



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPE LYRA MORORÓ

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ESTUFA INTELIGENTE PARA A  
AGRICULTURA COM TECNOLOGIA IoT**

Recife

2023

FELIPE LYRA MORORÓ

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ESTUFA INTELIGENTE PARA A  
AGRICULTURA COM TECNOLOGIA IoT**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Orientador:** Prof. Dr. José Rodrigues de Oliveira Neto.

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Mororó, Felipe Lyra.

Desenvolvimento de um protótipo de estufa inteligente para a agricultura com tecnologia IoT / Felipe Lyra Mororó. - Recife, 2023.

84 p. : il., tab.

Orientador(a): José Rodrigues de Oliveira Neto

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. Sistemas Embarcados. 2. Internet das Coisas. 3. Estufa inteligente. 4. Sistema autônomo. 5. Agricultura digital. I. Oliveira Neto, José Rodrigues de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

FELIPE LYRA MORORÓ

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ESTUFA INTELIGENTE PARA A  
AGRICULTURA COM TECNOLOGIA IoT**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 24 / 11 / 2023 .

---

Prof. Dr. José Rodrigues de Oliveira Neto. (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Pedro Manuel Gonzalez del Foyo (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Vítor de Andrade Coutinho (Examinador Externo)  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

É com muita gratidão e satisfação que venho expressar meu profundo agradecimento pelo apoio e orientação do Professor Doutor José Rodrigues de Oliveira Neto que com sua vasta experiência e conhecimento foi fundamental na condução do projeto de pesquisa, sempre disponível para esclarecer dúvidas e sugerir melhorias. Quero também agradecer aos meus familiares pelo amor e apoio incondicional durante todo o período de estudos. E aos meus amigos por me apoiarem durante a graduação e me incentivarem a desenvolver este projeto. Por fim, agradeço à Universidade Federal de Pernambuco, pela oportunidade de estudar nesta instituição e pelo ambiente propício para o desenvolvimento acadêmico.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de estufa inteligente, desde da fabricação da estrutura ao desenvolvimento do software de controle. Esse sistema combina os princípios da Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of things*) com tecnologia embarcada para otimizar e controlar as condições climáticas no cultivo de plantas fora de temporada. Assim, a estufa é controlada pelo microcontrolador ESP32 que monitora as variáveis do ambiente e do solo através dos sensores e gerencia o sistema de irrigação, ventilação e iluminação de forma automática ou manual. Esses sistemas podem operar no modo automático, sendo acionados com base nas leituras dos sensores ou pelo horário do dia, garantindo assim que as condições ideais para o cultivo sejam mantidas. Todas as informações da estufa inteligente são armazenadas em um banco de dados SQL, e simultaneamente, transmitidos para a plataforma TagoIO, na qual os dados podem ser visualizados e controlados remotamente na forma de *dashboard*. O sistema foi submetido a testes para validação do funcionamento, que incluíram operações manuais e automáticas em todos os atuadores da estufa (irrigação, ventilação e iluminação). Durante esses testes, o sistema funcionou conforme o esperado, demonstrando sua capacidade de monitoramento e controle. Além disso, o sistema foi mantido continuamente funcionando por três dias para avaliar sua estabilidade e controle do ambiente da estufa.

**Palavras-chave:** Sistemas Embarcados; Internet das Coisas; Estufa inteligente; Sistema autônomo, Agricultura digital.

## ABSTRACT

This project presents the development of a smart greenhouse prototype, showing the entire process from structural fabrication to the development of the software control. The system combines Internet of Things (IoT) principles with embedded technology to optimize and regulate climatic conditions for out-of-season plant cultivation. The greenhouse is controlled by the ESP32 microcontroller, monitors environmental and soil variables through sensors and manages the irrigation, ventilation and lighting systems automatically or manually. These systems can operate automatically, triggered by sensor data or time of day, ensuring ideal growth conditions. All data from the smart greenhouse is stored in a SQL database and simultaneously transferred to the TagoIO platform, where it can be viewed and controlled remotely on the dashboard. The system was tested to verify its functionality, which included manual and automatic operation of all greenhouse actuators (irrigation, ventilation and lighting). During these tests, the system performed as expected and has demonstrated its monitoring and control capabilities. Additionally, the system operated continuously for three days to evaluate its stability and environmental control capabilities.

**Keywords:** Embedded systems; Internet of things; Smart greenhouse; Autonomous system; Digital agriculture.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Arquitetura de uma aplicação IoT em estufas inteligentes . . . . .	15
Figura 2 – Fluxograma dos procedimento deste trabalho . . . . .	18
Figura 3 – Agricultura digital em todas as etapas da cadeia produtiva . . . . .	21
Figura 4 – Fazenda inteligente na etapa de produção . . . . .	22
Figura 5 – Equipamentos, plataformas e aplicações da agricultura digital na etapa de produção . . . . .	23
Figura 6 – Cenário geral de um sistema IoT na agricultura . . . . .	26
Figura 7 – Estrutura da estufa projetada no Fuison360 . . . . .	29
Figura 8 – Ferramentas e materiais utilizados na construção da estrutura de sustentação	30
Figura 9 – Estrutura de alumínio montada na base de madeira . . . . .	31
Figura 10 – Ferramentas e materiais utilizados na construção da estrutura de proteção . .	32
Figura 11 – Estrutura de proteção montada . . . . .	33
Figura 12 – Partes do sistema de irrigação . . . . .	34
Figura 13 – Estrutura de irrigação montada . . . . .	35
Figura 14 – Materiais utilizados na estrutura de abertura . . . . .	36
Figura 15 – Sistema de abertura da estufa . . . . .	36
Figura 16 – Imagens do sensor de umidade e temperatura do ar . . . . .	38
Figura 17 – Imagens do sensor de umidade do solo . . . . .	40
Figura 18 – Imagens do sensor de temperatura do solo . . . . .	42
Figura 19 – Imagens do sensor de luminosidade . . . . .	43
Figura 20 – Imagens dos dois testes da influência da proteção no sensor de iluminância .	44
Figura 21 – Imagens do sensor ultrassônico . . . . .	46
Figura 22 – Representação dos parâmetros para o calculo do nível do reservatório . . . . .	47
Figura 23 – Imagens da fita LED endereçável . . . . .	47
Figura 24 – Imagens do modulo relé . . . . .	48
Figura 25 – Bomba de aquário no reservatório . . . . .	49
Figura 26 – Imagens da ponte H . . . . .	50
Figura 27 – Imagens das ventoinhas . . . . .	50
Figura 28 – Microcontrolador: ESP32 . . . . .	51
Figura 29 – Fonte de alimentação . . . . .	52
Figura 30 – Modulo Regulador de tensão . . . . .	52
Figura 31 – Imagens do circuito eletrônico da estufa . . . . .	53
Figura 32 – Circuito eletrônico montado na estufa . . . . .	54
Figura 33 – Lógica da comunicação entre os pontos do sistema . . . . .	56
Figura 34 – Fluxograma da lógica do sistema no microcontrolador . . . . .	57
Figura 35 – Fluxograma detalhado da função que controla o sistema de irrigação . . . . .	58

Figura 36 – Fluxograma detalhado da função que controla o sistema de ventilação . . . .	60
Figura 37 – Fluxograma detalhado da função que controla o sistema de iluminação artificial	61
Figura 38 – Visualização da parte do monitoramento das variáveis no <i>dashboard</i> . . . .	62
Figura 39 – Visualização da parte do controle dos atuadores no <i>dashboard</i> . . . . .	63
Figura 40 – Página do gerenciador do <i>phpMyAdim</i> . . . . .	65
Figura 41 – Imagens do protótipo da estufa inteligente durante a fase de testes . . . . .	66
Figura 42 – Dados da temperatura e umidade do solo . . . . .	67
Figura 43 – Dados da temperatura e umidade do ar . . . . .	67
Figura 44 – Dados da iluminância interna e externa . . . . .	68
Figura 45 – Vista explodida e numeração de cada perfil de alumínio da estrutura . . . . .	76
Figura 46 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 4 e 26 . . . . .	77
Figura 47 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 10 e 22 . . . . .	77
Figura 48 – Medidas do perfil de alumínio referente ao item de número 17 . . . . .	78
Figura 49 – Medidas do perfil de alumínio referente ao item de número 27 . . . . .	78
Figura 50 – Medidas do perfil de alumínio referente ao item de número 28 . . . . .	79
Figura 51 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 8, 11 e 16 . . .	79
Figura 52 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 9 e 21 . . . . .	80
Figura 53 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 7 e 23 . . . . .	80
Figura 54 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 14 e 18 . . . . .	81
Figura 55 – Medidas do perfil de alumínio referente ao item de número 20 . . . . .	81
Figura 56 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 15 e 19 . . . . .	82
Figura 57 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 12 e 13 . . . . .	82
Figura 58 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 1 e 3 . . . . .	83
Figura 59 – Medidas do perfil de alumínio referente ao item de número 2 . . . . .	83
Figura 60 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 6 e 24 . . . . .	84
Figura 61 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 5 e 25 . . . . .	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Todas as variáveis e estados do sistema da estufa criadas no banco MySQL .	64
Tabela 2 – Dados de mínimo, máximo e média para os parâmetros medidos na estufa .	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GPS	<i>Global Positioning System</i>
ICT	<i>Information Communication Technology</i>
AI	<i>Artificial Intelligence</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>
AP	Agricultura de Precisão
TI	Tecnologia da Informação
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RTOS	<i>Real Time Operating System</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
AO	<i>Analog Output</i>
NRZ	<i>Non-Return-to-Zero</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
UART	<i>universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
ADC	<i>Analogue-to-digital Converter</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
DC	<i>Direct Current</i>
GND	Malha de terra
VCC	Tensão em corrente contínua

ADD	<i>Address</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
RGB	<i>Red, Green and Blue</i>
HTTP	<i>HyperText Transfer Protocol</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>
CSV	<i>Comma Separated Values</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS . . . . .	16
1.2	METODOLOGIA . . . . .	16
1.3	ESTRUTURA DO DOCUMENTO E CONTRIBUIÇÕES . . . . .	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>20</b>
2.1	AGRICULTURA DIGITAL . . . . .	20
<b>2.1.1</b>	<b>Agricultura de precisão</b> . . . . .	<b>21</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Agricultura protegida</b> . . . . .	<b>23</b>
2.2	INTERNET DAS COISAS . . . . .	24
<b>2.2.1</b>	<b>Aplicação da Internet das Coisas na agricultura protegida</b> . . . . .	<b>25</b>
2.3	SISTEMAS DE TEMPO REAL, SISTEMAS EMBARCADOS E SISTEMAS OPERACIONAIS DE TEMPO REAL . . . . .	26
<b>2.3.1</b>	<b>Sensores e atuadores</b> . . . . .	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>PROJETO MECÂNICO DA ESTRUTURA DA ESTUFA</b> . . . . .	<b>29</b>
3.1	MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DA ESTRUTURA DA ESTUFA . . . . .	29
3.2	CONSTRUÇÃO DA ESTUFA . . . . .	29
<b>3.2.1</b>	<b>Estrutura de sustentação</b> . . . . .	<b>30</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Estrutura de proteção</b> . . . . .	<b>30</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Estrutura de irrigação</b> . . . . .	<b>31</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Estrutura de abertura</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>MONTAGEM DO HARDWARE DA ESTUFA</b> . . . . .	<b>37</b>
4.1	REQUISITOS DO HARDWARE DA ESTUFA . . . . .	37
4.2	SENSOR DE UMIDADE E TEMPERATURA DO AR (DHT11) . . . . .	37
4.3	SENSOR DE UMIDADE DO SOLO RESISTIVO . . . . .	39
4.4	SENSOR DE TEMPERATURA DO SOLO (DS18B20) . . . . .	40
4.5	SENSOR DE LUMINOSIDADE (BH1750FVI) . . . . .	41
4.6	SENSOR ULTRASSÔNICO (HC-SR04) . . . . .	44
4.7	FITA LED ENDEREÇÁVEL (WS2812B) . . . . .	45
4.8	SERVO MOTOR . . . . .	48
4.9	MODULO RELÉ . . . . .	48
4.10	BOMBA D'ÁGUA . . . . .	49
4.11	PONTE H (L298N) . . . . .	49
4.12	VENTOINHA ( <i>COOLER</i> ) . . . . .	49

