográfica de América Central*, 2, 1-16.
- CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. (2023). CAPES publica metodologia do Qualis. Available at: <https://www.gov.br/capes/pt-br/assuntos/noticias/capes-publica-metodologia-do-qualis>. Accessed on: May 05, 2024.
- CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. (2022b) Catálogo de Teses e Dissertações. Brazil. Available at: <http://catalogodeteses.capes.gov.br/catalogo-teses/#/>. Accessed on: April 12, 2024.
- CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. (2024). Sobre a Avaliação: conceitos, processos e normas: Conceitos, processos e normas. Available: <https://www.gov.br/capes/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/avaliacao/sobre-a-avaliacao/avaliacao-o-que-e/sobre-a-avaliacao-conceitos-processos-e-normas>. Accessed on: May 10, 2024.
- CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. (2022a). Tabela de Áreas de Conhecimento/Avaliação. Brazil. Available at: <https://www.gov.br/capes/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/avaliacao/instrumentos/documentos-de-apoio/tabela-de-areas-de-conhecimento-avaliacao>. Accessed on: May 18, 2024.
- CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. (2024). Sobre a plataforma Lattes. Brazil. Available at: <https://lattes.cnpq.br/>. Accessed on: April 12, 2024.

- Dantas, F. (2024). Responsabilidade social e pós-graduação no Brasil: idéias para (avali)ação. *Revista Brasileira de Pós-Graduação*, 1 (2). DOI: 10.21713/2358-2332. 2004.v1.46.
- Fernandes, H. D. H. (2022). Um modelo de fluxo da informação científica para as áreas de informação no brasil: proposta baseada em projetos de pesquisa dos currículos da Plataforma Lattes (2005-2019) (Master's Dissertation). Universidade de Brasília.
- Galindro, B. M., Zanghelini, G. M., & Soares, S. R. (2019). Use of benchmarking techniques to improve communication in life cycle assessment: A general review. *Journal of Cleaner Production*, 213, 143-157.
- Gil, A. C. (2020). *Metodologia do ensino superior*. 5 ed. São Paulo: Atlas.
- Kimpara, J. M., Zadjband, A. D., & Valenti, W. C. (2012). Métodos para medir a sustentabilidade na aquicultura. 1 ed. Teresina: Embrapa Meio-Norte
- Luiz Junior, O. J., Macedo, H. R., Miranda, E. B., Bartz, R. L., & Feiden, A. (2022). Bibliometric study on carbon footprint in aquaculture. *Research, Society and Development*, 11(5), p. e8111527717. DOI: 10.33448/rsd-v11i5.27717.
- Nassi-Calò, L. (2016). Teses e dissertações: prós e contras dos formatos tradicional e alternativo [online]. SciELO em Perspectiva. Available at: <https://blog.scielo.org/blog/2016/08/24/teses-e-dissertacoes-pros-e-contras-dos-formatos-tradicional-e-alternativo/>. Accessed on: May 13, 2024.
- Paul, J., & Criado, A. R. (2020). The art of writing literature review: what do we know and what do we need to know? *International Business Review*, 29(4), p. 101717.
- Petroski, L. P. S. (2016). Avaliação do Ciclo de Vida na produção de alevinos de espécies tropicais continentais (Master's Dissertation). Universidade Federal da Bahia.
- Radu, A. L., Scriciu, M. A., & Caracota, D. M. (2013). Carbon footprint analysis: towards a projects evaluation model for promoting sustainable development. *Procedia Economics and Finance*, 6, 353-363.
- Riedo, I. G., & Feiden, A. (2021). Triple Helix Theory: What does the research of the Brazilian Postgraduate Programs present? *Research, Society and Development*, 10(9), p. e14410918036. DOI: 10.33448/rsd-v10i9.18036.
- Ruiz, M. A., Greco, O. T., & Braile, D. M. (2009). Journal impact factor: this editorial, academic and scientific influence. *Revista Brasileira de Cirurgia Cardiovascular*, 24(3), 273 - 278. <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-76382009000400004>.
- Ruviaro, C. F. (2012). Life cycle assessment in beef production in Brazil (Doctoral Thesis). Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, RS. UFRGS Digital repositior. Available at: <http://hdl.handle.net/10183/67543>. Accessed on: May 22, 2024.
- Ruviaro, C. F., Gianezini, M., Brandão, F. S., Winck, C. A., & Dewes, Homero. (2012). Life cycle assessment in Brazilian agriculture facing worldwide trends. *Journal Of Cleaner Production*, 28 9-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.015>.

- Silva, J. A., & Bianchi, M. de L. P. (2001). Cientometria: a métrica da ciência. *Paidéia* (Ribeirão Preto), 11(21), 5 – 10. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-863x2001000200002>.
- Sperber, M., & Kern, V. M. (2019). Qualidade de revistas científicas: uma revisão sistemática da literatura. *Revista Ibero-Americana de Ciência da Informação*, 12(3), 941 – 955. DOI: 10.26512/rici.v12.n3.2019.21000.
- UNESP, Universidade Estadual de São Paulo. (2024). What is the difference between the Capes Thesis Portal and the IBICT BDTDs? Library of the Institute of Science and Technology - Sorocaba Campus. Available at: <https://www.sorocaba.unesp.br/#!/biblioteca/diferenca-entre-bdtd-e-capes/>. Accessed on: May 02, 2024.
- United Nations. (2021). UN chief welcomes China-US pledge to cooperate on climate action. Available at: <https://news.un.org/en/story/2021/11/1105512>. Accessed on: May 11, 2024.

## **CAPÍTULO 3. DESENVOLVIMENTO E TESTES DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA ESTIMAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> EM VIVEIROS ESCAVADOS**

### **RESUMO**

A aquicultura brasileira, especialmente a piscicultura, apresentou expressivo crescimento na última década, consolidando-se como uma importante atividade econômica no setor agropecuário. Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema eletrônico e uma metodologia para estimar a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em viveiros escavados, visando aprimorar a compreensão sobre a pegada de carbono na piscicultura. O sistema, composto por estufas equipadas com microcontroladores ESP32 e sensores de temperatura e de CO<sub>2</sub> foi testado em viveiros localizados no oeste do Paraná. Foram analisadas as correlações entre a temperatura e a concentração de CO<sub>2</sub>, tanto em condições de céu limpo quanto nublado, e durante o período noturno. Os resultados indicaram que, fora das estufas, houve uma correlação negativa significativa entre a temperatura e a concentração de CO<sub>2</sub>, sugerindo que o aquecimento diurno reduz a concentração desse gás no ambiente externo. Em contraste, dentro das estufas, a concentração de CO<sub>2</sub> apresentou menor variação, permanecendo estável em torno de 400 partes por milhão (p.p.m) para os dias com céu limpo e 416 para dias nublados. No período noturno a concentração média de CO<sub>2</sub> estimada foi de 588 p.p.m, enquanto no interior da estufa a média estimada foi de 416,8 p.p.m. Os resultados mostram a diferença entre os períodos noturno e diurno e a variabilidade da concentração em diferentes condições climáticas. Portanto verifica-se a importância de sistemas de monitoramento precisos para a avaliação da pegada de carbono em sistemas aquícolas.

**Palavras-chave:** Aquicultura; Dióxido de Carbono; Estufas; Sensores Eletrônicos; Pegada de Carbono.

## DEVELOPMENT AND TESTING OF AN ELECTRONIC SYSTEM FOR ESTIMATING CO<sub>2</sub> CONCENTRATION IN EXCAVATED PONDS

### ABSTRACT

Brazilian aquaculture, especially fish farming, has shown significant growth in the last decade, consolidating itself as an important economic activity in the agricultural sector. This work describes the development of an electronic system and a methodology to estimate carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions in excavated ponds, with the aim of improving understanding of the carbon footprint of fish farming. The system, consisting of greenhouses equipped with ESP32 microcontrollers and temperature and CO<sub>2</sub> sensors, was tested in ponds located in western Paraná. The correlations between temperature and CO<sub>2</sub> concentration were analyzed, both in clear and cloudy sky conditions, and during the night. The results indicated that, outside the greenhouses, there was a significant negative correlation between temperature and CO<sub>2</sub> concentration, suggesting that daytime heating reduces the concentration of this gas in the external environment. In contrast, inside the greenhouses, the CO<sub>2</sub> concentration showed less variation, remaining stable at around 400 parts per million (p.p.m) for clear days and 416 for cloudy days. At night, the estimated average CO<sub>2</sub> concentration was 588 p.p.m, while inside the greenhouse the estimated average was 416.8 p.p.m. These results highlight the importance of accurate monitoring systems for assessing the carbon footprint of aquaculture systems and provide subsidies for improving these systems.

**Keywords:** Aquaculture; Carbon Dioxide; Greenhouses; Electronic Sensors; Carbon Footprint.

## 1. INTRODUÇÃO

A aquicultura brasileira, em especial a piscicultura, passa por um crescimento expressivo nas últimas décadas, destacando-se como uma das áreas de maior expansão dentro da produção animal. Esse avanço é impulsionado por um conjunto de fatores econômicos, tecnológicos e ambientais. Dados da Produção Pecuária Municipal – PPM mostram que a produção aquícola do Brasil avançou de 476,521 mil toneladas, em 2013, para 791,498 mil toneladas, em 2023. A produção de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) para este mesmo período avançou de 169,3 mil toneladas para 442,174 mil toneladas (IBGE, 2024), consolidando o Brasil como o quarto maior produtor mundial de tilápia.

O avanço da piscicultura no Brasil está relacionado a uma série de fatores; impulsionada pela demanda crescente por proteína animal e a abundância de recursos hídricos no território brasileiro. Isso oferece um ambiente natural propício à criação de peixes. Dentre as ações fundamentais para o fomento do setor, o Ministério do Meio Ambiente – MMA destaca: as políticas governamentais para a desburocratização e simplificação de licenças ambientais, ao promover o aumento no número de empreendimentos aquícolas; o desenvolvimento de políticas de crédito, como o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar – PRONAF. O aumento de investimentos em tecnologia e infraestrutura para a criação de peixes em tanques-rede e viveiros escavados foram fundamentais para fomentar o setor (MMA, 2022).

Apesar de não haver uma série histórica anual específica apontando a taxa de crescimento de áreas destinadas a aquicultura em todas as regiões do Brasil, é possível observar através de sensoriamento remoto, uma tendência de expansão tanto em número de piscicultores quanto em área ocupada, especialmente nas regiões Sul e Sudeste (São José *et al.*, 2021). Essa expansão tem sido impulsionada pelo uso mais eficiente das terras, como ocorre com o aproveitamento de barragens e com integração com a agricultura familiar. O uso de viveiros escavados se expande nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, favorecidos por condições geográficas e climáticas adequadas. Esses viveiros permitem a criação de peixes como tilápia, tambaqui e outras espécies de água doce, que se adaptam bem a ambientes controlados, conforme estudos realizados pela Embrapa Pesca e Aquicultura (Embrapa, 2022).

A expansão da área destinada a produção piscícola provoca alterações no uso e ocupação de solo das microbacias e sub-bacias, por exemplo, o aumento da quantidade de viveiros escavados em áreas de microbacia, conforme observado por Macedo *et al.* (2024) e Werneck *et al.* (2024). Este acréscimo de viveiros escavados pode alterar a dinâmica da concentração de CO<sub>2</sub>, especialmente pela ocorrência da fotossíntese realizada pelas algas que contribuem na

oxigenação da água. A fotossíntese é um processo essencial nos viveiros escavados para piscicultura. Durante o período diurno, na presença da luz solar, as algas realizam a fotossíntese, absorvendo Dióxido de Carbono  $\text{CO}_2$  e liberando Oxigênio ( $\text{O}_2$ ) como subproduto. Esse processo aumenta o nível de oxigênio dissolvido na água, o que beneficia os peixes e outros organismos aquáticos (Boyd, 2019). Entretanto, durante o período noturno, as algas passam a consumir oxigênio em vez de produzi-lo. Durante a noite pode ocorrer quedas significativas nos níveis de oxigênio em viveiros escavados com alta densidade, podendo ser necessário o uso de aeradores para evitar problemas de saúde nos peixes (Bunting, 2013).

As algas influenciam na qualidade da água, por isso pode ser considerado um fator importante na piscicultura em viveiros. A monitoração da densidade das algas e do oxigênio dissolvido auxiliam na diminuição das variações extremas do oxigênio, e assim proporcionando um ecossistema estável e saudável para a criação dos organismos aquáticos em viveiros escavados. (Boyd & Tucker, 2012).