4.13	MICROCONTROLADOR: ESP32 . . . . .	50
4.14	FONTE DE ENERGIA . . . . .	51
4.15	MODULO REGULADOR DE TENSÃO (LM2596) . . . . .	51
4.16	CIRCUITO ELETRÔNICO . . . . .	53
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE DO MICROCONTROLA-</b>	
	<b>DOR DA ESTUFA . . . . .</b>	<b>55</b>
5.1	FIRMWARE . . . . .	55
<b>5.1.1</b>	<b>Firmware do microcontrolador . . . . .</b>	<b>55</b>
5.1.1.1	Firmware do controle da bomba d'água . . . . .	57
5.1.1.2	Firmware do controle do sistema de ventilação . . . . .	58
5.1.1.3	Firmware do controle do sistema de iluminação artificial . . . . .	59
5.2	PLATAFORMA IOT: TAGOIO . . . . .	59
<b>5.2.1</b>	<b>Comunicação entre ESP32 e TagoIO . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>5.2.2</b>	<b><i>Dashboard</i> . . . . .</b>	<b>62</b>
5.2.2.1	Monitoramento dos sensores . . . . .	62
5.2.2.2	Controle dos atuadores . . . . .	63
5.3	BANCO DE DADOS SQL . . . . .	63
<b>6</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>66</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>7.0.1</b>	<b>Trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>71</b>
	<b>APÊNDICE A – FICHA TÉCNICA DA ESTRUTURA DE ALUMÍNIO</b>	
	<b>DO PROTÓTIPO DE ESTUFA . . . . .</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O setor agrícola é um dos pilares mais importantes para a renda nacional nos países em desenvolvimento e a implementação tecnológica neste setor é de fundamental importância para seu desenvolvimento e apoio na economia nacional (NYAGA et al., 2021). Além disso, a agricultura desempenha um papel fundamental no fornecimento de alimentos para seres humanos e animais, bem como na oferta de matérias-primas para a indústria (AHMED et al., 2020).

A história da agricultura é marcada por várias revoluções, a primeira revolução se deu desde os antigos egípcios e gregos, os quais desenvolveram métodos agrícolas, sistemas de irrigação e equipamentos para facilitar o manejo da agricultura (MOHAMED et al., 2021). A segunda revolução agrícola ocorreu no século XVIII, durante a Revolução Industrial, que se destacou pelo plantio em larga escala associado ao desenvolvimento de máquinas industriais e a mecanização do campo. No século XX, aconteceu a terceira revolução agrícola, também conhecida como Revolução Verde, caracterizada por um forte processo de modernização da agricultura com a expansão no uso de fertilizantes minerais e o aumento do uso de pesticidas, tudo isso acompanhado pelo desenvolvimento de diversas máquinas agrícolas. Essas transformações históricas refletem a constante evolução da agricultura ao longo do tempo (BOCHTIS; SØRENSEN; KATERIS, 2019).

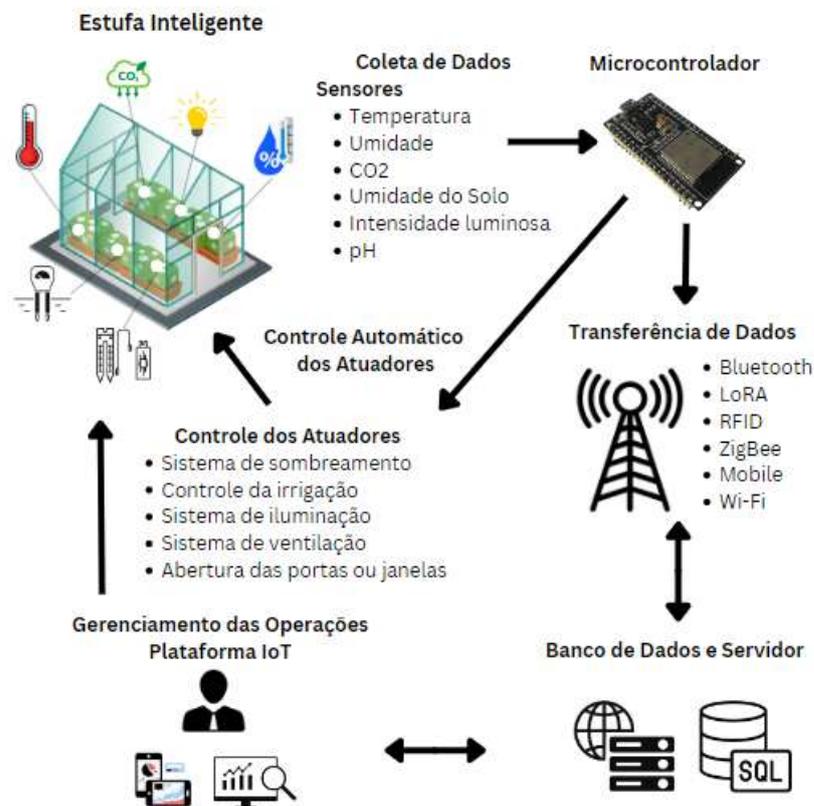
Atualmente, a sociedade está testemunhando a quarta revolução agrícola, caracterizada pelo desenvolvimento significativo na tecnologia de comunicação (ICT, do inglês *information communication technology*) e da inteligência artificial (AI, do inglês *artificial intelligence*). Essas tecnologias têm como foco a facilidade do controle remoto e a interconectividade dos dispositivos (MOHAMED et al., 2021). Assim, as práticas agrícolas baseadas em tecnologia da informação são chamadas de agricultura inteligente, agricultura moderna, agricultura digital ou agricultura 4.0. Apesar das diferentes nomenclaturas para o mesmo conceito, existem seis áreas principais que estão envolvidas nesse tipo de agricultura: (i) coleta e análise de dados; (ii) robótica (iii) inteligência artificial; (iv) redes de sensores sem fio; (v) tecnologia de drones; (vi) Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of things*); (vii) e computação em nuvem e aplicativos de software (ABDALLA; EL-RAMADY, 2022).

No contexto da agricultura 4.0 os sistemas de produção baseado em comunicação e informação, demandam cada vez mais integração e agilidade para lidar com estruturas complexas e colaborativas, juntamente com análises avançadas de dados (BERSANI et al., 2022). Nesse cenário, as aplicações de IoT proporcionam um valor agregado significativo ao aprimorar a conectividade de informações (LEE, 2019). Na agricultura a tecnologia IoT é constituída por uma rede de sistemas de sensores que registram vários indicadores das condições climáticas, do solo e das plantas, incluindo umidade, nutrição, temperatura e níveis de pesticidas (BOURSIANIS et al., 2022). Os casos de uso da IoT na agricultura estão associados a utilização de sensores com inteligência artificial, atuadores, drones não tripulados, satélites e máquinas inteligentes, todos

aplicados na gestão de estufas inteligente e agricultura de precisão (MARAVEAS et al., 2022).

A arquitetura de uma aplicação IoT em um sistema de estufas inteligentes envolve a utilização de sensores e atuadores para coletar e controlar os parâmetros do solo e do ambiente (GARCÍA et al., 2017). Os dados dos sensores são processados por um microcontrolador e transferidos para um servidor por um protocolo de comunicação e são armazenados em um banco de dados (VALENTE; NETO, 2017). Além disso, o gerenciamento e a visualização das informações no sistema é realizado pelo agricultor através de uma plataforma IoT proporcionando um maior controle do processo de cultivo e tornando-o mais previsível e eficiente. Este tipo de aplicação é detalhada na Figura 1 (BERSANI et al., 2022).

Figura 1 – Arquitetura de uma aplicação IoT em estufas inteligentes.



Fonte: Adaptado de Bersani et al. (2022).

Diante das diferentes aplicações IoT, o presente projeto visa o desenvolvimento de um protótipo de estufa inteligente, com arquitetura semelhante ao modelo ilustrado na Figura 1. A concepção desse sistema envolve a utilização de diversos sensores e atuadores para automatizar o controle do ambiente de cultivo. No conjunto de sensores, é utilizado dispositivos dedicados à medição da umidade e temperatura do solo e ambiente, bem como da intensidade luminosa. Os atuadores, por sua vez, englobam uma bomba de irrigação, iluminação artificial, ventiladores e um sistema de abertura automático da estufa, tudo isso para gerenciar e otimizar as condições do ambiente de cultivo. A transmissão de dados é realizada através do Wi-Fi, permitindo o envio

das informações para um servidor web, as quais são armazenadas em um banco de dados com consulta de dados estruturada (SQL, do inglês *Structured Query Language*) (REETISHWAREE; HURBUNGS, 2020). Além disso, o sistema possui um *dashboard* na plataforma IoT da TagoIO (2023d) que possibilita o controle dos atuadores e a visualização dos dados. Embora a versão gratuita da TagoIO ofereça todos os recursos, seu uso é limitado, adequando-se ao escopo de teste do protótipo da estufa neste projeto.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um protótipo de estufa inteligente, aplicando os conceitos da IoT, para criar um ambiente de cultivo controlado e eficiente, no qual as condições ambientais são monitoradas, tais como a umidade, a temperatura e a luminosidade. Além disto, os sistemas de irrigação, ventilação e iluminação artificial são controlados de forma automatizada ou acionados por um usuário através de uma plataforma IoT. Esta plataforma IoT também visa permitir que os agricultores tenham acesso remoto aos dados em tempo real e controle sobre o ambiente da estufa.

Os objetivos específicos desta proposta são:

- a) Projetar, fabricar e montar o protótipo da estufa, incluindo a estrutura de sustentação, proteção, irrigação e abertura;
- b) Projetar e levantar as especificações do hardware do sistema da estufa;
- c) Selecionar os sensores adequados para as medições das variáveis do solo e do ambiente;
- d) Selecionar os atuadores adequados para os sistemas de controle da estufa;
- e) Projetar e levantar as especificações do firmware do microcontrolador para o sistema da estufa;
- f) Desenvolver o firmware do microcontrolador para o controle do sistema;
- g) Projetar os requisitos do *frontend* e *backend*;
- h) Conectar o sistema a uma plataforma IoT para a visualização dos dados e controle dos atuadores (*frontend*);
- i) Conectar o sistema a um servidor Web para armazenar os dados em um banco de dados SQL (*backend*);
- j) Implementar e testar todo o sistema e analisar os resultados.

## 1.2 METODOLOGIA

A fim de alcançar os objetivos mencionados deste trabalho, o roteiro de execução se divide nas etapas sumarizadas nos tópicos a seguir:

- ETAPA 1 - *Projeto da estrutura da Estufa*: Será projetado e modelado a estrutura do protótipo da estufa.
- ETAPA 2 - *Fabricação da estrutura da Estufa*: Será fabricado as peças para a construção do protótipo da estufa.
- ETAPA 3 - *Seleção dos sensores e atuadores*: Será realizada a escolha dos sensores que irão monitorar as variáveis do ambiente e do solo, bem como os atuadores para o controle da estufa.
- ETAPA 4 - *Desenvolvimento do firmware*: Será desenvolvido o firmware que permitirá ao microcontrolador processar os dados dos sensores e controlar os atuadores da estufa de forma autônoma.
- ETAPA 5 - *Conexão com a plataforma IoT*: Será integrado ao firmware, a comunicação entre o microcontrolador e a plataforma IoT que possibilitará a conexão do protótipo à nuvem, permitindo a visualização, o monitoramento e o controle remoto.
- ETAPA 6 - *Conexão com o banco de dados*: Será integrado ao firmware, a comunicação entre o microcontrolador e o servidor Web para armazenar as informações em um banco de dados SQL.
- ETAPA 7 - *Testes e validações*: Serão realizados testes para validar o funcionamento do sistema completo, incluindo a coleta e análise dos dados obtidos ao longo dos testes. Além disso, será feita uma avaliação do sistema desenvolvido, identificando possibilidades de melhorias.

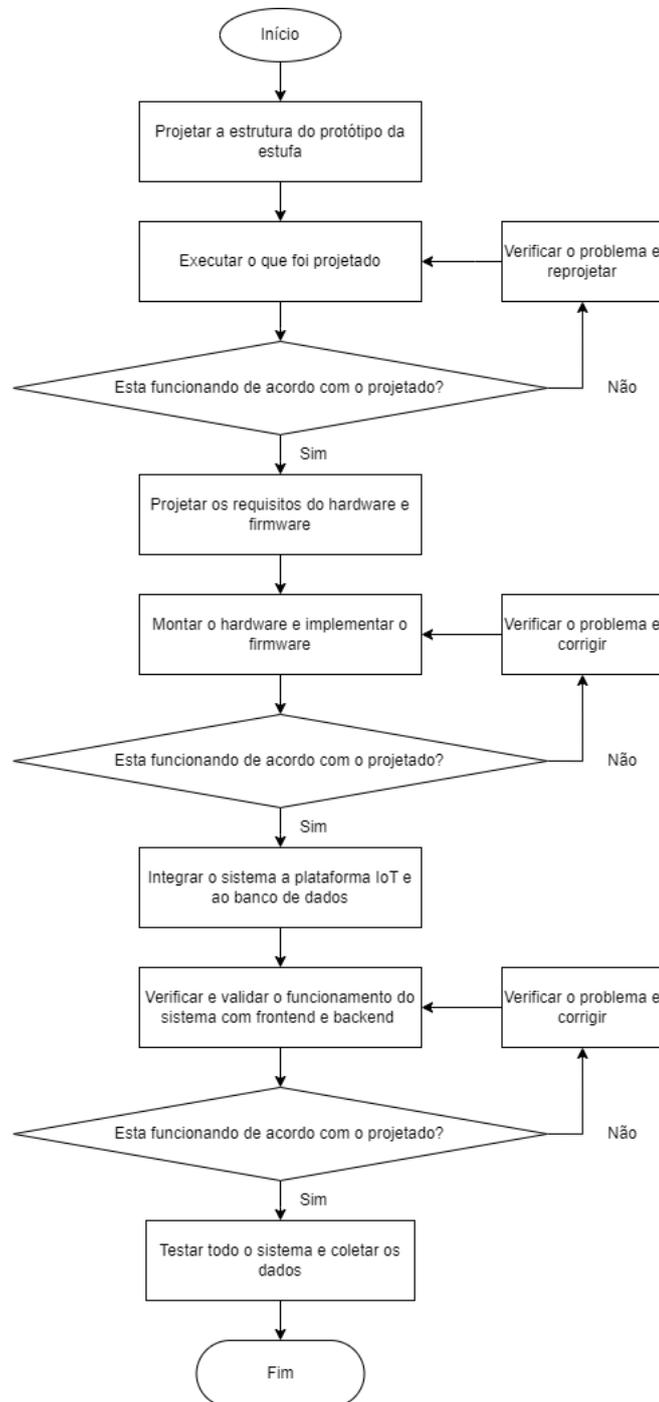
Com base na metodologia esquematizada na Figura 2 é possível abordar o projeto de maneira sistemática e organizada, garantindo que todos os aspectos relevantes sejam considerados e que o sistema final seja desenvolvido de maneira eficiente e eficaz.

### 1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO E CONTRIBUIÇÕES

O documento está estruturado da seguinte forma:

- No Capítulo 1 é apresentado a introdução ao tema, o objetivo geral e específico do projeto, a metodologia aplicado no desenvolvimento e a estrutura deste estudo;
- No Capítulo 2 é apresentado e discutido sobre a teoria relacionada a agricultura digital, agricultura de precisão, agricultura protegida, Internet das Coisas e suas aplicações e sistemas embarcados de tempo real.
- No Capítulo 3 é descrito o desenvolvimento do planejamento, fabricação e montagem da estrutura do protótipo da estufa.

Figura 2 – Fluxograma dos procedimentos deste trabalho.



Fonte: Autoria própria.

- No Capítulo 4 é detalhado os componentes eletrônicos que são utilizados no circuito da estufa, além de descrever o seu funcionamento e características na estufa.
- No Capítulo 5 é abordado o funcionamento do firmware do microcontrolador para a operação de cada sistema da estufa, além de detalhar a integração do microcontrolador com a plataforma IoT e o servidor web para o armazenamento de dados.
- No Capítulo 6 são apresentados os resultados e as análises dos gráficos dos dados coletados durante os testes do protótipo e os problemas encontrados no sistema da estufa inteligente.
- No Capítulo 7, são revisitadas de forma sumária as principais contribuições do trabalho e elencado possíveis melhorias deste projeto para trabalhos futuros.
- No Apêndice A, é apresentado a ficha técnica completa contendo as dimensões de cada perfil de alumínio utilizado na construção e montagem da estrutura do protótipo da estufa.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é apresentado a fundamentação teórica de temas abordados neste trabalho. Assim, é abordado os aspectos gerais relacionados a agricultura digital, a agricultura de precisão, a agricultura protegida, Internet das Coisas e suas aplicações na agricultura protegida, os conceitos dos sistemas de tempo real e sistemas embarcados, enfatizando a importância dos sensores e atuadores na monitorização e controle dos ambientes de cultivo. A compreensão destes fundamentos é a base para desenvolvimento do projeto, que visa a criação de uma estufa inteligente com a aplicação de IoT para otimizar o cultivo de plantas em ambientes controlados.

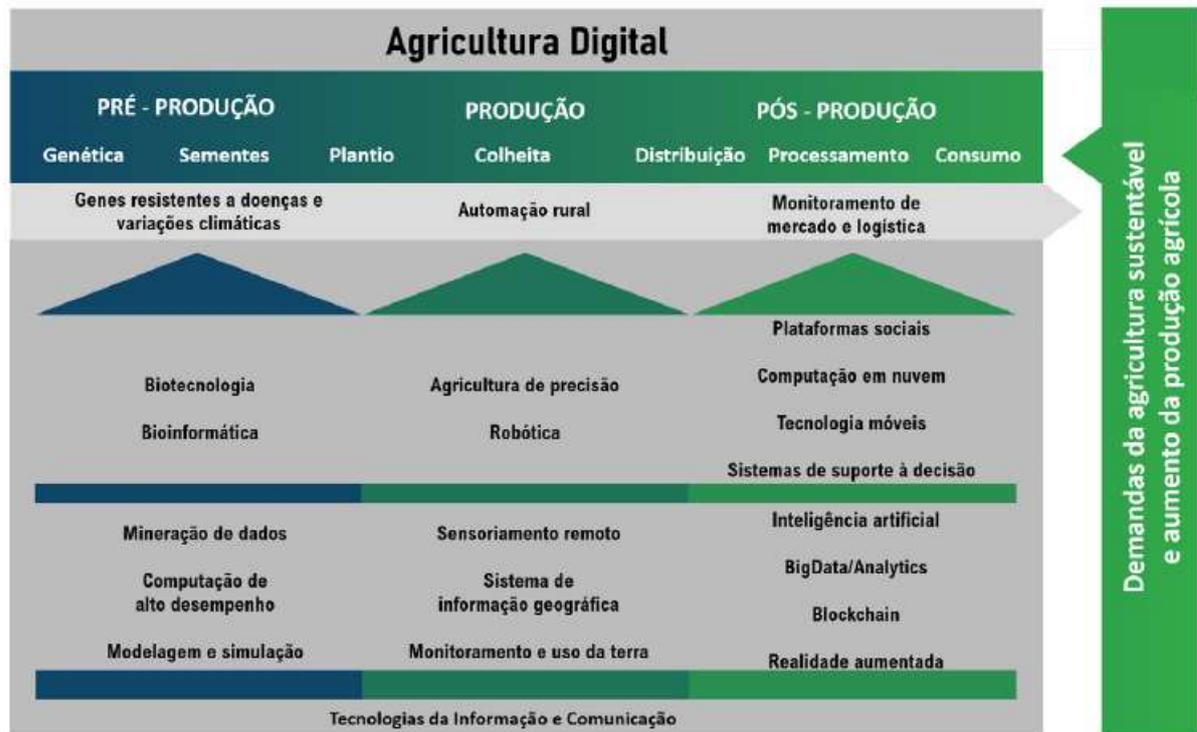
### 2.1 AGRICULTURA DIGITAL

A agricultura digital é a utilização de tecnologias digitais em todas as fases da cadeia de produção com a finalidade de promover vantagens competitivas e benefícios socioambientais. Na agricultura moderna os sistemas de manejo se baseiam no processamento de grande quantidades de dados que são produzidos nas etapas de pré-produção, produção e pós-produção da cadeia. Como é ilustrado na Figura 3 a etapa de pré-produção é possível relacionar os dados com a finalidade de melhorar a parte genética das plantas e animais. Na produção, os dados são coletados por drones, satélites, sensores colocados em plantas, animais, solo, atmosfera, máquinas, equipamentos e veículos conectados entre si e com a central de coleta de dados. Por fim, na pós-produção os dados são oriundo de análises de mercado e das etapas de armazenamento, logística, distribuição, rastreabilidade e consumo (MASSRUHÁ et al., 2020).

Na etapa de produção, as práticas que norteiam a agricultura de precisão (AP) e a robótica são o uso de sensores localizados no solo, na atmosfera, na planta, nas máquinas e equipamentos para a captação de dados e monitoramento remoto ( Figura 4). Estas tecnologias associadas a softwares de análise de dados permitem um mapeamento do campo mais preciso que proporciona o plantio inteligente de sementes e a aplicação otimizada de insumos químicos ou biológicos para aumentar a eficiência, evitar o uso inadequado de recursos e a poluição do meio ambiente (SAIZ-RUBIO; ROVIRA-MÁS, 2020).