A concentração média global de  $\text{CO}_2$  na atmosfera atingiu aproximadamente 420 p.p.m em 2023, representando um aumento significativo em relação aos níveis pré-industriais, segundo o boletim da *World Meteorological Organizations* (World Meteorological Organization, 2024). Assim, o objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um sistema eletrônico para estimar a emissão de  $\text{CO}_2$  em viveiros escavados, utilizando estufas equipadas com microcontrolador, sensores eletrônicos e dispositivos acessórios. Os objetivos secundários foram: elaborar um experimento para testar o sistema eletrônico desenvolvido, coletando dados para estimar a dinâmica temporal da concentração de  $\text{CO}_2$ , em viveiros escavados, durante o período diurno e noturno e verificar a existência de correlação entre a concentração de dióxido de carbono e a temperatura ambiente nos viveiros escavados. Os resultados dos testes do equipamento deverão ser utilizados para aprimorar a metodologia, a fim de avançar para um modelo que possa estimar a pegada de carbono em viveiros escavados utilizado para a piscicultura.

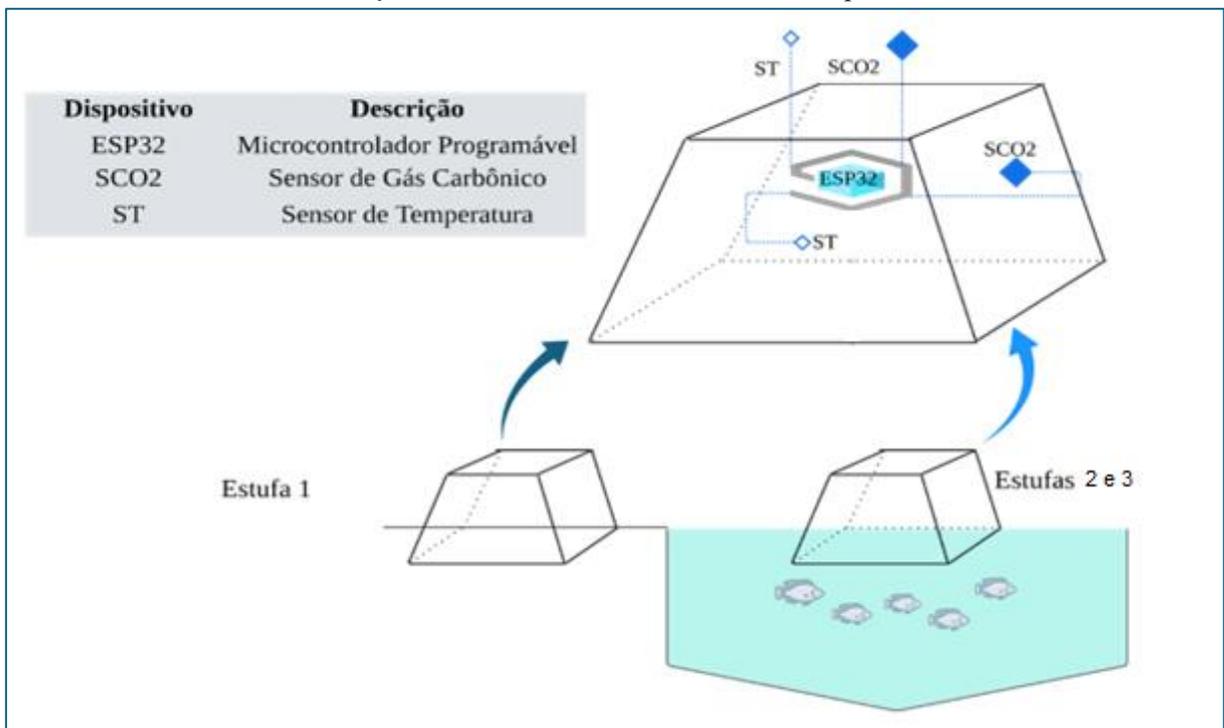
## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Descrição do sistema de monitoramento de dióxido de carbono**

A montagem do sistema eletrônico embarcado nas estufas foi realizada nas instalações do campus da Universidade Estadual do Oeste do Paraná situado no município de Toledo. Com a finalidade de estimar a dinâmica da concentração de carbono durante a criação de peixes foi

proposto um experimento com 3 (três) estufas idênticas, em formato de tronco de pirâmide, com as seguintes medidas: base quadrada com 1 metro de lado; topo quadrado com 0,8 metro de lado e quatro hastes que ligam a base ao topo com 0,61 metro. 2 (duas) estufas foram colocadas na superfície de viveiros escavados, com suporte de boias e 1 (uma) sobre o solo, nas proximidades das demais. As estufas foram construídas em armação de ferro cobertas e seladas com plástico transparente de 150 micras, em formato de tronco de pirâmide, formando um volume interno de 0,496 m<sup>3</sup>. O formato de tronco de pirâmide foi escolhido devido a facilidade de transportar as estufas em veículos para os testes e uso em pisciculturas, pois permite que uma estufa fique dentro da outra. Todas as estufas foram equipadas com microcontrolador ESP32, dotado de um microprocessador Tensilica Xtensa LX5, com 2 núcleos de processamento, conectados com sensores eletrônicos. Os sensores eletrônicos foram alocados da seguinte maneira: Internamente - gás carbônico (SCO2) e de temperatura (ST), enquanto na parte externa da estufa foram adicionados um sensor de temperatura e outro de CO<sub>2</sub>. Os sensores internos foram colocados a 35 cm da lâmina d'água, enquanto os externos foram fixados na parte superior da estufa. Um esquema unifilar do sistema eletrônico embarcado em estufas, pode ser visto na Figura 1.

**Figura 1.** Esquema unifilar do sistema eletrônico embarcado em estufa, para estimar a dinâmica da concentração de CO<sub>2</sub> em viveiros escavados da aquicultura.



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

## 2.2 Descrição do Material

A lista de materiais utilizados para a construção das estufas equipadas com os sensores eletrônicos, controlador programável e seus periféricos, está detalhada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Principais materiais e componentes utilizados no sistema eletrônico embarcado nas estufas.

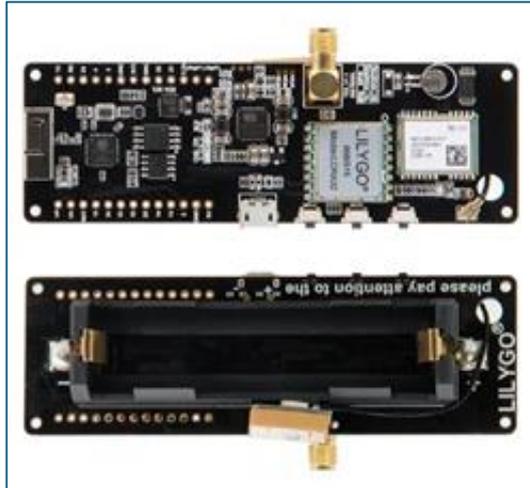
Componente	QTD	Função
ESP32 T-Beam com Suporte de Bateria, GPS e LoRa	3	Microcontrolador responsável pelo processamento dos dispositivos
Bateria 18650 Recarregável, 3,7 volts, 6800mah	9	Bateria de Lítio Íon para alimentar o microcontrolador
Carregador 5v USB	3	Alimentação do circuito eletrônico quando instalados em locais com energia elétrica disponível
Leitor Micro SD Card c/ cartão de 16GBytes	3	Unidade de gravação para registro das leituras dos sensores
Relógio de Tempo Real (RTC) DS3232	3	Relógio para registro de data e hora das leituras dos sensores
Sensor MH-Z19B	6	Sensor infravermelho para detecção de CO <sub>2</sub>
Sensor BMP180	3	Sensor para captura de temperatura ambiente e pressão atmosférica
Sensor AM2302 DHT22	3	Sensor de temperatura ambiente e umidade relativa do ar
Ferro vergalhão 8mm	12m	Vergalhão para a base da estufa
Ferro vergalhão 4.2mm	18m	Vergalhão para as hastes e topo da estufa
Plástico 150 micras	24m <sup>2</sup>	Revestir a estufa
Garrafas plásticas 5 litros	8	Utilizado como boias para as estufas dos viveiros

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

### 2.2.1 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, com conectividade *Wi-Fi* e *Bluetooth*, numa placa de pequena dimensão e peso. Esta versão, apresentada na Figura 2, oferece suporte adicional a LoRa (*Long Range*), uma tecnologia de comunicação sem fio que permite a transmissão de dados a distâncias maiores que o *Wi-Fi*. Isso é particularmente útil para aplicações em ambientes remotos ou rurais, onde a infraestrutura de comunicação pode ser limitada. O ESP32 é projetado para funcionar com eficiência de consumo graças a recursos avançados de gerenciamento de energia. Este modelo possui ainda um suporte para bateria removível que simplifica a criação de aplicações móveis e autônomas.

**Figura 2.** Placa ESP32 TTGO T-Beam com Suporte de Bateria e LoRa.



Fonte: acervo do autor, 2024.

### 2.2.2 Sensores de temperatura

Para a mensuração da temperatura, tanto interna quanto externa à estufa, foram adquiridos dois sensores, utilizados em projetos eletrônicos, o BMP180 e o DHT22. Buscou-se a utilização de 2 modelos diferentes para poder aferir durante a calibração qual seria mais adequado operacionalmente para utilização em cada parte da estufa (interna e externa). O sensor BMP 180 foi escolhido para as leituras internas e o DHT22 para as leituras externas devido seu formato mais robusto, sendo considerado mais adequado para suportar o ambiente externo.

O BMP180 é um sensor de temperatura de pequena dimensão (Figura 3), o que facilita a integração em sistemas compactos, e que também mede a pressão barométrica. Ele promete alta precisão e resposta rápida, tornando-o interessante para aplicações meteorológicas. Sua documentação informa que a faixa de leitura está compreendida entre temperaturas de 0°C a 65°C, com precisão de  $\pm 1\%$ . Quanto à pressão barométrica, a faixa está entre 300 hPa e 1.100 hPa (hectopascals), com precisão de aproximadamente  $\pm 0.12$  hPa.

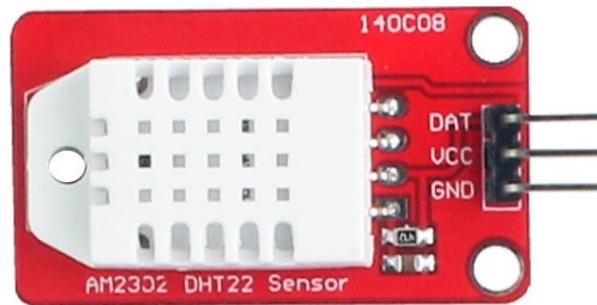
**Figura 3.** Sensor de Temperatura e Pressão BMP180.



Fonte: acervo do autor, 2024.

O DHT22 é um sensor digital de temperatura e umidade (Figura 4), que pode medir temperaturas de - 40 a 80°C, com uma precisão de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , e umidade de 0 a 100%, com precisão de  $\pm 2\%$ , segundo o material técnico do fabricante. Também é um sensor pequeno, o que facilita sua instalação.

**Figura 4.** Módulo de sensor de Temperatura e Umidade DHT22



Fonte: acervo do autor, 2024.

### 2.2.3 Sensor de CO<sub>2</sub>

Os sensores de CO<sub>2</sub> foram testados para serem utilizados na estufa para mensurar a concentração de gás carbônico, em p.p.m (partes por milhão). O Sensor MH-Z19B (Figura 5) foi escolhido devido preço acessível e tecnologia de detecção por infravermelho não dispersivo (NDIR), prometendo ser altamente eficaz para medir concentrações de CO<sub>2</sub> em tempo real. Sua documentação técnica indica uma faixa de medição entre 0 e 5.000 p.p.m. e tolerância de 5%.