No contexto da agricultura digital e na etapa de produção, as fazendas agropecuárias são intensamente monitoradas, conectadas e automatizadas em uma rede totalmente integrada. Através da agricultura de precisão, os sensores distribuídos ao longo de toda a propriedade e interligados à internet captam e transmitem os dados em grande volume (*Big Data*) na qual é necessário filtrar, armazenar (computação em nuvem) e analisar. E os algoritmos mais sofisticados com técnicas de inteligência computacional (*Analytics*) auxiliam o trabalho humano no gerenciamento dessa grande quantidade de dados (PIVOTO et al., 2018). Nesta fase de produção, os equipamentos como drones, veículos, smartphones, câmeras, sensores de solo e ambiente são conectados a internet e conseqüentemente as plataformas de IoT que utilizam as técnicas de análise (*Analytics*) e processamento de grande quantidade de dados (*Big Data*)

Figura 3 – Agricultura digital em todas as etapas da cadeia produtiva.



Fonte: Massruhá et al. (2020).

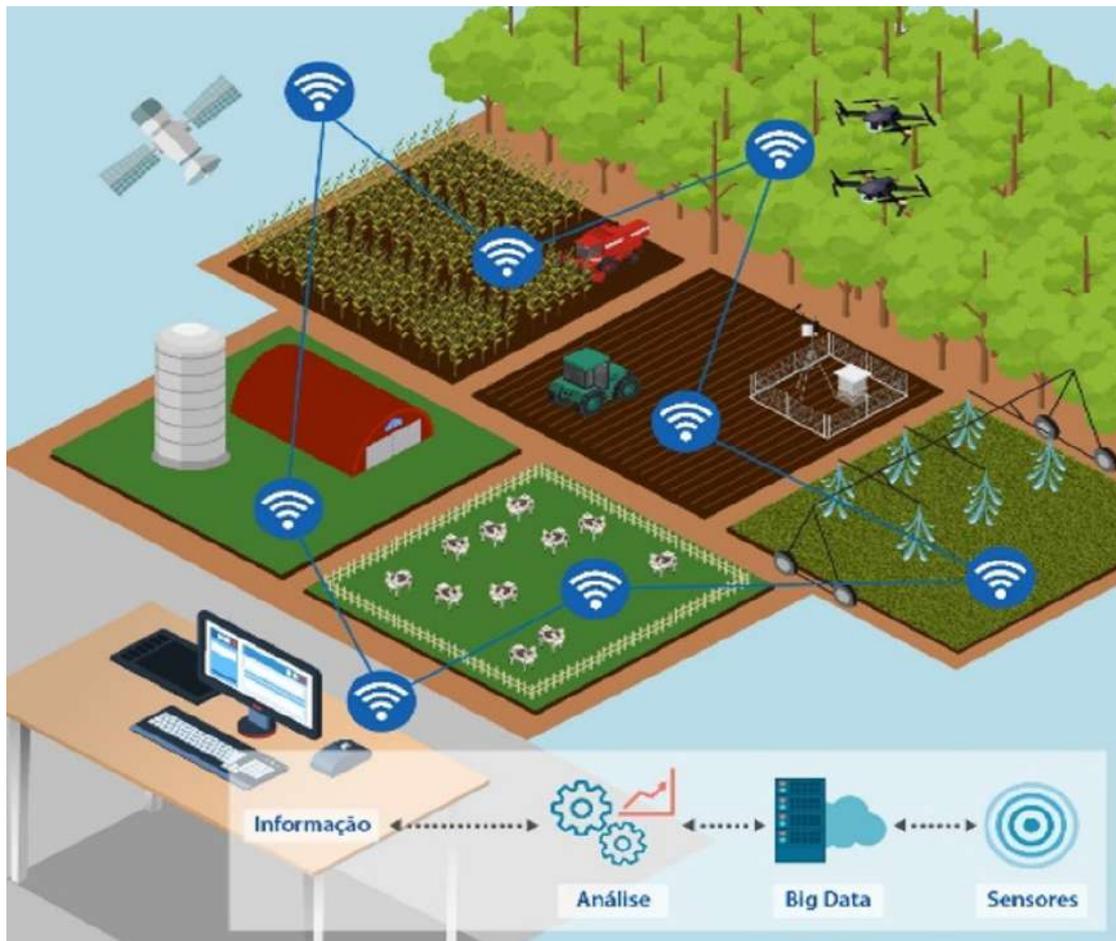
para serem aplicados na gestão da propriedade, na irrigação, na colheita e em outros processos como mostrado na Figura 5. Com o resultado da análise dos dados, na etapa da atuação por meio de comandos remotos aos tratores e implementos agrícolas que equipados de sistema de posicionamento global (GPS), farão intervenções nos pontos do cultivo onde há necessidade, com a finalidade de otimizar custo, produção e impacto ao meio ambiente (MASSRUHÁ et al., 2020).

### 2.1.1 Agricultura de precisão

Diante do crescimento populacional e a demanda por suprimentos, é necessário ter uma maior preocupação com a qualidade dos produtos, a utilização eficiente dos recursos naturais e a redução dos impactos ambientais. Assim se faz necessário gerir as plantações para manter uma produtividade eficiente e rentável que atenda a crescente demanda por alimentos (FILHO et al., 2018).

Uma abordagem fundamental para enfrentar o desafio da crescente demanda por alimentos é a redução da lacuna de produtividade, que se refere à diferença entre o potencial de produção das culturas e a produção real alcançada pelos agricultores. Essa redução pode ser alcançada através da aplicação de técnicas da agricultura de precisão na agricultura digital que utilizam tecnologias e inovações para monitorar o crescimento das culturas e otimizar o uso de insumos agrícolas. Assim permitindo aos agricultores o monitoramento de forma mais eficaz

Figura 4 – Fazenda inteligente na etapa de produção.



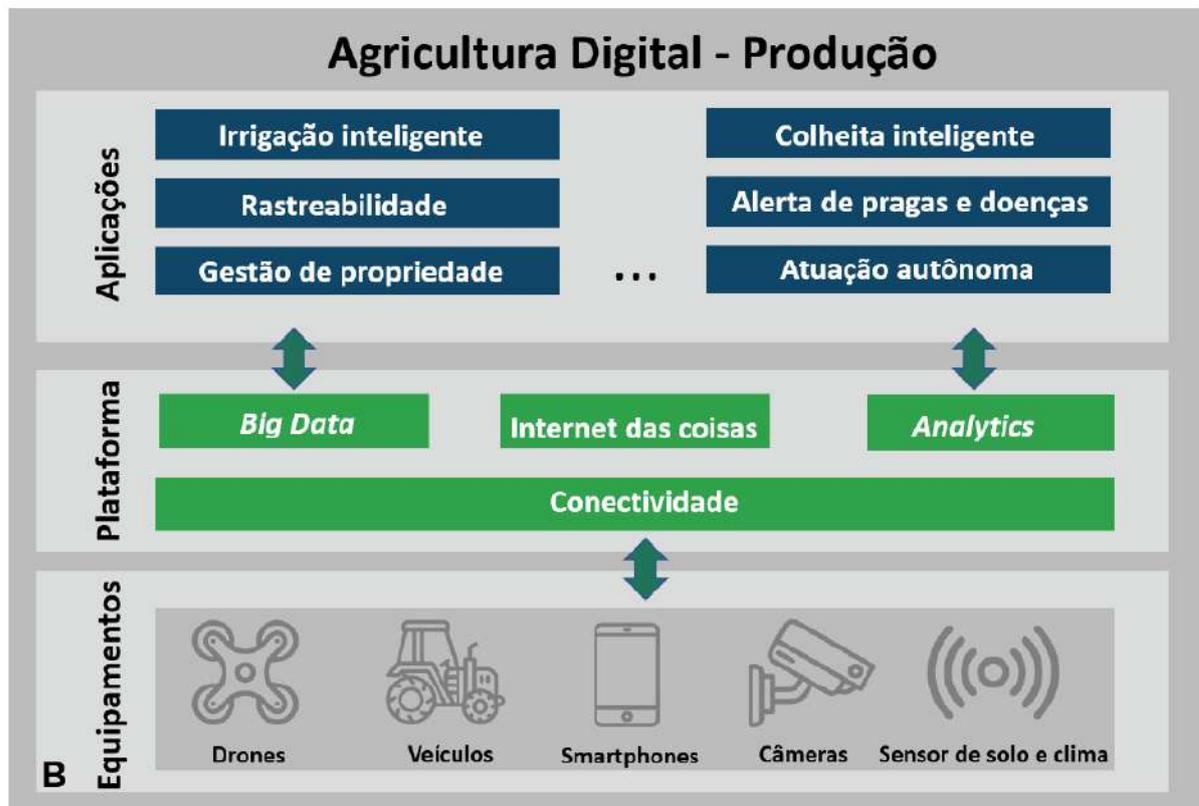
Fonte: Adaptado de Massruhá et al. (2020).

do solo, da planta e da atmosfera, identificando e gerenciando fatores que levam as perdas na produção agrícola.

A agricultura de precisão utiliza o gerenciamento específico do local para aumentar a eficiência dos sistemas de produção agrícola (QUEIROZ et al., 2020). Isso envolve o uso de práticas agrícolas com base nas tecnologias de informação (TI), ferramentas de mecanização e automação. Esses sistemas são dependentes de dados para se obter uma base estrutural e conceitual que conecta os sistemas de produção agropecuários ao mundo digital, coletando e compartilhando dados de campo. A agricultura de precisão (AP) permite benefícios econômicos e ambientais quando relacionado a aplicação e uso de fertilizantes, corretivos de acidez, pesticidas, sementes, água e outros. Além de considerar a variabilidade espacial e temporal que permite a aplicação no local, momento e quantidade correta.

Desse modo, a agricultura de precisão é uma técnica que auxilia os agricultores na tomada de decisões durante o manejo das culturas, com o uso de máquinas, equipamentos, sensores e atuadores que auxiliam no uso eficiente e otimizado dos insumos agrários, a fim de obter o máximo de retorno econômico com a maior produtividade e a redução do impacto

Figura 5 – Equipamentos, plataformas e aplicações da agricultura digital na etapa de produção.



Fonte: Massruhá et al. (2020).

ambiental (BASSOI et al., 2020).

### 2.1.2 Agricultura protegida

A agricultura protegida engloba um conjunto de técnicas que tem como objetivo proteger as culturas dos impactos negativos causados por fenômenos climáticos, ao mesmo tempo que proporciona condições ambientais ideais para o crescimento das plantas (HERNÁNDEZ-MORALES et al., 2023). Nesse contexto, as estufas desempenham um papel fundamental, uma vez que se trata de estruturas fechadas destinadas a proteger as plantas de fatores externos, como condições climáticas, poluição etc. Oferecendo um ambiente propício e controlado para o desenvolvimento sustentável e eficiente das plantas durante todo o ano (DANITA et al., 2018). Assim, é possível cultivar alimentos fora de seus ciclos naturais, acelerar o processo de crescimento das culturas e reduzir a exposição a pragas e doenças, resultando em uma produção de colheitas com melhor qualidade e rendimento. No entanto, manter as condições ambientais ideais dentro de estufas pode ser desafiador, pois vários fatores impactam o crescimento das plantas (REZVANI et al., 2020). Dentre os parâmetros ambientais de maior impacto, estão a temperatura, a umidade relativa, os níveis de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e a intensidade de luz (HERNÁNDEZ-MORALES et al., 2023).