**Figura 5.** Sensor de Dióxido de Carbono MH-Z19B

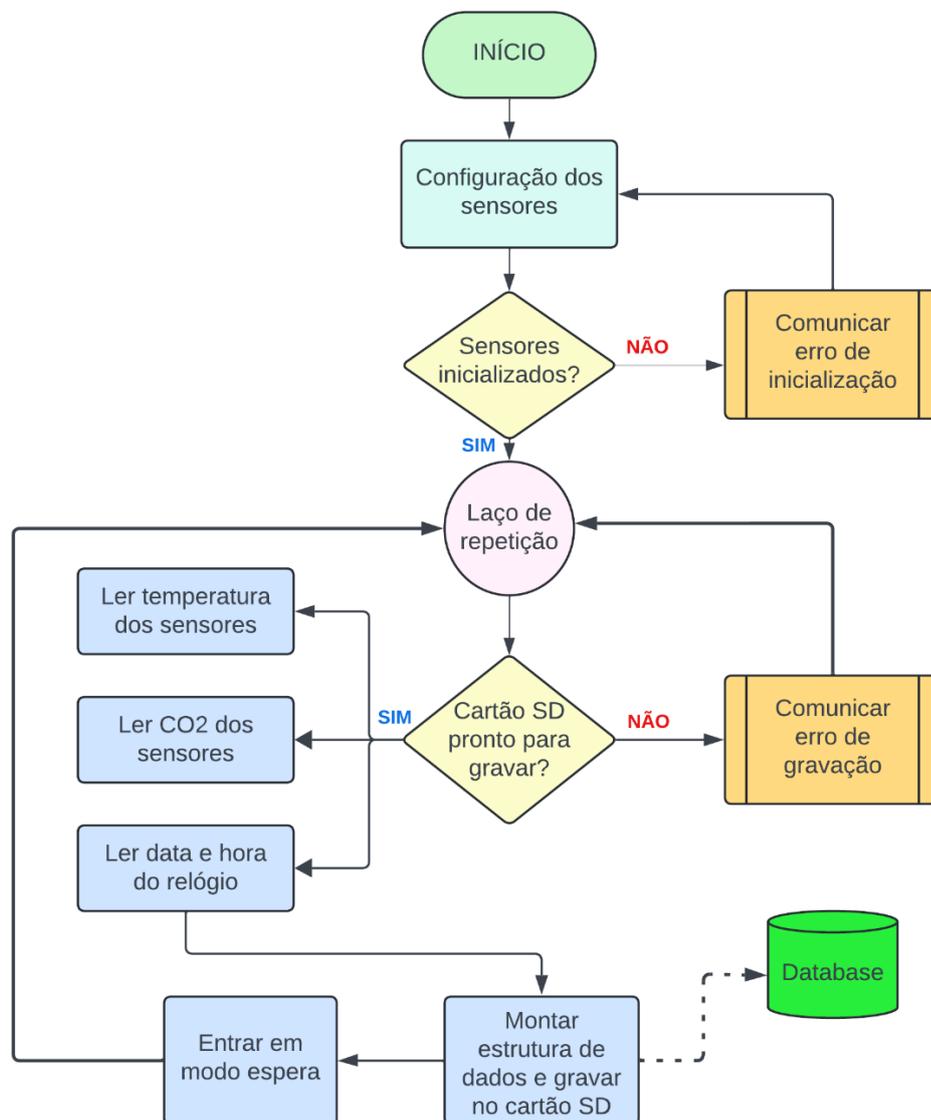


Fonte: acervo do autor, 2024.

## 2.2.4 Procedimentos Iniciais: Calibração dos Sensores e Desenvolvimento da Programação

A montagem do circuito, com a ligação de todos os componentes foi realizada utilizando informações do manual técnico dos equipamentos, e quando necessário, consultado informações complementares em sites e fóruns sobre aplicações do ESP32. Em seguida foram realizados testes de comunicação com os sensores e a rotina lógica de programação foi aperfeiçoada de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 6. O aplicativo Arduino IDE foi utilizado para a programação do microcontrolador e os testes de comunicação e leitura.

**Figura 6.** Fluxograma para desenvolvimento da programação lógica do Sistema Eletrônico.



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Para a calibração dos sensores, estes foram submetidos às mesmas variáveis ambientais por 8 horas seguidas em ambiente externo, com circulação de ar, conforme descrito pelo manual do sensor. As leituras foram comparadas, de forma a garantir que sobre as mesmas condições, as leituras estejam compatíveis. Essa calibração é fundamental, pois as diferentes leituras dos sensores, quando o experimento estiver rodando, serão os dados importantes da pesquisa.

### 2.3 Testes Preliminares e Coleta de Dados

Os testes iniciais foram importantes para verificar a necessidade de melhorias, tanto em relação aos equipamentos eletrônicos, quanto na metodologia de uso das estufas. Os sensores foram programados para registrar em cartão de memória leituras a cada minuto. Foram excluídas as leituras com variação muito grande dentro do intervalo de 20 minutos. Uma média a cada 20 minutos destas leituras foi utilizada. Essas médias (3 por hora) foram utilizadas para realizar a análise temporal da dinâmica de concentração de CO<sub>2</sub>, em viveiros escavados (estufas de 1 a 3). Este testes iniciaram-se em 17 de dezembro de 2024 às 6 horas e encerrou-se no dia 18 de dezembro de 2024 às 20 horas – dias de condição climática nublado; e dia 07 de janeiro de 2025, de 5 horas às 20 horas, dia considerado de céu limpo, de acordo com a condição climática INMET (Instituto Nacional de Meteorologia, s.d.):

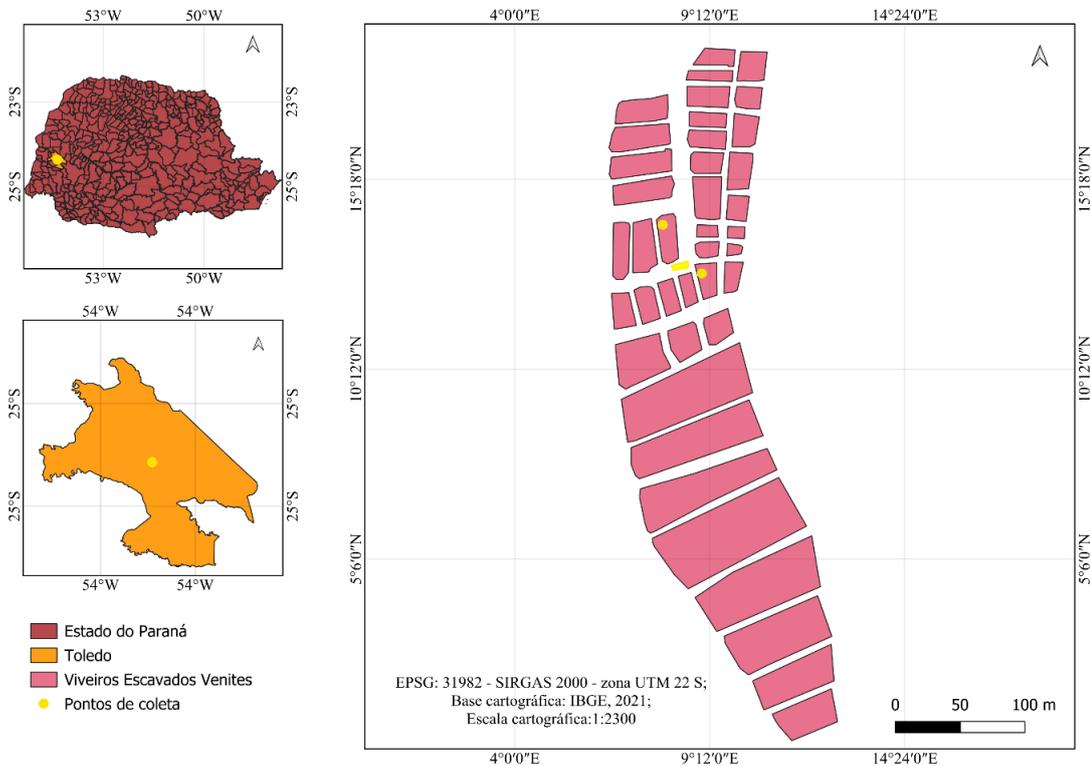
- Céu limpo – O estado do céu sem nenhuma nuvem ou cobertura total menor de um oitavo (1/8 de nuvens), vistos ou detectados do ponto de observação.
- Nublado – Céu encoberto por oito oitavos de camada de nuvem. O conceito parte da divisão da abóbada celeste em oito oitavos. O cálculo é baseado na soma de todas as nuvens daquela camada específica.

Desta forma obteve-se as leituras de concentração de CO<sub>2</sub> dentro e fora das estufas sobre os viveiros escavados e da estufa posicionada sobre o solo nas proximidades das demais. Os dados de temperatura ambiente foram utilizados para análise de correlação entre a concentração de CO<sub>2</sub> e a temperatura. O sistema de monitoramento para estimar a concentração de CO<sub>2</sub> foi instalado para testes em piscicultura localizada no município de Toledo, oeste do Paraná, conforme ilustra a Figura 7. Os viveiros utilizados estavam cultivando cerca de 80 mil alevinos de tilápia-do-Nilo. Os viveiros possuíam profundidade média de 1,6 metros.

As amostras obtidas foram utilizadas para elaborar gráficos com as curvas de concentração de gás carbônico para os dias de céu limpo, nublado e período noturno, bem como os gráficos de correlação da temperatura com o CO<sub>2</sub>. Foi utilizado o Software R Studio® (R

Core Team, 2022) e o pacote complementar GGLOT2 (Wickham, 2016) para gerar os gráficos com intervalo de confiança de 5%. Foi utilizado o teste F e a correlação de Pearson.

**Figura 7.** Mapa da localização da coleta de dados



Fonte: elaborado pelos autor, 2025.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

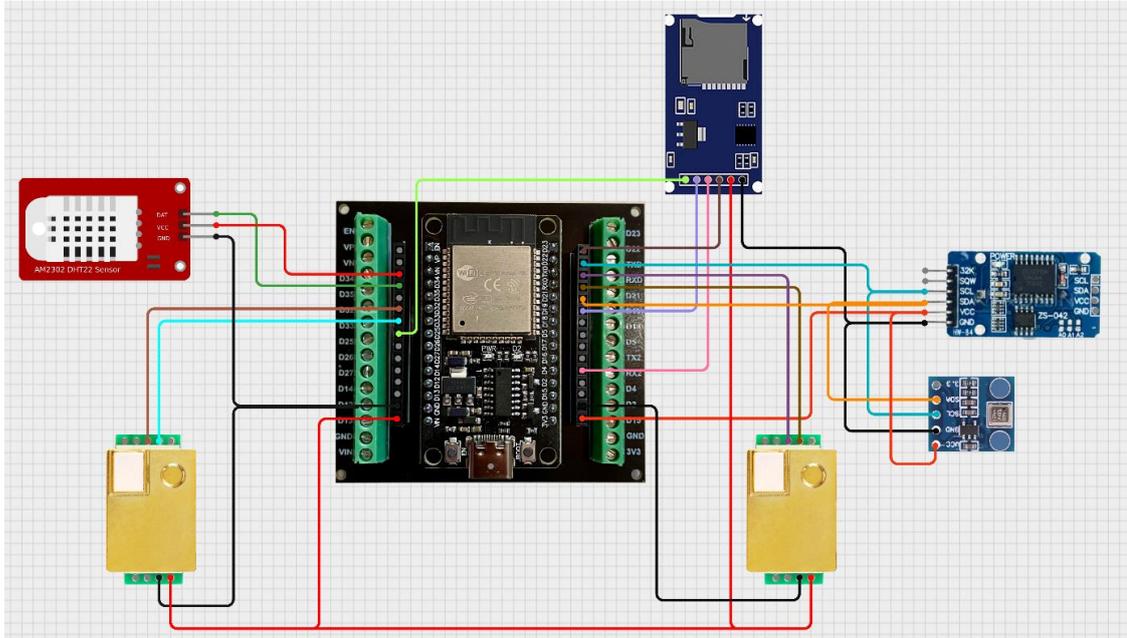
#### 3.1 Circuito Eletrônico

O circuito eletrônico com os dispositivos (hardware) conectados pode ser visto na Figura 8, com destaque para o microcontrolador ESP32 que possui flexibilidade para configurar uma série de entrada e saídas de dados, de acordo com a necessidade do projeto, podendo expandir suas conexões e ampliar o número de sensores eletrônicos no sistema. Um canal de comunicação de dados pode ser configurado via software para ser utilizado como tensão de alimentação e vice-versa.