Em relação a esses fatores ambientais, a temperatura é um dos elementos que mais

impactam nas fases de desenvolvimento das plantas, pois tem uma relação direta com seus processos fisiológicos. A umidade em níveis extremos contribui diretamente com problemas relacionados as doenças nas raízes e folhas, estresse das plantas e perda de qualidade, entre outros. Além disso, o CO<sub>2</sub> é um gás natural que fornece às plantas a energia necessária para o seu desenvolvimento. Se a concentração de CO<sub>2</sub> for muito baixa, as culturas não realizarão a fotossíntese de forma adequada, afetando seu crescimento, desenvolvimento e florescimento. Por fim, a intensidade da luz também influencia diretamente o processo de fotossíntese das plantas e o seu excesso provoca um aumento na temperatura, levando a um aumento na transpiração das plantas e, conseqüentemente, a uma maior demanda por irrigação (HERNÁNDEZ-MORALES et al., 2023).

## 2.2 INTERNET DAS COISAS

Kevin Ashton em 1999 utilizou pela primeira vez o termo internet das coisas e de início se referia ao rastreamento de produtos através da leitura de dispositivos com Identificação por Radiofrequência (RFID, do inglês *radio-frequency identification*). Em 2015, a definição evoluiu para os dispositivos que são conectados à internet que captam e armazenam dados do ambiente a fim de automatizar tarefas (QUEIROZ et al., 2022).

Os sistemas de IoT proporcionam a integração de produtos inteligentes, que são objetos físicos que possuem a capacidade de coletar, processar e trocar informações com outros dispositivos. Esses dispositivos possuem sensores, atuadores e conectividade com a internet, o que lhes permite interagir com o ambiente, tomar decisões com base em dados ou serem controlados remotamente. Esta integração permite o processamento e troca de informações entre usuários, centro de dados e dispositivos, criando vários serviços inteligentes. Este tipo de serviço se baseia no uso de produtos inteligentes como objeto de fronteira entre o consumidor e prestador de serviço, permitindo a utilização de recursos de forma conectada e adaptada para benefício mútuo (BEVERUNGEN et al., 2017). Assim podemos ter objetos físicos, veículos, residências e empresas coletando dados através de sensores e transmitindo pela internet para os usuários e prestadores de serviços (BERSANI et al., 2022).

Cada vez mais cresce o desenvolvimento de sistemas com dispositivos que tenham a capacidade de sensoriamento e a conexão com a internet. Os dados são enviados por redes IoT, que suportam vários protocolos e formatos de dados. Desse modo a aplicação do IoT é ampla e atinge vários cenários de aplicação que são as cidades inteligentes, transportes, agricultura, energia, indústria e saúde. No cenário da agricultura os dispositivos IoT são utilizados a fim de tornar o cultivo mais sustentável, aumentar a produtividade e melhorar a eficiência em várias etapas do processo de cultivo. Assim o crescimento da utilização de técnicas de precisão, sistemas embarcados e computação em nuvem tem proporcionado o crescimento do mercado de soluções IoT para a agricultura digital utilizando de dispositivos para coletar em tempo real os dados gerados durante o cultivo (QUEIROZ et al., 2022).

Com esses dados e com a hiperconectividade, o agricultor pode analisá-los e usá-los para melhorar os processos e tomar decisões mais precisas. As práticas que unem o conceito de IoT e *Big Data* estão relacionados na capacidade das “coisas” se conectarem à internet para compartilhar, processar, armazenar e analisar uma grande quantidade de dados. Essas informações podem ser dados estruturados, semiestruturados ou não estruturados (IZHAR ALAM, 2023) que possuem o potencial de ser explorado e coletados. Enquanto que em IoT a geração de informações e a hiperconectividade dos dispositivos são características fundamentais, no *Big Data* o item principal são as plataformas de análise na qual permite que as empresas e organizações possam tomar decisões e conclusões mais informadas e precisas a fim de gerar mais valor nos seus processos e serviços (MAGRANI, 2018).

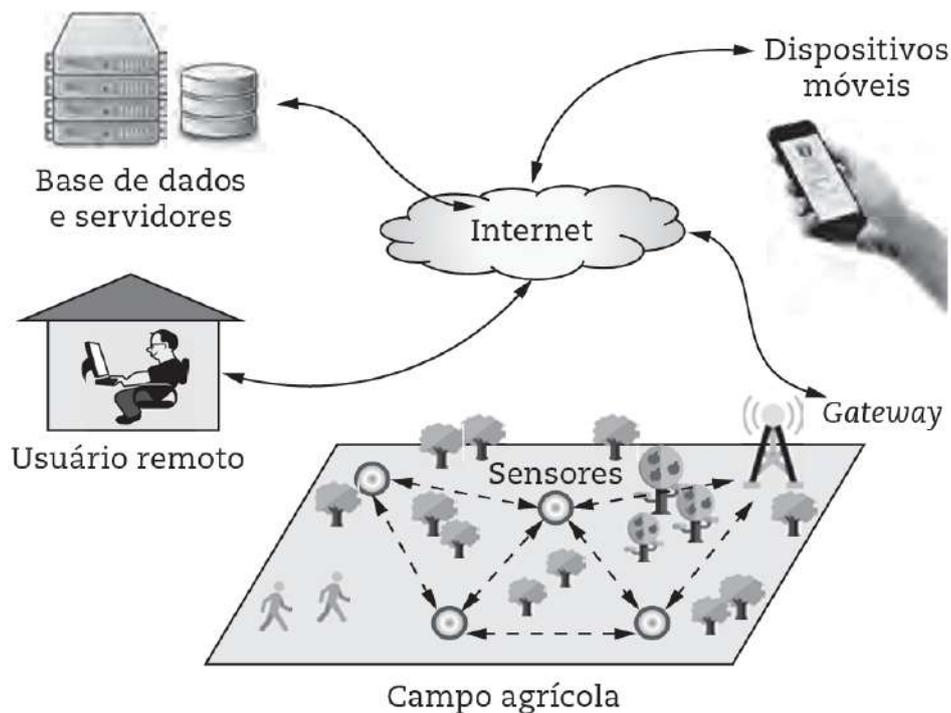
### **2.2.1 Aplicação da Internet das Coisas na agricultura protegida**

Nos últimos anos, a agricultura tem evoluído com a integração de tecnologias de precisão e sistemas inteligentes, visando aprimorar a qualidade e quantidade das colheitas, bem como a gestão eficiente dos recursos agrícolas. Para atingir esse objetivo, sistemas capazes de monitorar em tempo real, coletar e processar grandes volumes de dados tornam-se essenciais. Assim, IoT e modelos preditivos de aprendizado de máquina (*Machine Learning*) desempenham um papel significativo no avanço da agricultura inteligente, fornecendo informações que podem ajudar os agricultores a tomar decisões melhores em relação ao planejamento de diversas atividades, como controle climático e tratamentos e gerenciamento de recursos (HERNÁNDEZ-MORALES et al., 2023).

Na agricultura, há várias maneiras de implementar sistemas IoT. Em um cenário geral, diversos sensores distribuídos em todo o campo coletam dados, que são enviados para um *gateway* que está conectado a internet e essas informações são distribuídas para diversos dispositivos de visualização, como também são armazenadas em banco de dados ou servidores na nuvem, como esquematizado na Figura 6. As informações para as tomadas de decisões dos agricultores vêm dos dados processados e visualizados em aplicativos e computadores, incluindo sistemas de gerenciamento, monitoramento, controle e máquinas agrícolas autônomas (QUEIROZ et al., 2022).

No contexto da agricultura são exemplos de aplicação IoT, os sistemas de medição e controle que coletam informações usando tecnologia sem fio móvel do ambiente de produção da estufa. Esses sistemas coletam informações sobre temperatura, umidade e sinais do solo, a fim de monitorar e controlar o ambiente das estufas por meio de sensores e atuadores, permitindo a adaptação às mudanças ambientais. A combinação das vantagens de tecnologias emergentes, como a IoT e os serviços Web, proporciona uma maneira eficaz de gerenciar a grande quantidade de dados na agricultura, bem como gerenciar o uso de energia (BERSANI et al., 2022).

Figura 6 – Cenário geral de um sistema IoT na agricultura.



Fonte: Queiroz et al. (2022).

### 2.3 SISTEMAS DE TEMPO REAL, SISTEMAS EMBARCADOS E SISTEMAS OPERACIONAIS DE TEMPO REAL

Um sistema embarcado é um dispositivo composto por hardware e software desenvolvido para executar uma aplicação específica, diferenciando de computadores de propósito geral. Além disso, esse tipo de sistema pode fazer parte de sistemas maiores, como por exemplo, um sistema em que monitora e controla as emissões de gases, e outro que controla o sistema de freios. Assim esses sistemas estão no dia-a-dia e inseridos em diversas aplicações, como por exemplo, celulares, aviões, automóveis, máquinas industriais, equipamentos médicos e outros (BARR; MASSA, 2006).

A evolução dos sistemas embarcados ocorre em paralelo a constante melhora nas tecnologias computacionais, possibilitando o desenvolvimento e evolução de diversos sistemas. Desse modo esse tipo de sistema está sendo aplicado em diversas áreas e incentivando o crescimento de diferentes tipos de aplicações. Apesar de existirem soluções tecnológicas prontas, este tipo de sistema permite a utilização de equipamentos específicos para a criação de aplicações e soluções personalizadas a situação ou ao problema (FILHO et al., 2018).

Um sistema computacional em tempo real é um sistema de computador no qual a precisão do comportamento do sistema depende não apenas dos resultados lógicos das computações, mas também do tempo físico em que esses resultados são produzidos. Assim as sequências de saídas

relacionadas com o tempo caracteriza o comportamento do sistema (KOPETZ, 2011). Esses sistemas possuem requisitos específicos de sequência lógica e tempo que caso não seja cumprido resultam em falhas no sistema a que se dedicam. A prioridade desses sistemas não é o tempo rápido de resposta a eventos controlados, mas sim o cumprimento dos prazos de todos os eventos controlados pelo sistema (DENARDIN; BARRIQUELLO, 2019).

Os microcontroladores são sistemas de tempo real que realizam

Para a prototipação de sistemas embarcados existem uma grande quantidade de plataformas que podem ser empregados em várias áreas como a automação, o sensoriamento e também na agricultura de precisão. Alguns exemplos de plataformas para criação de sistemas personalizados são o Arduino, STM32, Galileo. Essas plataformas de desenvolvimento possui um microcontrolador que pode ser programado e conectado a circuitos eletrônicos externos, como sensores, relés, válvulas, motores e outros, possibilitando a automação de sistemas a baixo custo e de fácil utilização (FILHO et al., 2018).

### **2.3.1 Sensores e atuadores**

Na agricultura digital e agricultura de precisão as máquinas são equipadas por sensores e atuadores que são partes fundamentais para a captação de dados e automação de sistemas. Assim se faz necessário entender os princípios básicos dos sensores e dos atuadores presentes nas máquinas (QUEIROZ et al., 2022).

Os sensores são dispositivos eletrônicos que respondem a um estímulo físico/químico de maneira específica, transformando uma grandeza física em um sinal padronizado. Eles são uma parte fundamental de sistemas IoT, pois permitem que dados do mundo sejam coletados em tempo real de forma automatizada (BASSOI et al., 2020).