Diagramas de blocos oferecem uma visão simplificada e visual das relações entre componentes, permitindo que leitores compreendam rapidamente a estrutura e o funcionamento do sistema (Cerchecchi *et al.*, 2018). A representação gráfica por meio de diagramas de blocos

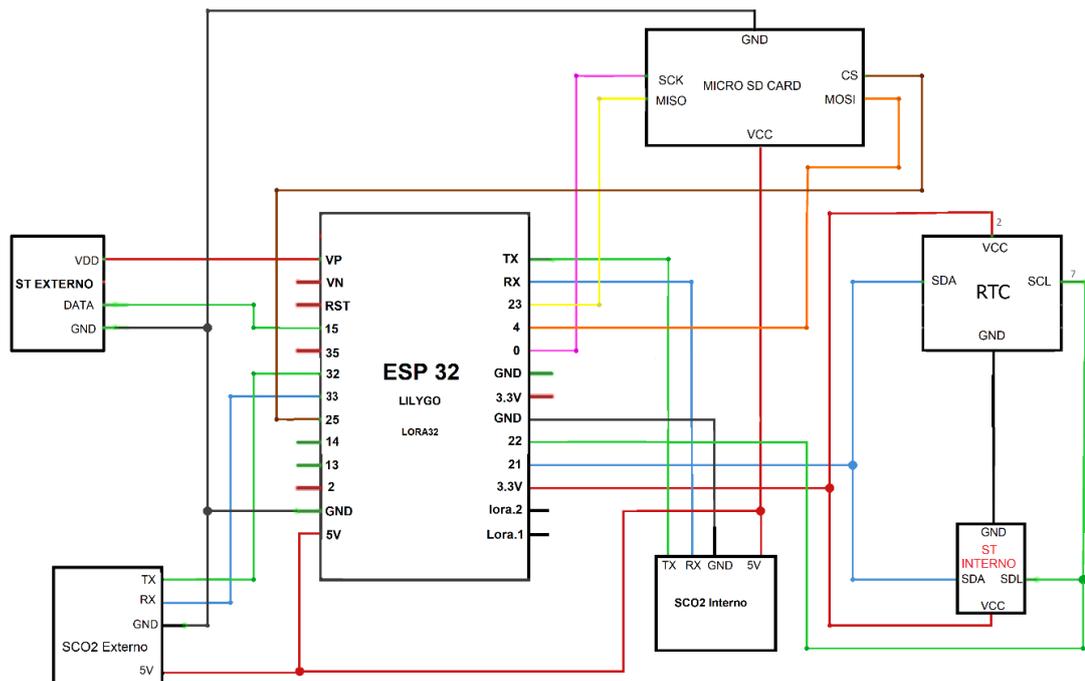
reduz a ambiguidade na interpretação dos processos e melhora a clareza na apresentação dos resultados (Genge, 2020). A Figura 9 apresenta o esquema de diagrama de blocos utilizados no projeto.

**Figura 8.** Apresentação do sistema eletrônico para monitoramento da temperatura e do Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) nas estufas.



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

**Figura 9.** Diagrama esquemático da conexão lógica do microcontrolador ESP 32 com os sensores.



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

### 3.2 Programação do Microcontrolador

A programação de microcontroladores para desempenharem uma tarefa específica garantem maior flexibilidade, baixo custo e eficiência energética no desenvolvimento de produtos, e é amplamente utilizada em sistemas de monitoramento ambiental (Mitu *et al.*, 2021). O código desenvolvido neste projeto incluiu as seguintes etapas:

- **Importação de Módulos e Configuração Inicial:** a estrutura do código foi organizada para separar as funcionalidades do software em diferentes arquivos, promovendo clareza e eficiência na gestão do sistema. Também foram utilizadas bibliotecas de terceiros, as quais incluem o controle do cartão SD, relógio em tempo real (RTC), sensores de temperatura e CO<sub>2</sub>, além de mecanismos para gerenciamento de energia e controle do modo de suspensão, conforme Tabela 2.

**Tabela 2.** Código de importação de módulos

Linha	Comando	Linha	Comando
1	#include "sdcard.h"	5	#include "sensor_co2.h"
2	#include "datetime.h"	6	#include "sensor_bmp180.h"
3	#include "sensor_dht22.h"	7	#include "power_mgr.h"
4	#include "sensor_ds18b20.h"	8	#include "sleep_control.h"

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

- **Configuração do sistema:** o microcontrolador é inicializado para estabelecer comunicação serial, configurar o controle de modo de espera *initSleepController* e sincronizar o relógio em tempo real *initRTC*, conforme apresentado na Tabela 3. Este processo inclui a verificação da sincronização com o tempo atual para determinar se a leitura dos sensores deve ser realizada no ciclo corrente, conforme o intervalo pré-definido (*minutosEntreLeituras*), com o objetivo de otimizar o consumo de energia.
- **Coleta de dados, armazenamento e loop:** No loop principal, o sistema avalia a variável “prontoParaLeitura” para determinar se deve proceder com a coleta de dados. Quando a condição é satisfeita, os sensores internos e externos são consultados para aquisição de dados de temperatura e concentração de CO<sub>2</sub>. Estes dados são então registrados em arquivo no cartão de memória (*carbono.txt*), incluindo uma marcação de data e hora para posterior análise. O código implantado pode ser visto na Tabela 4.

**Tabela 3.** Código de inicialização dos módulos.

Linha	Instrução lógica
1	void setup() {
2	Serial.begin(9600);
3	Serial.println("Inicializando o Setup...");
4	initSleepController();
5	initRTC();
6	if (getMinute() % minutosEntreLeituras == 0) {
7	prontoParaLeitura = true;
8	initCO2();
10	
11	initSDCard();
12	initDHT22();
13	initBMP180();
14	} else {
15	prontoParaLeitura = false;
16	}
17	Serial.println("Setup finalizado!");
18	}

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

- **Gestão de energia:** Com o objetivo de prolongar a vida útil do sistema em campo, o código incorpora mecanismos para otimização do consumo de energia, incluindo o uso do modo de suspensão “sleepESP32”, que reduz a corrente elétrica necessária entre os ciclos de leitura, prolongando ainda o tempo de leitura quando o sistema estiver operando com baterias, garantindo uma operação mais sustentável e econômica. A gestão do consumo de energia é importante para a medição de parâmetros ambientais na aquicultura (Jiang *et al.*, 2014).
- **Estrutura dos dados armazenados:** Os dados coletados são armazenados no cartão SD em um arquivo de texto (carbono.txt), com o formato de registros delimitados por ponto e vírgula, seguindo a estrutura indicada na Tabela 5. O código completo, incluindo as definições detalhadas dos módulos mencionados, encontra-se no Apêndice **B** deste trabalho.

**Tabela 4.** Linhas e instrução lógica do código *Loop* para as leituras e registro dos dados coletados.

Linha	Instrução lógica
1	void loop() {
2	if (prontoParaLeitura) {
3	Serial.println("-----");
4	Serial.println("Realizando leituras...");
5	String dataHora = getFormattedDateTime();
6	double temperaturaDHT = readTemperatureDHT22();
7	double temperaturaBMP = readTemperatureBMP180();
8	int co2Interno = readCO2Interno();
9	int co2Externo = readCO2Externo();
10	Serial.println("Data e Hora: " + dataHora);
11	Serial.println("Sensores internos:");
12	Serial.println("Temperatura (BMP): " + String(temperaturaBMP));
13	Serial.println("Gás Carbônico (CO2): " + String(co2Interno));
14	Serial.println("");
15	Serial.println("Sensores externos:");
16	Serial.println("Temperatura (DHT): " + String(temperaturaDHT));
17	Serial.println("Gás Carbônico (CO2): " + String(co2Externo));
18	writeSDCard("carbono.txt", dataHora + ";" + String(temperaturaBMP) + ";" + String(co2Interno) + ";" + String(temperaturaDHT) + ";" + String(co2Externo), true);
19	Serial.println("Dados gravados!");
20	} else {
21	Serial.println("Não chegou a hora da leitura ainda. Aguardando...");
22	}
23	sleepESP32();
24	}

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

**Tabela 5.** Estrutura dos dados armazenados no cartão de memória.

Data e Hora	Temperatura (BMP)	CO <sub>2</sub> Interno	Temperatura (DHT)	CO <sub>2</sub> Externo
2025-05-13 14:30	25.2	410	28.3	420

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

### 3.3 Sistema Eletrônico Embarcado na Estufa

O modelo final do sistema eletrônico, embarcado em estufas, para monitorar e estimar a concentração de CO<sub>2</sub> em ambientes aquáticos pode ser visto na Figura 10.

**Figura 10.** Sistema eletrônico embarcado em estufas durante testes preliminares.



Fonte: acervo do autor, 2024.

### 3.4 Testes Preliminares no Sistema Eletrônico

Um dos objetivos secundários deste estudo é avaliar o desempenho do sistema embarcado utilizado nas estufas para a coleta de dados ambientais. Esse processo é fundamental para aprimorar tanto o equipamento quanto as metodologias de aquisição de dados, com vistas a futuros estudos que visem o desenvolvimento de uma metodologia certificável para a estimativa da pegada de carbono na aquicultura.

O conhecimento detalhado sobre a dinâmica das concentrações de CO<sub>2</sub> em viveiros escavados representa uma etapa inicial crucial para esse objetivo, dado que tais ambientes apresentam características únicas de troca gasosa e ciclagem de carbono. Esse entendimento é necessário para fundamentar metodologias robustas e cientificamente validadas, capazes de fornecer estimativas precisas das emissões de carbono nesses sistemas. A redução da pegada de carbono na aquicultura requer melhorias nas práticas de manejo e tecnologias embarcadas para monitoramento de emissões (Zhang *et al.*, 2024). Segundo Streit (2023), a integração de

diferentes metodologias de medição é essencial para o desenvolvimento de abordagens certificáveis para a pegada de carbono na aquicultura.

### 3.4.1 Resultados para condições climáticas de céu limpo e nublado

Os resultados iniciais para a concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante os períodos de céu limpo e céu nublado podem ser observados na Figura 11. A análise estatística foi realizada por meio de uma análise de variância - ANOVA unifatorial, com o objetivo de verificar diferenças na concentração média de CO<sub>2</sub> entre os ambientes interno e externo sob diferentes condições climáticas. Os resultados revelaram que, na condição de céu nublado, houve diferença estatisticamente significativa entre os ambientes analisados ( $F(1, 44) = 12.35$ ,  $p = 0.001$ ,  $n = 46$ ), com maior concentração de CO<sub>2</sub> registrada no ambiente externo em comparação ao interno.

Por outro lado, na condição de céu limpo, não foi observada diferença estatisticamente significativa entre os ambientes ( $F(1, 46) = 1.87$ ,  $p = 0.179$ ,  $n = 48$ ), cujas médias se aproximaram, indicando uma distribuição mais homogênea dos níveis de CO<sub>2</sub> em situações de maior radiação solar. Durante o dia de céu limpo, houve uma redução significativa na emissão de CO<sub>2</sub>, com a concentração estabilizando-se em torno de 400 p.p.m. ao longo do período de maior incidência solar. Esse valor está próximo do fundo de escala dos sensores utilizados, os quais, conforme o *data sheet*, deveriam ter um limite inferior de 0 e não 400 p.p.m. Como os sensores não detectaram valores abaixo desse limite, é possível que a concentração de CO<sub>2</sub> tenha sido inferior a 400 p.p.m. no interior da estufa, enquanto a média para o dia de céu limpo fora da estufa foi de 412 p.p.m. Em contraste, fora da estufa em dias de céu limpo quanti em dias nublados, observou-se uma concentração mais alta de CO<sub>2</sub>, especialmente em dias nublados. A Tabela 6 demonstra a média de concentração de CO<sub>2</sub> para os dias de céu limpo e nublado para os sensores internos e externos as estufas.

**Tabela 6.** Média da concentração de CO<sub>2</sub> para o dia de céu limpo e nublado para os sensores posicionados dentro da estufa e os externos a estufa.

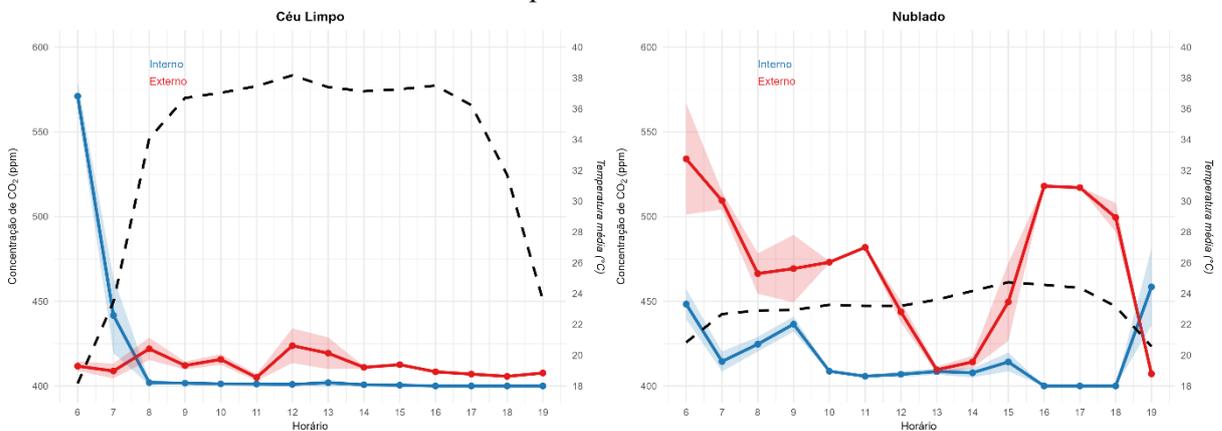
Condição Climática	Localização dos sensores	Média de CO <sub>2</sub> (p.p.m)
Céu Limpo	Interno a Estufa	401*
	Externo Estufa	412,2
Nublado	Interno a Estufa	416,7
	Externo Estufa	470,9

\* valor potencialmente inferior a 400 p.p.m caso o sensor não apresentasse fundo de escala.

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Esses resultados indicam a variabilidade nas concentrações de CO<sub>2</sub> em função das condições climáticas de céu limpo e nublado, evidenciando a importância de se realizar estudos para aprimorar os sistemas embarcados para estimar a pegada de carbono na aquicultura com maior precisão. As condições climáticas exercem uma influência significativa sobre a incidência de luz solar nos viveiros escavados, impactando diretamente o processo de fotossíntese realizado pelas microalgas presentes nesses sistemas. A intensidade e a qualidade da radiação solar variam conforme fatores como nebulosidade, sazonalidade e o ângulo de incidência, afetando diretamente o crescimento e a composição bioquímica das microalgas, influenciando sua taxa de fotossíntese e a eficiência de fixação de CO<sub>2</sub> (Chunzhuk *et al.*, 2023).

**Figura 11.** Comparação entre a concentração de CO<sub>2</sub> (p.p.m) e a temperatura média para dias de céu limpo e dia nublado.



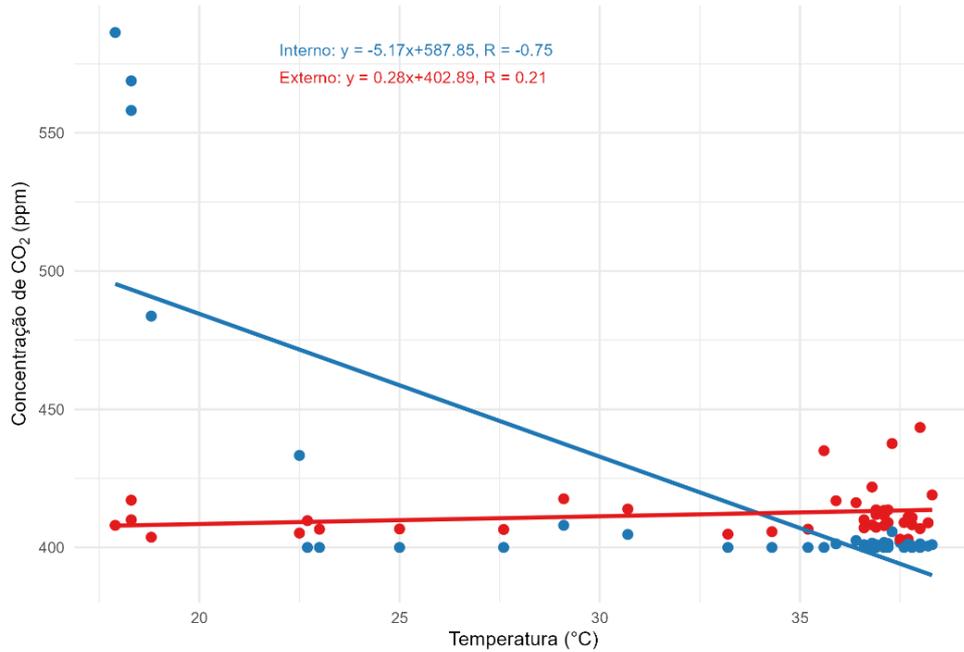
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Microalgas desempenham um papel fundamental na ciclagem de nutrientes e na regulação do oxigênio dissolvido nesses ambientes, contribuindo para o equilíbrio químico e biológico do sistema. Portanto, a compreensão da relação entre as condições climáticas e a atividade fotossintética é essencial para a gestão sustentável desses viveiros, especialmente em estudos que visam quantificar a pegada de carbono na aquicultura (Zhang *et al.*, 2024).

A temperatura média registrada pelos sensores externos durante o dia de céu limpo variou de 18°C a 38°C, atingindo seu valor máximo por volta das 12 horas e o valor mínimo nas primeiras horas da manhã, por volta das 6 horas. No dia nublado a variação da temperatura média foi de 20°C a 25°C. Observa-se uma correlação negativa entre a temperatura e a concentração de CO<sub>2</sub> no interior da estufa tanto para dia de céu limpo (Figura 12) e dia nublado (Figura 13), com  $R^2 = 0,75$  e  $0,76$  respectivamente, indicando que a concentração de CO<sub>2</sub> tende a diminuir à medida que a temperatura aumenta. Esse comportamento é esperado,

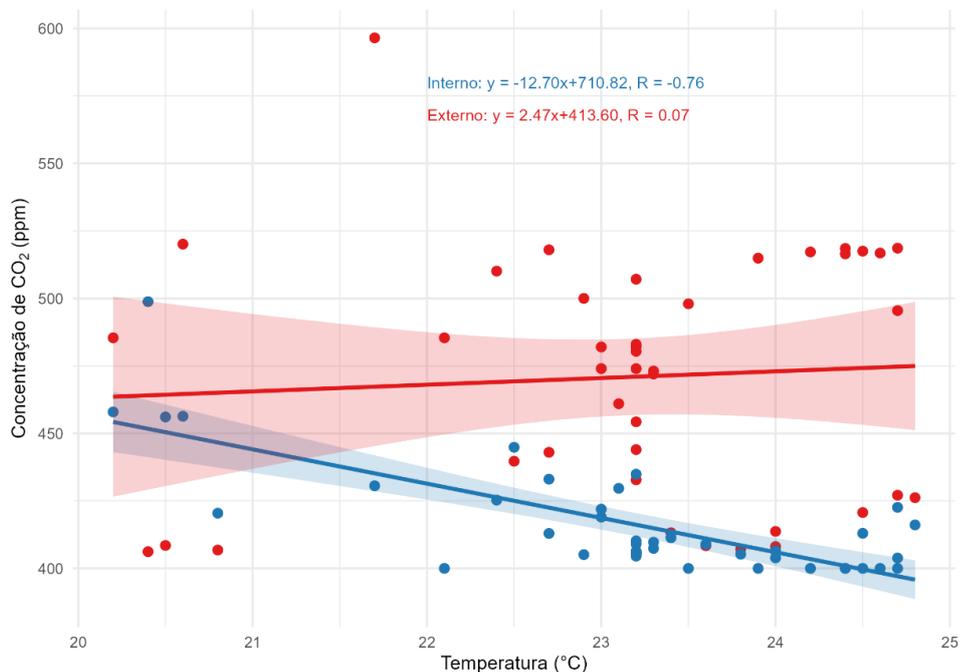
uma vez que o aumento da temperatura pode intensificar a taxa fotossintética das microalgas, reduzindo a concentração de CO<sub>2</sub> disponível na água (Chunzhuk *et al.*, 2023).

**Figura 12.** Correlação entre a temperatura e a concentração de CO<sub>2</sub> Interno a estufa (azul) e Externo da estufa (vermelho) para dia de céu limpo



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

**Figura 13.** Correlação entre a temperatura e a concentração de CO<sub>2</sub> Interno a estufa (azul) e Externo a estufa (vermelho) para dia de céu nublado.



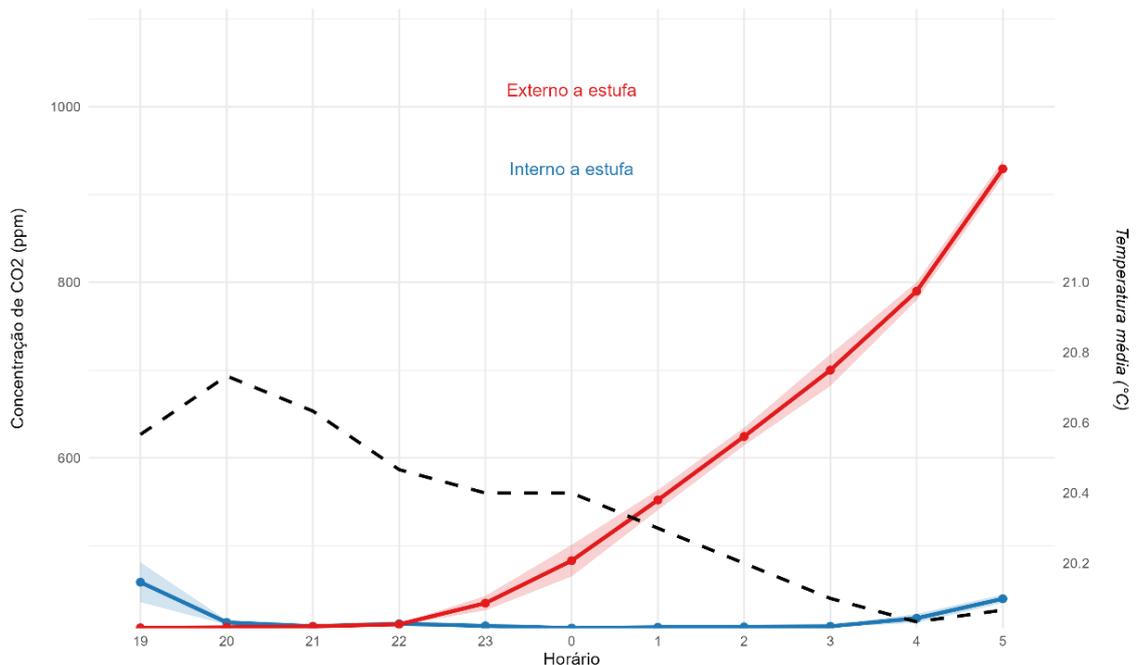
Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

A circulação atmosférica e a troca gasosa com o ar ambiente promovem a homogeneização das concentrações de gases, mascarando potenciais padrões térmicos locais. Estudos recentes corroboram essa interpretação. Por exemplo, uma investigação realizada na estação de pesquisa Bharati, na Antártida, observou que durante períodos de alta velocidade do vento ( $>20$  m/s) e elevada umidade relativa ( $>90\%$ ), as concentrações de  $\text{CO}_2$  apresentaram uma queda significativa, sugerindo que a ventilação natural e a turbulência atmosférica desempenham um papel crucial na diluição desse gás (Pathakoti *et al.*, 2018). De forma semelhante, uma análise conduzida na cidade de Horst, na Holanda, identificou que a concentração de  $\text{CO}_2$  no ar ambiente apresenta uma correlação negativa com a temperatura, velocidade do vento e radiação solar, destacando que a mistura atmosférica é determinante para a dispersão do  $\text{CO}_2$ , dificultando a identificação de uma relação direta com a temperatura (Marrero *et al.*, 2018).

### 3.4.2 Resultados para o período noturno

Os dados preliminares relativos à concentração de  $\text{CO}_2$  durante o período noturno, compreendido entre 19 horas e 5 horas, estão apresentados na Figura 14. A média de concentração de  $\text{CO}_2$  para os sensores localizados dentro da estufa foi de 417 p.p.m, enquanto para os sensores externos foi de 558,7 p.p.m.

**Figura 14.** Concentração de  $\text{CO}_2$  (p.p.m) e a temperatura média observado no período noturno.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

A comparação estatística entre as concentrações de CO<sub>2</sub> nos ambientes interno e externo à estufa durante o período noturno (das 19 horas às 5 horas) foi realizada por meio de ANOVA. Os resultados demonstraram uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos ( $F(1, 94) = 18,51, p < 0,0001$ ), com maior concentração média observada no ambiente externo. Observa-se que, a partir das 22 horas, a concentração de CO<sub>2</sub> nos sensores externos à estufa demonstra um comportamento de crescimento exponencial, indicando uma possível acumulação gradual de CO<sub>2</sub> na atmosfera ao redor da estrutura. Esse padrão é consistente com estudos que relatam picos de CO<sub>2</sub> em áreas suburbanas e rurais, geralmente associados à respiração da vegetação e à formação de camadas de inversão térmica, que limitam a dispersão dos gases (Imasu & Tanabe, 2018; Saliba & Micallef, 2024).