Sensores são essenciais na agricultura moderna, desempenhando papéis importantes tanto no monitoramento quanto no controle de operações em máquinas agrícolas. Esses sensores são classificados em duas categorias principais: sensores de monitoramento e sensores de controle (QUEIROZ et al., 2022). Os sensores de monitoramento são os utilizados no monitor de produtividade das colhedoras e os sensores de controle são utilizados para monitorar as variáveis que serão utilizadas para controlar as dosagens a serem aplicadas. Assim para cada tipo de aplicação e operação são empregado os sensores adequados. Alguns exemplos de parâmetros que os sensores podem monitorar é a velocidade da colhedora, fluxo de produtos colhidos, detecção de ervas daninhas, pragas e doenças, (QUEIROZ et al., 2020) temperatura do solo e do ambiente, umidade do ar e do solo, concentração de dióxido de carbono, luminosidade, (BERSANI et al., 2022) condutividade elétrica aparente do solo, matéria orgânica do solo, pH (BENHOSSI; REYNALDO; MACHADO, 2021).

Já os atuadores são dispositivos que operam de forma inversa dos sensores. Ou seja, ao invés de produzir um sinal a partir de uma mudança do meio, os atuadores atuam no meio

movimentando ou controlando algo a partir de um sinal recebido. Por exemplo, em máquinas agrícolas, os atuadores são utilizados para aplicar de forma automática a dosagem correta de insumos agrícolas, esta quantidade é determinada por um sinal enviado pelo sistema de controle. Desse modo, em muitas aplicações são utilizados atuadores e sensores inteligentes, integrados a dispositivos como microcontroladores que tem a capacidade de processamento e controle de informações (QUEIROZ et al., 2022). Assim a união destas tecnologias de sistemas embarcados, sensores e atuadores, permite uma gama extensa de ideias de aplicação para a Agricultura de Precisão, criando sistemas muito eficientes e com baixo custo (FILHO et al., 2018).

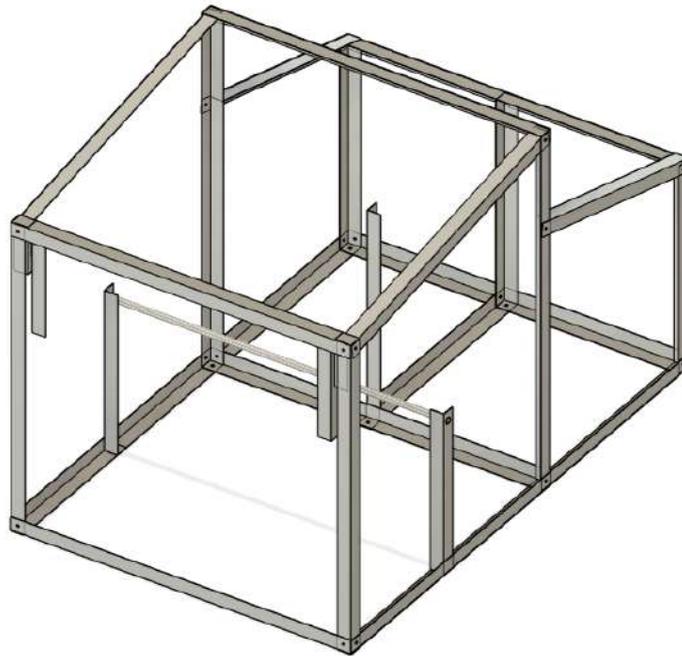
### 3 PROJETO MECÂNICO DA ESTRUTURA DA ESTUFA

Neste capítulo aborda o processo de modelagem tridimensional, construção e montagem da estrutura do protótipo de estufa. Isto inclui a estrutura de sustentação, de proteção, de irrigação e de abertura.

#### 3.1 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DA ESTRUTURA DA ESTUFA

Para esta etapa de modelagem é utilizado o software Fusion360 da Autodesk (AutoDesk, 2023) no qual se desenvolve a modelagem tridimensional completa da estrutura da estufa. A Figura 7 apresenta a montagem da estrutura da estufa, construída a partir dos perfis de alumínio. As dimensões de cada perfil de alumínio que é utilizado para a construção do protótipo da estufa podem ser encontradas no Apêndice A.

Figura 7 – Estrutura da estufa projetada no Fusion360.



Fonte: Autoria própria.

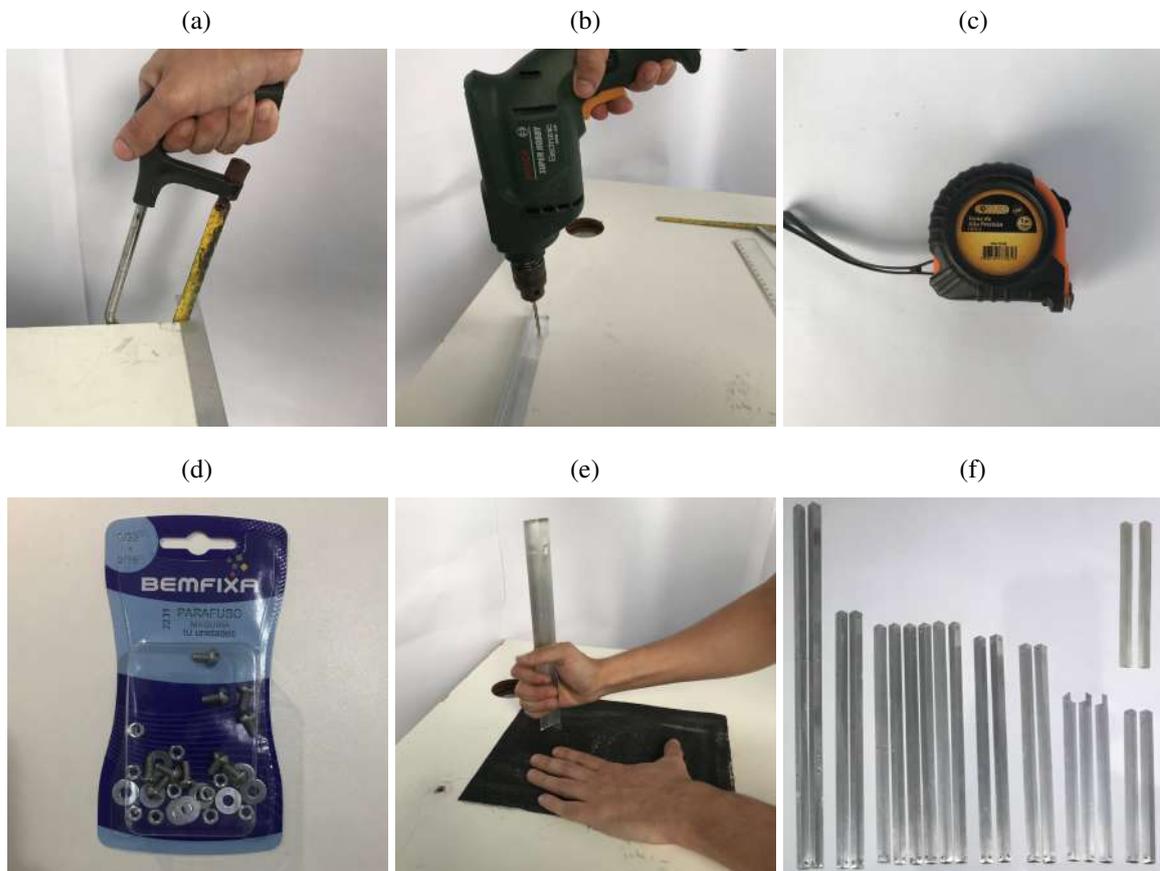
#### 3.2 CONSTRUÇÃO DA ESTUFA

Nesta seção é detalhado os materiais e as ferramentas utilizadas na construção do protótipo da estufa.

### 3.2.1 Estrutura de sustentação

A partir das dimensões e posições dos furos projetados no Fusion360, os perfis de alumínio são fabricados para construção da estrutura, conforme mostrado na Figura 8f. Para realizar os cortes dos perfis, é utilizado uma lâmina de serra, como exemplificado na Figura 8a. Para os furos do parafuso é realizado por meio de uma furadeira equipada com brocas de 4mm de diâmetro (Figura 8b). A obtenção das medidas e posições dos furos é realizada com o auxílio de uma trena (Figura 8c). A finalização e remoção das rebarbas são realizadas por meio de uma lixa metálica de granulometria 40, como mostrado na Figura 8e. A junção dos perfis de alumínio é feita por parafusos máquina de 5/32" x 5/16", juntamente com arruelas e porcas (Figura 8d).

Figura 8 – Ferramentas e materiais utilizados na construção da estrutura de sustentação: (a) lamina de serra, (b) furadeira com a broca de 4mm, (c) trena, (d) parafuso máquina, (e) lixa metálica G 40, (f) perfis de alumínio cortados.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 9, é possível visualizar a montagem final da estrutura do protótipo, que é fixado à uma base de madeira pinus envernizada, a fim de obter maior resistência à umidade.

### 3.2.2 Estrutura de proteção

Na estrutura de proteção da estufa é utilizado o plástico PVC rígido transparente de espessura de 0,4 mm como mostrado na Figura 10a). Para cortar os plásticos foi utilizado um

Figura 9 – Estrutura de alumínio montada na base de madeira.



Fonte: Autoria própria.

estilete (Figura 10b) e uma tesoura (Figura 10c). E na vedação e fixação entre o plástico e o alumínio, é utilizado um isolante de silicone como representado na Figura 10d). Além disso, para as áreas que necessitam de acesso frequente, como os componentes eletrônicos, o reservatório de água e a área de cultivo, é utilizado fita velcro de cor branca para fixar o plástico, como representado na Figura 10e, o que facilita a remoção da proteção quando necessário. E para a parte da abertura lateral onde é colocado a ventoinha (Figura 10f) utiliza-se uma grade para proteger o equipamento e fixar os parafusos de sustentação. Todos os materiais e ferramentas utilizados estão mostrados na Figura 10.

Após a conclusão dos cortes no plástico e a montagem da estrutura de sustentação em alumínio, a estrutura de proteção é fixada e o resultado final dessa etapa pode ser observado na Figura 11. Com essa estrutura montada, é possível ter um ambiente controlado para o cultivo das plantas, enquanto permite o acesso e a manutenção convenientes dos componentes internos da estufa.

### 3.2.3 Estrutura de irrigação

Cada parte do sistema de irrigação é mostrado na Figura 12. Na sua elaboração utiliza-se um bico nebulizador (Figura 12a) no sistema para distribuir a água de forma a espalhar em vários pontos ao invés de ser concentrado em um único local. A mangueira de aquário (Figura 12b) é utilizada para transportar a água do reservatório para os bicos nebulizadores. Perfis

Figura 10 – Ferramentas e materiais utilizados na construção da estrutura de proteção: (a) Plástico PVC rígido, (b) estilete, (c) tesoura, (d) silicone, (e) velcro branco, (f) grade para o cooler.