Em contraste, os sensores internos à estufa registraram concentrações relativamente estáveis, com uma média de 410 p.p.m. Essa estabilidade pode ser atribuída à barreira física oferecida pela estrutura da estufa, que restringe as trocas gasosas com o ambiente externo, reduzindo a influência das variações noturnas (Stanghellini et al., 2008; Imasu & Tanabe, 2018).

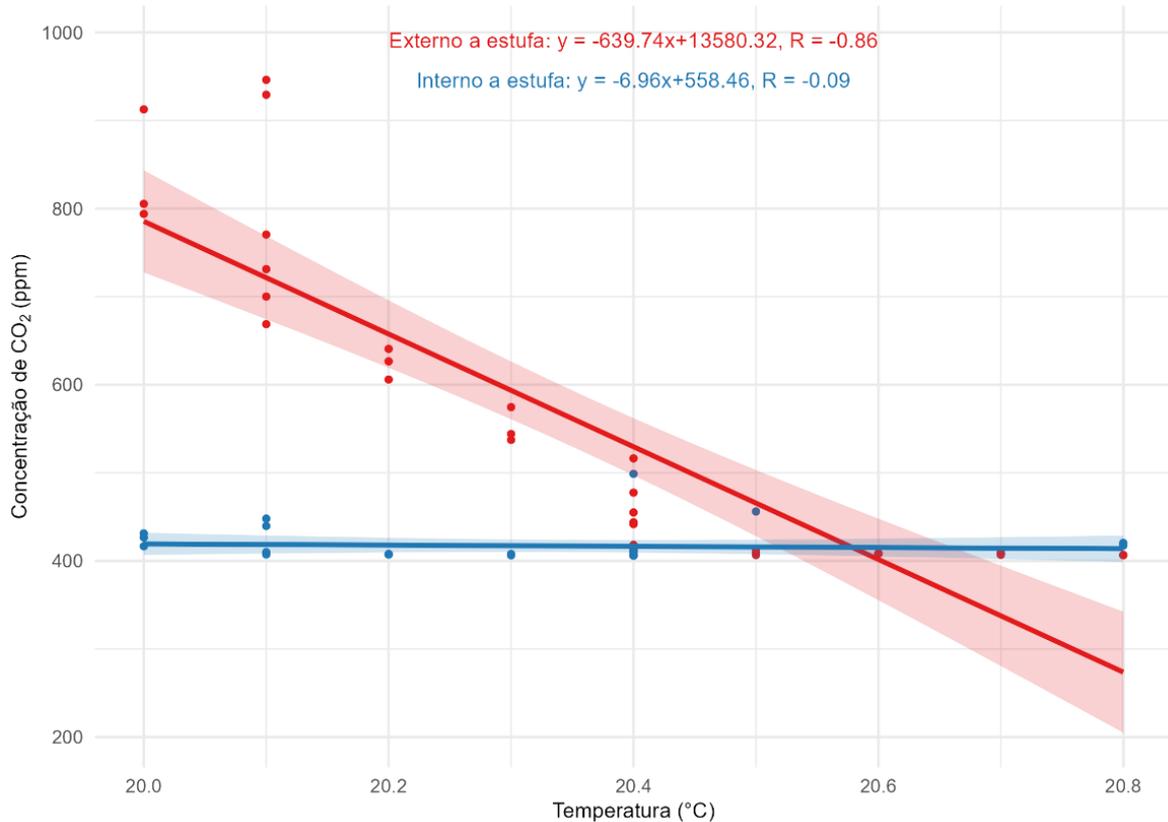
A temperatura média observada durante os dias de coleta variou de 20°C a 20,8°C, o que pode influenciar diretamente a dinâmica dos fluxos de CO<sub>2</sub>. Temperaturas mais baixas durante a noite reduzem a atividade fotossintética, diminuindo a absorção de CO<sub>2</sub> pelas plantas, enquanto a respiração continua contribuindo para o aumento das concentrações externas (Imasu & Tanabe, 2018). As medições de temperatura e concentração de CO<sub>2</sub> apresentaram comportamentos de correlação distintos em comparação ao período diurno, tanto em dias de céu claro quanto em dias nublados, conforme ilustra a Figura 15.

Especificamente, observou-se uma correlação negativa significativa nas leituras dos sensores localizados externamente à estufa, indicando que, fora da estrutura, a concentração de CO<sub>2</sub> tende a diminuir à medida que a temperatura aumenta. Esse padrão é consistente com estudos que relatam que o aumento da temperatura noturna pode intensificar a respiração do solo e da vegetação, resultando em maior emissão de CO<sub>2</sub>, enquanto a dispersão atmosférica pode reduzir as concentrações locais do gás (Anderegg et al., 2015).

Diferentemente, as medições internas à estufa não revelaram correlação estatisticamente significativa entre temperatura e concentração de CO<sub>2</sub>, sugerindo que a dinâmica interna do microclima é mais estável e menos influenciada por oscilações térmicas. Essa estabilidade pode ser atribuída ao isolamento proporcionado pela estrutura física da estufa, que restringe as trocas

gasosas com o ambiente externo, conforme observado em estudos sobre a distribuição espacial e temporal de CO<sub>2</sub> em estufas solares (Zhang *et al.*, 2023).

**Figura 15.** Correlação entre a temperatura e a concentração de CO<sub>2</sub> dentro e fora da estufa, no período noturno



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

#### 4. CONCLUSÃO

O desenvolvimento de sistemas eletrônicos para a estimativa da concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em viveiros escavados representa uma importante contribuição para o avanço da aquicultura sustentável. Os resultados preliminares deste estudo demonstraram a viabilidade técnica do uso de microcontroladores ESP32, sensores de temperatura e CO<sub>2</sub> para a coleta e análise de dados em ambientes aquícolas. O sistema proposto permitiu a aquisição de dados essenciais para a compreensão da dinâmica de concentração de CO<sub>2</sub> em viveiros escavados, considerando diferentes condições climáticas e variações temporais. A metodologia do sistema, com sensores internos e externos embarcado em estufa e controlado por ESP32 demonstrou ser eficiente para analisar a dinâmica temporal de concentração de CO<sub>2</sub> em viveiros escavados.

A partir dos testes realizados, observou-se que as condições climáticas influenciam significativamente as concentrações de CO<sub>2</sub>, com menores níveis registrados em períodos de alta incidência solar, quando a fotossíntese das microalgas é mais intensa, caracterizando um sequestro de carbono. Em contraste, as concentrações mais elevadas ocorreram durante períodos de maior nebulosidade, evidenciando a importância da luz solar na regulação dos níveis de dióxido de carbono nesses sistemas. Esse comportamento é consistente com as expectativas teóricas. Os dados coletados e as análises apresentadas estabelecem uma base sólida para aprimoramentos futuros, visando a construção de modelos para estimar a pegada de carbono na aquicultura.

## 5. TRABALHOS FUTUROS

Para etapas futuras, com objetivo de avançar para um sistema que permita estimar a pegada de carbono em sistemas de aquicultura, próximos estudos podem explorar o uso deste sistema eletrônico para quantificar a taxa de dissipação de CO<sub>2</sub> em viveiros escavados. Uma possível metodologia envolveria posicionar uma estufa sobre o viveiro escavado em diferentes horários, para registrar a concentração inicial de CO<sub>2</sub>, em seguida, ao fechar a estufa, seria medido o tempo necessário para que o sensor detecte uma queda pré-definida na concentração de CO<sub>2</sub>. Esse método pode fornecer *insights* cruciais sobre a dinâmica das emissões e a capacidade de troca gasosa nesses ambientes, representando um passo importante para a construção de modelos precisos de pegada de carbono na aquicultura.

Recomenda-se a também a incorporação de aplicativos de comunicação em tempo real, permitindo uma gestão mais eficiente. Além disso, a inclusão de parâmetros adicionais, como pH, turbidez e oxigênio dissolvido, poderá fornecer uma compreensão mais abrangente dos processos biogeoquímicos que afetam a concentração de CO<sub>2</sub> nos viveiros escavados.

## REFERÊNCIAS

- Anderegg, W. R., Ballantyne, A. P., Smith, W. K., Majkut, J., Rabin, S., Beaulieu, C., ... & Pacala, S. W. (2015). Tropical nighttime warming as a dominant driver of variability in the terrestrial carbon sink. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(51), 15591-15596.
- Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (2012). *Pond aquaculture water quality management*. Springer Science & Business Media.
- Boyd, C. E. (2019). *Water quality: an introduction*. Springer Nature.

- Bunting, S. W. (2013). *Principles of sustainable aquaculture: promoting social, economic and environmental resilience*. Routledge.
- Cerchecci, M., Luti, F., Mecocci, A., Parrino, S., Peruzzi, G., & Pozzebon, A. (2018). A low power IoT sensor node architecture for waste management within smart cities context. *Sensors*, 18(4), 1282.
- Chunzhuk, E. A., Grigorenko, A. V., Kiseleva, S. V., Chernova, N. I., Vlaskin, M. S., Ryndin, K. G., ... & Dudoladov, A. O. (2023). Effects of light intensity on the growth and biochemical composition in various microalgae grown at high CO<sub>2</sub> concentrations. *Plants*, 12(22), 3876.
- Genge, M. J. (2020). *Geological Field Sketches and Illustrations: A Practical Guide*. Oxford University Press.
- Imasu, R., & Tanabe, Y. (2018). Diurnal and Seasonal Variations of Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Concentration in Urban, Suburban, and Rural Areas around Tokyo. *Atmosphere*, 9(10), 367. <https://doi.org/10.3390/atmos9100367>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Pesquisa pecuária municipal – PPM. (2024). Sistema IBGE de recuperação automática de dados – SIDRA IBGE-PPM.
- Instituto Nacional de Meteorologia. (s.d.). *Glossário de Meteorologia*. INMET. <https://portal.inmet.gov.br/glossario/glossario>
- Jiang, J., Shi, G., Zhao, D., Shi, B., Li, Z., & Zhu, Z. (2014). Research on life cycle of wireless network for measuring environmental parameters in aquaculture. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(7), 147-154.
- Lima, A. F., da Silva, A. P., Rodrigues, A. P. O., de Sousa, D. N., Bergamin, G. T., de Lima, L. K. F., ... & Flores, R. M. V. (2024). Manual de piscicultura familiar em viveiros escavados. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1167143>.
- Macedo, H. R., Werneck, P. R., Morsoleto, F. M. da S., & Feiden, A. (2024). Use of geotechnologies to promote the sustainable expansion of fish farming: an analysis for the municipality of Chopinzinho, Brazil. *Concilium*, 24(6), 31–43. <https://doi.org/10.53660/CLM-3148-24F23>.
- Marrero, M., Carrilho, J. D., & da Silva, M. G. (2018). Effects of Meteorological Factors on CO<sub>2</sub> concentrations. [https://www.aivc.org/sites/default/files/D1\\_S1C-11.pdf](https://www.aivc.org/sites/default/files/D1_S1C-11.pdf)
- Mitu, N. S., Vassilev, V., & Tabany, M. R. (2021). Low cost, easy-to-use, IoT and cloud-based real-time environment monitoring system using ESP8266 microcontroller. *International Journal of Internet of Things and Web Services*, 6, 30-44.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. (2022). Relatório de Atividades Aquícolas: Perspectivas e Sustentabilidade. Brasília: MMA.
- Pathakoti, M., Gaddamidi, S., Gharai, B., Sudhakaran Syamala, P., Rao, P. V. N., Choudhury, S. B., ... & Dadhwal, V. K. (2018). Influence of meteorological parameters on atmospheric CO<sub>2</sub> at Bharati, the Indian Antarctic research station. *Polar Research*, 37(1), 1442072.
- R CORE TEAM. R. (2022). A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

- Saliba, M., & Micallef, A. (2024). Analysis and observations concerning concentrations of greenhouse gases measured over an 11-year period in the central Mediterranean region. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 262, 693–703. <https://doi.org/10.2495/SDP240571>
- São José, F. D., Novo, Y. D. C., Farias, A., Magalhães, L., & Fonseca, M. (2022). Mapeamento de viveiros escavados para aquicultura no Brasil por sensoriamento remoto. Embrapa Territorial, Campinas, São Paulo.
- Stanghellini, C., Incrocci, L., Gázquez, J. C., & Dimauro, B. (2007, October). Carbon dioxide concentration in Mediterranean greenhouses: how much lost production?. In *International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys2007 801* (pp. 1541-1550).
- Streit, S. A. F. (2023). *Análise das metodologias de pegada de carbono na aquicultura continental: uma revisão sistemática* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. Repositório Lume. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/276270>
- Werneck, P. R., Macedo, H. R., Morsoleto, F. M. da S., Lira, K. C. da S., & Feiden, A. (2023). Use of georeferencing as a sustainable planning tool for aquaculture production in small municipalities: a case study for Ouro Verde do Oeste/PR. *Research, Society and Development*, 12(3), e17012338683. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i3.38683>
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York, 2016. <https://ggplot2.tidyverse.org>.
- World Meteorological Organization. (2024). *WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 20: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023*. World Meteorological Organization. Available at <https://library.wmo.int/idurl/4/69057>
- Zhang, Z., Liu, H., Jin, J., Zhu, X., Han, D., & Xie, S. (2024). Towards a low-carbon footprint: Current status and prospects for aquaculture. *Water Biology and Security*, 100290. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772735124000556>
- Zhang, C., Liu, H., Wang, C., Zong, Z., Wang, H., Zhao, X., ... & Li, Y. (2023). Testing and analysis on the spatial and temporal distribution of light intensity and co2 concentration in solar greenhouse. *Sustainability*, 15(8), 7001.