Fonte: Autoria própria.

de alumínio (Figura 12c) são projetados e fabricados para servir de sustentação e fixação do sistema de irrigação em cima da bandeja, na Figura 12d é possível ver a estrutura montada. Para realizar a vedação do bico nebulizador na mangueira é utilizado cola quente e para fixar no tubo de alumínio é utilizado uma abraçadeira de nylon como mostrado na Figura 12e. A bandeja destinada ao cultivo das plantas é fixada na base de madeira utilizando velcro (Figura 12f), proporcionando uma fixação e facilidade na remoção caso necessite durante o manejo da planta. Assim como a bandeja, o reservatório de água também é fixado na base de madeira com o velcro pelo mesmo motivo, como pode ser visualizado na Figura 12g. A fim de facilitar o abastecimento do reservatório de água e eliminar a necessidade de remover a tampa do reservatório sempre que for necessário reabastece-lo, um funil feito de garrafa pet, é fixado com cola quente na estrutura e conectado ao reservatório de água através da mangueira, como mostrado na Figura 12h. E por fim para bombear a água do reservatório para o bico nebulizador é utilizado uma bomba de aquário de 5 volts (Figura 12i). E na Figura 13 é apresentado a estrutura de irrigação completa.

Figura 11 – Estrutura de proteção montada.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.4 Estrutura de abertura

A parte frontal da estufa não é completamente fechada com o plástico PVC rígido para permitir a abertura de uma região da estufa e aumentar a circulação do vento. Na Figura 14 são mostradas todas as partes do processo de montagem dessa estrutura. E no processo de fabricação desta abertura é feito por meio de dois tipos de perfis de alumínio como mostrado na Figura 14a, um perfil é destinado para sustentar o plástico flexível e acoplar ao eixo do servo motor (a união é realizada com cola quente, como pode ver Figura 14b) e o outro tipo é utilizado para fixar o servo motor na estrutura como mostrado nas Figuras 14c. E na Figura 14d é mostrado os servo motores utilizado, além dos seus acessórios e os parafusos utilizados na fixação com a estrutura. As Figuras 14e e 14f proporcionam uma visão geral da montagem final do sistema de abertura.

Após a conclusão da construção e montagem do mecanismo de abertura da estufa, na Figura 15, é possível visualizar o mecanismo em funcionamento. A Figura 15a demonstra o momento em que a estrutura está aberta, permitindo a circulação do ar, enquanto que na Figura 15b representa o estado em que a estrutura está completamente fechada.

Figura 12 – Partes do sistema de irrigação: (a) bicos nebulizadores, (b) mangueira de aquário, (c) perfis de sustentação da irrigação, (d) perfis de sustentação montado, (e) sistema de irrigação montado na estrutura, (f) bandeja fixada com velcro, (g) reservatório fixado com velcro, (h) funil de abastecimento de água, (i) bomba de aquário.



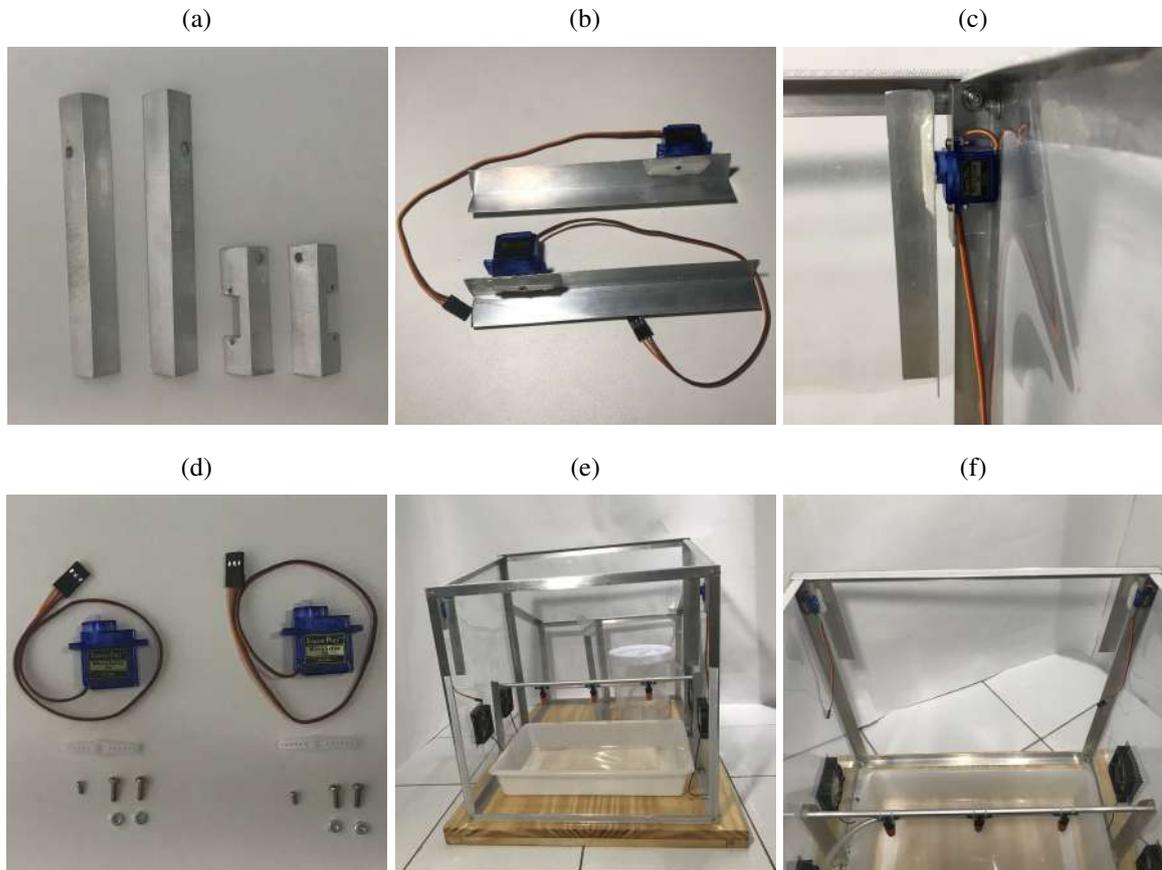
Fonte: Autoria própria.

Figura 13 – Estrutura de irrigação montada.



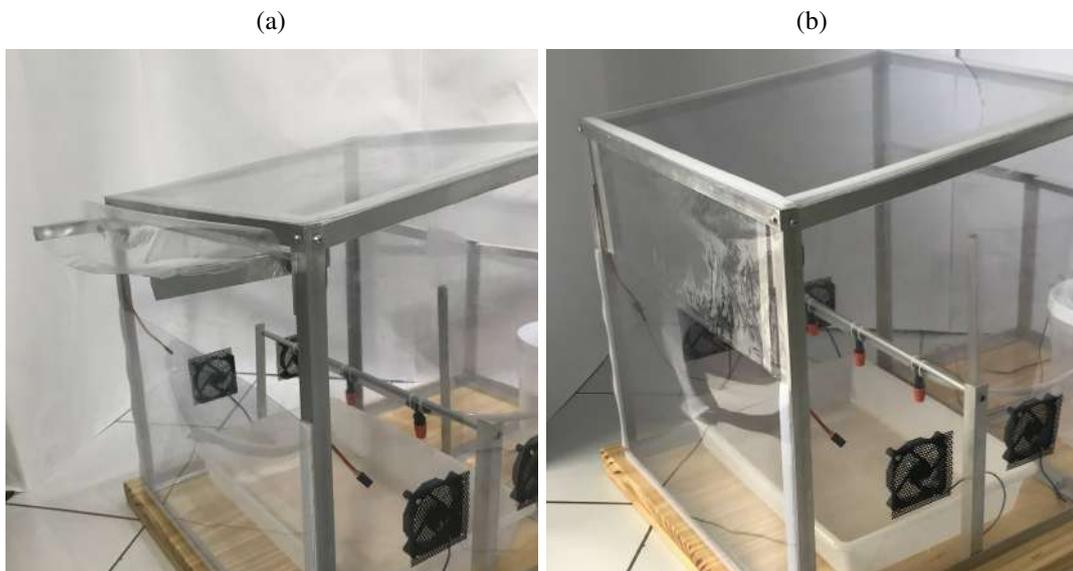
Fonte: A autoria própria.

Figura 14 – Materiais utilizados na estrutura de abertura: (a) perfis de alumínio fabricados, (b) perfis de alumínio colado no servo motor, (c) servo motor fixado na estrutura, (d) servos motores e seus acessórios, (e) visão geral do sistema pela frente, (f) visão geral do sistema por trás.



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 – Sistema de abertura da estufa: (a) mecanismo aberto, (b) mecanismo fechado.



Fonte: Autoria própria.

## 4 MONTAGEM DO HARDWARE DA ESTUFA

Neste capítulo, são apresentados todos os componentes eletrônicos utilizados na construção da automação e monitoramento da estufa. Para cada componente do hardware é apresentado uma breve explicação do funcionamento, suas características, sua função que desempenha no sistema e onde é fixado no protótipo. Por fim, é mostrado o diagrama do circuito projetado, ou seja, como são realizadas as conexões dos sensores e atuadores com o microcontrolador (ESP32).

### 4.1 REQUISITOS DO HARDWARE DA ESTUFA

As variáveis mais importantes para o monitoramento na agricultura são a temperatura do solo e do ambiente, umidade do ar e do solo, concentração de dióxido de carbono, luminosidade, (BERSANI et al., 2022) condutividade elétrica aparente do solo, matéria orgânica do solo, pH (BENHOSSI; REYNALDO; MACHADO, 2021). Assim, para o escopo deste projeto as variáveis do ambiente para serem monitoradas são a temperatura, umidade e luminosidade e para o solo a temperatura e umidade. Além disso, para obter uma maior precisão na quantidade de água disponível para o sistema o nível do reservatório é medido.

### 4.2 SENSOR DE UMIDADE E TEMPERATURA DO AR (DHT11)

Para o requisito do sistema de monitoramento da temperatura e umidade da estufa é utilizado o sensor DHT11<sup>1</sup> que é comumente utilizado para este tipo de aplicação e um sensor de baixo custo, ideal para prototipação e testes de sistemas.

O sensor digital de temperatura e umidade DHT11<sup>2</sup> é um dispositivo composto que fornece um sinal digital para ambos os parâmetros, em um único pino de dados. Este sensor inclui componentes sensíveis à umidade resistiva e dispositivos de medição de temperatura (NTC, do inglês *negative temperature coefficient*), onde a resistência diminui com um aumento na temperatura.