## **CAPÍTULO 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A presente tese abordou o desenvolvimento e avaliação de um sistema eletrônico para estimativa da concentração de CO<sub>2</sub> em viveiros escavados destinados à aquicultura, utilizando sensores integrados a um microcontrolador ESP32 embarcado em estufas.

### **Contribuições do trabalho**

No capítulo 1 foi descrito a importância da automação e da estimativa da pegada de carbono na aquicultura, destacando como a integração de tecnologias de monitoramento pode contribuir para a sustentabilidade do setor. Esta parte do trabalho estabeleceu as bases conceituais para o desenvolvimento do sistema, abordando as vantagens do uso de microcontroladores, como o ESP32, para a coleta e análise contínua de dados ambientais.

O capítulo 2 abordou uma análise cienciométrica do estado da arte em pegada de carbono e aquicultura com base no Banco de Teses e Dissertações da CAPES. Esta revisão permitiu identificar as principais tendências de pesquisa e lacunas no conhecimento, ressaltando a importância do desenvolvimento de soluções tecnológicas para estimar a pegada de carbono na aquicultura.

Já no capítulo 3 foi detalhado o projeto do sistema eletrônico, incluindo a seleção de sensores, o desenvolvimento da programação para o microcontrolador ESP32 e detalhado as conexões e o circuito eletrônico embarcado em estufa. Os testes preliminares exploraram a coleta de dados em campo, destacando a importância das variáveis ambientais, como temperatura e radiação solar, na dinâmica de concentração de CO<sub>2</sub>. As análises das medições realizadas em diferentes horários e condições climáticas permitiram identificar padrões significativos, fornecendo uma base inicial para correlações futuras e possíveis otimizações nos sistemas de monitoramento. O uso de microcontroladores, como o ESP32 se mostrou uma alternativa viável e econômica para o monitoramento contínuo em campo.

### **Limitações do Trabalho**

Embora os resultados tenham sido satisfatórios, algumas limitações devem ser reconhecidas. A precisão dos sensores pode ser afetada por condições adversas, como variações bruscas de temperatura e alta umidade, exigindo calibrações frequentes para garantir a confiabilidade dos dados, ou aquisição de sensores mais robustos, que ampliaria os custos do sistema. Além disso, o uso de métodos diretos para a estimativa de CO<sub>2</sub> apresenta desafios em

relação à acurácia, especialmente em ambientes aquáticos com altos níveis de matéria orgânica e variações rápidas na qualidade da água.

### **Perspectivas Futuras**

Para futuros estudos, recomenda-se a incorporação de tecnologias adicionais, como a integração com plataformas IoT para o armazenamento em nuvem e análise em tempo real dos dados pode ampliar o escopo do sistema, permitindo uma resposta mais rápida a alterações nas condições do viveiro. Além disso, o uso de inteligência artificial e aprendizado de máquina, para aprimorar a precisão das estimativas e a automação do sistema. A implementação de sensores mais robustos e resistentes às condições aquáticas também é recomendada para aumentar a confiabilidade e vida útil do sistema.

A expansão do sistema para incluir outros parâmetros críticos para a qualidade da água, como Oxigênio Dissolvido, pH, salinidade e concentração de amônia, pode fornecer uma visão mais completa da saúde dos viveiros e contribuir para a redução do impacto ambiental da aquicultura.

### **Considerações Finais**

Dessa forma, este trabalho contribui para o avanço do uso de tecnologias de baixo custo e alinhadas com os desafios atuais da mudança climática. Ao oferecer uma plataforma flexível e escalável para o monitoramento da dinâmica da concentração de CO<sub>2</sub> em sistemas aquícolas.

Por fim, espera-se que este estudo sirva como base para futuras pesquisas na área, incentivando o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais eficientes e acessíveis para a mensurar a pegada de carbono na aquicultura, alinhadas com os princípios da economia circular e a preservação dos ecossistemas aquáticos.

### **Reflexões**

Refletindo sobre o desenvolvimento deste trabalho, ficou evidente a importância de se adaptar às condições desafiadoras do campo e à necessidade de inovação constante para superar limitações tecnológicas. Esse processo proporcionou não apenas um aprimoramento técnico, mas também um crescimento pessoal, fortalecendo habilidades críticas como resolução de problemas, planejamento experimental e análise de dados. Essa jornada contribuiu para uma

compreensão mais profunda dos desafios enfrentados pela aquicultura moderna e reforçou a importância de integrar tecnologia e sustentabilidade em soluções práticas e acessíveis.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Artigos Publicados no Doutorado

**Tema:** Geotecnologias aplicadas a piscicultura

**Quantidade:** 20

- |     |  |   |            |           |
|-----|--|---|------------|-----------|
| 1.  | Aplicação de geotecnologias em unidades produtivas de viveiros escavados em diferentes altitudes nas sub-bacias dos rios São Francisco e São Francisco Falso, Brasil | Link: <a href="https://doi.org/10.54033/cadpedv21n13-437">https://doi.org/10.54033/cadpedv21n13-437</a>                   | Qualis: A2 | Ano: 2024 |
| 2.  | Caracterização das sub-bacias hidrográficas dos rios São Francisco e São Francisco Falso, oeste do Paraná, Brasil  | Link: <a href="https://doi.org/10.54033/cadpedv21n13-084">https://doi.org/10.54033/cadpedv21n13-084</a>                   | Qualis: A2 | Ano: 2024 |
| 3.  | Analysis of fish farming, nutrient input and production of the Ocoy river watershed  | Link: <a href="https://doi.org/10.56238/arev6n4-215">https://doi.org/10.56238/arev6n4-215</a>                             | Qualis: A2 | Ano: 2024 |
| 4.  | Mapeamento dos viveiros escavados, análise da produção piscícola e do aporte de nutrientes da piscicultura no município de Diamante d'Oeste, Brasil                  | Link: <a href="https://doi.org/10.55905/oelv22n12-107">https://doi.org/10.55905/oelv22n12-107</a>                         | Qualis: A4 | Ano: 2024 |
| 5.  | Characterization and evaluation of the Verde River watershed: a case study on how geoprocessing and aquaculture are important tools in tackling food insecurity      | Link: <a href="https://doi.org/10.54033/cadpedv21n13-083">https://doi.org/10.54033/cadpedv21n13-083</a>                   | Qualis: A2 | Ano: 2024 |
| 6.  | Análise dos Aspectos Físicos e Morfológicos de uma Bacia Hidrográfica com Áreas Críticas para o Uso de Recursos Hídricos, Brasil                                     | Link: <a href="https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n12-049">https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n12-049</a>                     | Qualis: A3 | Ano: 2024 |
| 7.  | Estimativa de aporte de Nitrogênio e Fósforo da piscicultura na sub-bacia hidrográfica do Arroio Guaçu   | Link: <a href="https://doi.org/10.54033/cadpedv21n10-15">https://doi.org/10.54033/cadpedv21n10-15</a>                     | Qualis: A2 | Ano: 2024 |
| 8.  | Santa Quitéria River micro-watershed: an analysis of nutrient inputs from excavated ponds used for fish farming  | Link: <a href="https://doi.org/10.53660/clm-4097-24s20">https://doi.org/10.53660/clm-4097-24s20</a>                       | Qualis: A2 | Ano: 2024 |
| 9.  | Sustainable planning geotechnologies for fish farming expansion in small municipalities: a case study of Pato Bragado/PR-Brazil                                      | Link: <a href="https://doi.org/10.3856/vol52-issue4-fulltext-3163">https://doi.org/10.3856/vol52-issue4-fulltext-3163</a> | Qualis: B2 | Ano: 2024 |
| 10. | Estimation of Nutrient Discharge from Fish Farming in the São Camilo River Micro-Watershed, Brazil   | Link: <a href="https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n8-183">https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n8-183</a>                       | Qualis: A3 | Ano: 2024 |

- 11. Análise morfométrica, uso e ocupação do solo da microbacia hidrográfica do Rio Tatuí, Brasil**  
Link: <https://doi.org/10.55905/oelv22n6-061> Qualis: A4 Ano: 2024
- 12. Investigação geotecnológica para otimizar a piscicultura em uma microbacia hidrográfica neotropical**  
Link: <https://doi.org/10.55905/oelv22n4-125> Qualis: A4 Ano: 2024
- 13. Caracterização geomorfológica, localização e quantificação dos viveiros escavados para piscicultura na microbacia hidrográfica do Rio Toledo, oeste do Paraná**  
Link: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n4-005> Qualis: A4 Ano: 2024
- 14. Use of geotechnologies to promote the sustainable expansion of fish farming: an analysis for the municipality of Chopinzinho, Brazil**  
Link: <https://doi.org/10.53660/clm-3148-24f23> Qualis: A2 Ano: 2024
- 15. Estimativa de aporte de Nitrogênio e Fósforo na microbacia hidrográfica do rio Açu utilizando ferramentas de geoprocessamento**  
Link: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n3-061> Qualis: A2 Ano: 2024
- 16. Caracterização da morfometria da microbacia hidrográfica do rio Cavernoso: subsídios para o planejamento sustentável da piscicultura**  
Link: <https://doi.org/10.54033/cadpedv20n3-001> Qualis: A2 Ano: 2023
- 17. Caracterização morfológica, uso e cobertura do solo da microbacia hidrográfica do Córrego Chororó, no estado do Paraná, Brasil**  
Link: <https://doi.org/10.55905/cuadv15n10-016> Qualis: A4 Ano: 2023
- 18. Características ambientais da microbacia hidrográfica do rio São Luiz para subsidiar o planejamento sustentável da piscicultura**  
Link: <https://doi.org/10.55905/cuadv15n10-009> Qualis: A4 Ano: 2023
- 19. Caracterização da microbacia do Rio Branco e análise das unidades de produção piscícolas, através do uso de Geotecnologias**  
Link: <https://doi.org/10.55905/oelv21n5-021> Qualis: A4 Ano: 2023
- 20. Utilização do georreferenciamento como ferramenta de planejamento sustentável da produção aquícola em pequenos municípios: um estudo de caso para Ouro Verde do Oeste/PR**  
Link: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i3.38683> Qualis: C Ano: 2023

**Tema:** Agregação de valor ao pescado

**Quantidade:** 13

- |   |   |            |           |
|---|---|------------|-----------|
| 1. Análise sensorial de iogurte com diferentes dosagens de hidrolisados proteicos de carne mecanicamente separada de tilápia                            | Link: <a href="https://doi.org/10.55905/cuadv16n13-096">https://doi.org/10.55905/cuadv16n13-096</a>     | Qualis: A4 | Ano: 2024 |
| 2. Conserva de Rollmops: uma formulação inovadora utilizando tilápia em tamanho não comercial   | Link: <a href="https://doi.org/10.54033/cadpedv21n9-096">https://doi.org/10.54033/cadpedv21n9-096</a>   | Qualis: A2 | Ano: 2024 |
| 3. Análise sensorial de aceitabilidade de produtos à base de peixe-espada ( <i>trichiurus lepturus linnaeus</i> )                                       | Link: <a href="https://doi.org/10.55905/oelv22n6-170">https://doi.org/10.55905/oelv22n6-170</a>         | Qualis: A4 | Ano: 2024 |
| 4. Composição centesimal e análise sensorial de enlatados de pescado cultivados em água doce  | Link: <a href="https://doi.org/10.55905/cuadv16n5-011">https://doi.org/10.55905/cuadv16n5-011</a>       | Qualis: A4 | Ano: 2024 |
| 5. Sorvete enriquecido com doses de carne hidrolisada mecanicamente separadas de tilápia: análises físico-químicas, microbiológicas e sensoriais        | Link: <a href="https://doi.org/10.54033/cadpedv21n4-109">https://doi.org/10.54033/cadpedv21n4-109</a>   | Qualis: A2 | Ano: 2024 |
| 6. Physico-chemical, microbiological, nutritional composition and sensory analysis of products enriched with mechanically separated meat of marine fish | Link: <a href="https://doi.org/10.53660/clm-3026-24e14">https://doi.org/10.53660/clm-3026-24e14</a>     | Qualis: A2 | Ano: 2024 |
| 7. Análise sensorial de tilápia pequena enlatada com tamanhos não comerciais  | Link: <a href="https://doi.org/10.33448/rsd-v12i3.40543">https://doi.org/10.33448/rsd-v12i3.40543</a>   | Qualis: C  | Ano: 2023 |
| 8. Avaliação microbiológica, físico-química e sensorial de tilápia enlatada em diferentes tipos de molhos   | Link: <a href="https://doi.org/10.33448/rsd-v11i11.33733">https://doi.org/10.33448/rsd-v11i11.33733</a> | Qualis: C  | Ano: 2022 |
| 9. Análise sensorial de pescado anchovado comercial e anchovagem de tilápias fora do padrão comercial   | Link: <a href="https://doi.org/10.33448/rsd-v11i11.33788">https://doi.org/10.33448/rsd-v11i11.33788</a> | Qualis: C  | Ano: 2022 |
| 10. Tilápias pequenas com tamanhos não comerciais para processamento em conserva: desempenho corporal, análise centesimal e microbiológica              | Link: <a href="https://doi.org/10.33448/rsd-v11i10.32237">https://doi.org/10.33448/rsd-v11i10.32237</a> | Qualis: C  | Ano: 2022 |
| 11. Rendimento de carcaça, composição química e resistência do couro de tilápias criadas em tanques-rede e tanques-rede                                 | Link: <a href="https://doi.org/10.33448/rsd-v11i7.29778">https://doi.org/10.33448/rsd-v11i7.29778</a>   | Qualis: C  | Ano: 2022 |
| 12. Agregando valor ao pescado: Análise sensorial de conservas de pescado em salmoura e em patê   | Link: <a href="https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.31057">https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.31057</a>   | Qualis: C  | Ano: 2022 |

**13.** Aplicação de processos tecnológicos para obtenção de patês de diferentes tamanhos não comerciais, a partir da tilápia do Nilo

Link: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.31715>

Qualis: C

Ano: 2022

**Tema:** Pegada de carbono na aquicultura

Quantidade: 03

**1.** Pegada de carbono e automação na aquicultura

Link: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n11-115>

Qualis: A3

Ano: 2024

**2.** Footprint: Scientometric Analysis of Publications from The Capes Thesis and Dissertations Database, Brazil

Link: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n9-143>

Qualis: A3

Ano: 2024

**3.** Bibliometric study on carbon footprint in aquaculture

Link: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.27717>

Qualis: C

Ano: 2022

**Tema:** Cadeia produtiva do pescado

Quantidade: 02

**1.** Produção e desempenho industrial de pequenos frigoríficos de peixes do oeste do Paraná

Link: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i11.33673>

Qualis: C

Ano: 2022

**2.** Consumo e utilização de água entrepostos de pescados de água doce

Link: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29360>

Qualis: C

Ano: 2022

**Tema:** Pescado com certificação orgânica

Quantidade: 02

**1.** Desafios da inclusão do pescado com certificação orgânica na alimentação escolar: Estudo de caso para rede estadual de ensino do oeste do Paraná

Link: <https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/9251>

Qualis: B1

Ano: 2024

**2.** Análise do perfil socioeconômico do potencial consumidor de peixe com certificação orgânica no Brasil

Link: <https://doi.org/10.55905/oelv21n8-116>

Qualis: A4

Ano: 2023

**Tema:** Comunidades aquáticas

Quantidade: 01

**1.** Duração dos estágios do desenvolvimento pós-embrionário de *Porcellana sayana leach*, 1820 (*Anomura: Porcellanidae*) em laboratório

Link: <https://doi.org/10.55905/cuadv15n10-090>

Qualis: A4

Ano: 2023

## APÊNDICE B – Programação do Microcontrolador

### ❖ Projeto Carbono

```

#include "sdcard.h"
#include "datetime.h"
#include "sensor_dht22.h"
#include "sensor_ds18b20.h"
#include "sensor_co2.h"
#include "sensor_bmp180.h"
#include "power_mgr.h"
#include "sleep_control.h"
int minutosEntreLeituras = 1;
bool prontoParaLeitura = false;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Inicializando o Setup...");
  initSleepController();
  initRTC();
  if (getMinute() % minutosEntreLeituras == 0) {
    prontoParaLeitura = true;
    initCO2();
    initSDCard();
    initDHT22();
    initBMP180();
  } else {
    prontoParaLeitura = false;
  }
  Serial.println("Setup finalizado!");
  //ajustarDataHora();
}

void loop() {
  if (prontoParaLeitura) {
    Serial.println("-----");
    Serial.println("Realizando leituras...");
    String dataHora = getFormattedDateTime();
    double temperaturaDHT = readTemperatureDHT22();
    double temperaturaBMP = readTemperatureBMP180();
    int co2Interno = readCO2Interno();
    int co2Externo = readCO2Externo();
    Serial.println("Data e Hora: " + getFormattedDateTime());
  }
}

```

```

Serial.println("Sensores internos: ");
Serial.println("Temperatura (BMP): " + String(temperaturaBMP));
Serial.println("Gás Carbônico (CO2): " + String(co2Interno));
Serial.println(" ");
Serial.println("Sensores externos: ");
Serial.println("Temperatura (DHT): " + String(temperaturaDHT));
Serial.println("Gás Carbônico (CO2): " + String(co2Externo));
writeSDCard("carbono.txt", dataHora + ";" + String(temperaturaBMP) + ";"
  + String(co2Interno) + ";" + String(temperaturaDHT) + ";"
  + String(co2Externo), true);
Serial.println("Dados gravados!");
} else {
  Serial.println("Não chegou a hora da leitura ainda. Aguardando...");
}
sleepESP32();
}

```

#### ❖ sensor\_CO2.h

```

#include <SoftwareSerial.h>
#include "MHZ19.h"
MHZ19 myMHZ19Interno;
SoftwareSerial mySerialInterno(33, 32); // RX, TX
MHZ19 myMHZ19Externo;
SoftwareSerial mySerialExterno(14, 13); // RX, TX

void initCO2(){
  mySerialInterno.begin(9600);
  myMHZ19Interno.begin(mySerialInterno);
  myMHZ19Interno.autoCalibration();
  mySerialExterno.begin(9600);
  myMHZ19Externo.begin(mySerialExterno);
  myMHZ19Externo.autoCalibration();
}

int readCO2Interno(){
  int CO2Interno = myMHZ19Interno.getCO2(false);
  return CO2Interno;
}

int readCO2Externo(){
  int CO2Externo = myMHZ19Externo.getCO2(false);
  return CO2Externo;
}

```

## ❖ sensor\_dht22.h

```

#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>
#define DHTPIN 15 //VP
//#define DHT_VPIN 0
//#define DHT_GPIN 4
#define DHTTYPE DHT22
DHT_Unified dht(DHTPIN, DHTTYPE);
sensors_event_t event;

void initDHT22() {
    delay(100);
    dht.begin();
    sensor_t sensor;
    dht.temperature().getSensor(&sensor);
}

float readTemperatureDHT22() {
    dht.temperature().getEvent(&event);
    if (!isnan(event.temperature)) {
        return event.temperature;
    }
    return 0;
}

float readHumidityDHT22() {
    dht.humidity().getEvent(&event);
    if (!isnan(event.relative_humidity)) {
        return event.relative_humidity;
    }
    return 0;
}

```

## ❖ sensor\_bmp180.h

```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_BMP085.h>
Adafruit_BMP085 bmp180;

void initBMP180() {
    if (!bmp180.begin()) {
        Serial.println("Sensor BMP180 nao encontrado !!");
    }
}

```

```

        while (1) {}
    }
}

float readTemperatureBMP180() {
    return bmp180.readTemperature();
}

```

#### ❖ sdcard.h

```

#include "FS.h"
#include "SPI.h"
#include "SD.h"
#define FF_FS_EXFAT 1
#define SCK_CUSTOM_PIN 0
#define MOSI_CUSTOM_PIN 4
#define CS_CUSTOM_PIN 25
#define MISO_CUSTOM_PIN 23
SPIClass custom_spi = SPIClass(VSPI);

void printDirectory(File dir, int numTabs) {
    while (true) {
        File entry = dir.openNextFile();
        if (!entry) {
            // no more files
            break;
        }
        for (uint8_t i = 0; i < numTabs; i++) {
            Serial.print("\t");
        }
        Serial.print(entry.name());
        if (entry.isDirectory()) {
            Serial.println("/");
            printDirectory(entry, numTabs + 1);
        } else {
            // files have sizes, directories do not
            Serial.print("\t\t");
            Serial.println(entry.size(), DEC);
        }
        entry.close();
    }
}

void initSDCard() {

```

```

pinMode(CS_CUSTOM_PIN, OUTPUT);
digitalWrite(CS_CUSTOM_PIN, HIGH);
pinMode(MOSI, INPUT_PULLUP);
custom_spi.begin(SCK_CUSTOM_PIN, MISO_CUSTOM_PIN,
    MOSI_CUSTOM_PIN, CS_CUSTOM_PIN);
custom_spi.setDataMode(SPI_MODE0);
if (!SD.begin(CS_CUSTOM_PIN, custom_spi, 4000000, "/sd", 5)) {
    Serial.println("Falha ao montar o SD Card!");
} else {
    Serial.println("SDCard montado!");
}
}

boolean writeSDCard(String fileName, String text, boolean clearContent) {
    if (clearContent) {
        SD.remove(fileName);
    }
    if (text.length() == 0) {
        return true;
    }
    if (!SD.exists("/") + fileName)) {
        Serial.println("File " + fileName + " not found! Creating...");
    }
    File file = SD.open("/") + fileName, FILE_APPEND, true);
    if (file) {
        file.println(text);
        file.close();
        return true;
    }
    return false;
}

String readSDCard(String fileName) {
    Serial.println(SD.cardSize());
    String retorno = "";
    File file = SD.open("/") + fileName, FILE_READ, true);
    if (file) {
        while (file.available()) {
            retorno += file.readStringUntil('\n') + '\n';
        }
        file.close();
    } else {
        Serial.println("File " + fileName + " not found!");
    }
}

```

```

}
return retorno;
}

```

❖ datetime.h

```

#include "RTCLib.h"
RTC_DS3231 rtc;
#define RTC_VPIN 13
#define RTC_GPIN 14
//SDA = 21
//SCL = 22

void initRTC() {
  pinMode(RTC_VPIN, OUTPUT);
  digitalWrite(RTC_VPIN, HIGH);
  pinMode(RTC_GPIN, OUTPUT);
  digitalWrite(RTC_GPIN, LOW);
  if (!rtc.begin()) {
    Serial.println("Couldn't find RTC");
    Serial.flush();
    while (1) delay(10);
  }
  if (rtc.lostPower()) {
    Serial.println("RTC lost power, let's set the time!");
    // When time needs to be set on a new device, or after a power loss, the
    // following line sets the RTC to the date & time this sketch was compiled
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
    // This line sets the RTC with an explicit date & time, for example to set
    // January 21, 2014 at 3am you would call:
    // rtc.adjust(DateTime(2024, 11, 14, 21, 03, 0));
  }
}

String twoDigitNumber(int number) {
  if (number < 10) {
    return "0" + String(number);
  }
  return String(number);
}

String getFormattedDateTime() {
  DateTime now = rtc.now();

```

```
return twoDigitNumber(now.day()) + "/" + twoDigitNumber(now.month()) + "/" +  
    String(now.year()) + " " + twoDigitNumber(now.hour()) + ":" +  
    twoDigitNumber(now.minute()) + ":" + twoDigitNumber(now.second());  
}  
  
int getMinute(){  
    DateTime now = rtc.now();  
    return now.minute();  
}  
  
float getRTCTemperature(){  
    return rtc.getTemperature();  
}
```