As características do sensor DHT11 são:

- Resolução de umidade relativa de 16 bits;
- Repetibilidade de  $\pm 1\%$  de umidade relativa;
- Precisão de  $\pm 5\%$  para umidade relativa a  $25^{\circ}\text{C}$ ;
- Tempo de resposta de 6 segundos para detectar a variação da umidade relativa do ar;
- Histerese de  $<\pm 0,3\%$  de umidade relativa;

<sup>1</sup> <[https://d229kd5ey79jzj.cloudfront.net/791/Datasheet\\_DHT11.pdf](https://d229kd5ey79jzj.cloudfront.net/791/Datasheet_DHT11.pdf)>

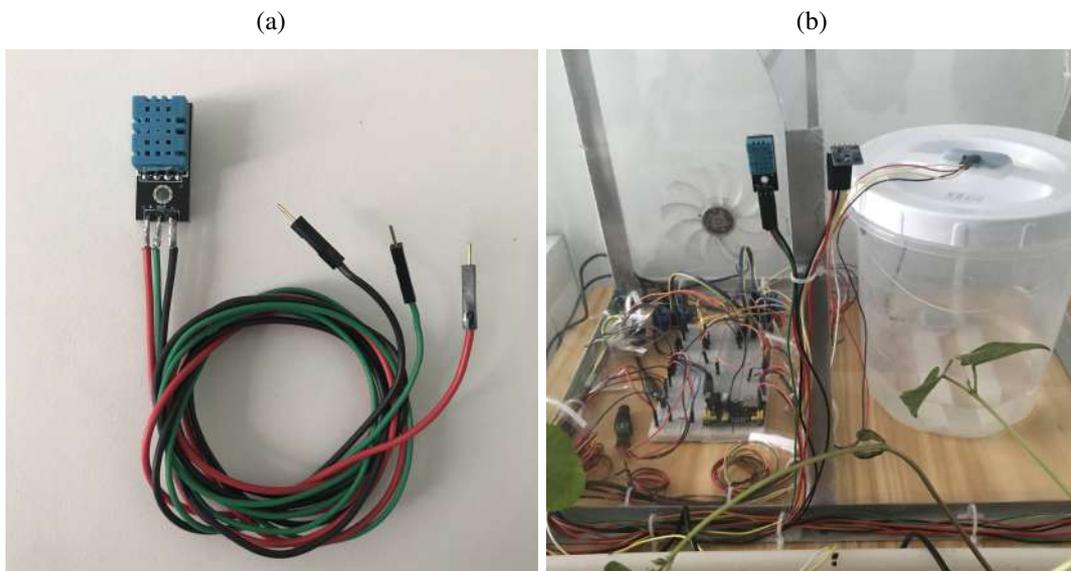
<sup>2</sup> <[https://d229kd5ey79jzj.cloudfront.net/791/Datasheet\\_DHT11.pdf](https://d229kd5ey79jzj.cloudfront.net/791/Datasheet_DHT11.pdf)>

- Resolução de temperatura de 16 bits;
- Repetibilidade de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$  para a temperatura;
- Precisão de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  na medição da temperatura a  $25^{\circ}\text{C}$ ;
- Tempo de resposta de 10s para a detectar a variação da temperatura do ar;
- Tensão de alimentação de 3,5 a 5 V;
- Corrente de alimentação na medição de 0.3 mA e em espera de 60  $\mu\text{A}$ .

Além disso, de acordo com o fabricante em (AOSONG, 2023), é recomendado a utilização de um resistor *pull-up* para o pino de dados da comunicação 1-wire. No entanto, para este projeto, é utilizado um módulo do sensor DHT11, como pode ver na Figura 16a, e seu circuito já possui os resistores necessários que desempenham o papel do resistor de *pull-up*. Portanto, assim basta conectar diretamente ao pino do microcontrolador.

Nesse contexto, o sensor DHT11 é utilizado para o monitoramento da umidade e temperatura do ar dentro da estufa. Dado que a conexão com a fonte de energia e a transmissão de dados para o ESP32 na parte dos componentes da estufa é distante, fios foram soldados ao sensor, conforme ilustrado na Figura 16a. A fixação do sensor na estrutura da estufa é realizada utilizando uma fita dupla face e posicionando-o na região central da área de cultivo, como pode ser observado na Figura 16b.

Figura 16 – Imagens do sensor de umidade e temperatura do ar: (a) com o fio soldado e (b) em funcionamento na estufa.



Fonte: Autoria própria.

Para reunir os materiais essenciais na montagem do circuito do sensor, é necessário a instalação da biblioteca na IDE e efetuar a leitura dos dados de temperatura e umidade com o microcontrolador<sup>3</sup>.

### 4.3 SENSOR DE UMIDADE DO SOLO RESISTIVO

Para o requisito do sistema em medir a umidade do solo neste projeto é utilizado um sensor de umidade do solo resistivo<sup>4</sup> que é um sensor de baixo custo e muito utilizado para a finalidade de testes. O sensor possui duas partes (Figura 17):

- Sonda;
- Módulo eletrônico.

A sonda, em forma de garfo, possui dois condutores expostos que são inseridos no solo onde desejamos medir o teor de umidade. O módulo eletrônico, por sua vez, conecta-se à sonda e ao microcontrolador, gerando uma tensão de saída com base na resistência da sonda. Esta tensão está disponível em um pino de Saída Analógica (AO, do inglês *analog output*) do módulo.

O princípio de funcionamento desse equipamento baseia-se na aplicação de uma corrente elétrica nos eletrodos presentes nas hastes da sonda do sensor. Esta corrente elétrica flui através do solo, dependendo da sua resistência elétrica que varia diretamente com a presença ou ausência de água. Dessa forma, em solo úmido, a condutividade é maior, resultando em baixa resistência e maior capacidade de fluxo de corrente entre os eletrodos. Em contraste, com o solo seco, a presença de água é reduzida ou quase nula, o que resulta em uma condutividade inferior, alta resistência e consequentemente o fluxo de corrente elétrica é reduzido ou ausente entre os eletrodos (Danilo Almeida, 2017).

Devido ao uso da saída analógica do sensor, é necessário utilizar a entrada analógica do ESP32 que possui um conversor analógico-digital (ADC, do inglês *analog-to-digital*) com resolução de 12 bits. Neste caso, o valor máximo convertido corresponde a 4095 (equivalente a 3,3 V), representando a menor condutividade do solo mensurável, sendo definido como 0% de umidade do solo. Por outro lado, o valor mínimo convertido é 0 (correspondente a 0 V), o que representa a maior condutividade do solo possível de ser medida e é definido como 100% de umidade para o solo (ElectronicWings, 2023). A conversão desse intervalo de valores, de 0 a 4096 para 100% e 0% é realizada por meio da função `map()` do Arduino (Arduino, 2023b).

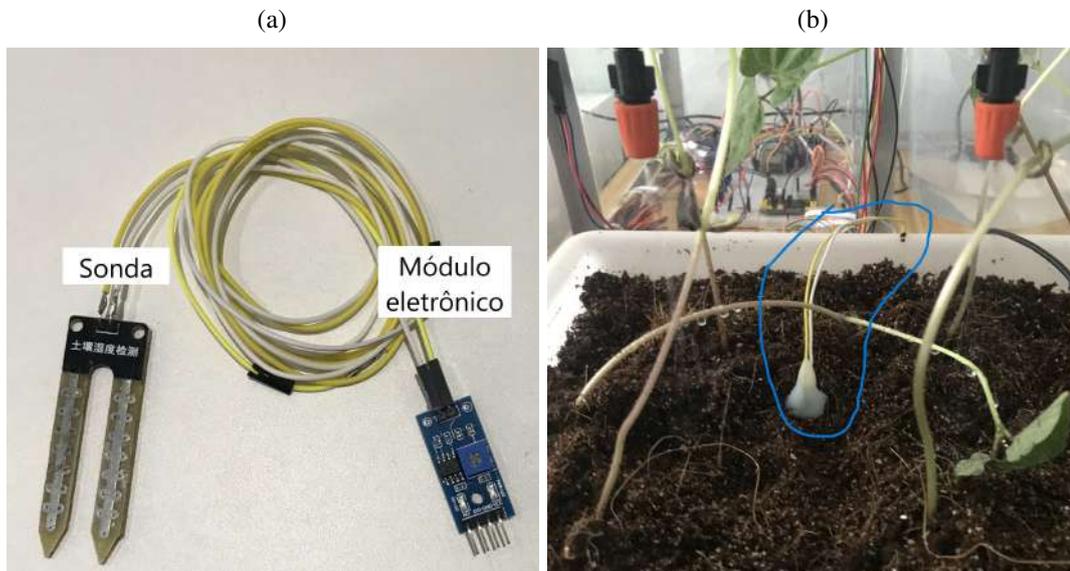
No desenvolvimento do código de teste e programação do microcontrolador para realizar as primeiras leituras da umidade do solo em porcentagem, utilizou-se como base o código de ElectronicWings (2023) como ponto de partida. A fim de estender a conexão da sonda elétrica

<sup>3</sup> <<https://www.blogdarobotica.com/2020/08/11/monitor-de-temperatura-e-umidade-com-nodemcu-esp8266-como-servidor-web/>>

<sup>4</sup> <[https://curtocircuito.com.br/datasheet/sensor/umidade\\_do\\_solo.pdf](https://curtocircuito.com.br/datasheet/sensor/umidade_do_solo.pdf)>

com o módulo eletrônico, é soldado fios, como demonstrado na Figura 17a. Além disso, para aumentar sua proteção contra a água durante seu uso no solo, é aplicada uma camada de cola quente na conexão exposta da sonda, como pode ser observado na Figura 17b.

Figura 17 – Imagens do sensor de umidade do solo: (a) com o fio soldado e (b) em funcionamento na estufa.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.4 SENSOR DE TEMPERATURA DO SOLO (DS18B20)

A fim de atender o requisito do sistema em medir a temperatura do solo é utilizado o sensor DS18B20<sup>5</sup> que além de realizar a medição possui vedação e proteção contra água e corrosão, devido a esta característica este sensor foi escolhido para ser utilizado na medição da umidade do solo.

O DS18B20 é um termômetro digital que promove leituras de temperatura configuráveis de 9 a 12 bits, que indicam a temperatura do dispositivo. Ele possui uma interface 1-Wire, que permite a comunicação com o sensor usando apenas um único pino de comunicação com o microprocessador. Além disso, é possível conectar vários sensores no mesmo barramento 1-Wire, por causa do seu número de série único em silício. Essa característica simplifica a integração do DS18B20 com o microcontrolador e a capacidade de expansão da quantidade de sensores em um projeto de monitoramento de temperatura.

As características deste sensor DS18B20 de acordo com (Dallas Semiconductor, 2019) são:

- Pode ser alimentado pela linha de dados, o que possibilita utilizar apenas o pino de dado e o GND;

<sup>5</sup> <<https://image.dfrobot.com/image/data/DFR0198/DS18B20.pdf>>

- Faixa de alimentação de 3,0V a 5,5V, no qual torna compatível com diferentes sistemas e placas de desenvolvimento;
- Não requer alimentação no modo de espera, assim diminuindo o consumo de energia;
- Mede temperaturas de -55°C a +125°C (equivalente a -67°F a +257°F), desse modo possui uma ampla faixa de medição;
- Precisão de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  na faixa de -10°C a +85°C, permitindo uma maior precisão em uma faixa ampla;
- Resolução do termômetro programável de 9 a 12 bits, possibilitando a configuração de acordo com o nível do projeto;
- Converte temperatura de 12 bits para digital em até 750 ms (máximo), garantindo leituras rápidas e eficientes.

Além das características, seu fabricante recomenda a utilização de um resistor *pull-up* de 4,7 K $\Omega$  em seu pino de dados, para garantir estabilidade e precisão no sistema de comunicação 1-wire, principalmente nos casos de possuir mais de um sensor no mesmo barramento de dados. Sem esse resistor, a linha de dados poderia flutuar e causar problemas de estabilidade na comunicação.

Dessa forma, o sensor DS18B20 é utilizado na estufa para monitorar a temperatura do solo no ambiente de crescimento da planta. Como seu modelo com um fio extenso (Figura 18a) elimina a necessidade de soldar fios adicionais para conectar-lo ao microcontrolador. Além disso, o sensor possui um revestimento por um material à prova d'água e sua extremidade é encapsulada em aço inoxidável, o que torna-o ideal para a seu funcionamento no solo. Na Figura 18b é possível visualizar o sensor em funcionamento.

De acordo com o tutorial<sup>6</sup> é considerado os materiais necessários e as bibliotecas a serem instaladas na IDE para a leitura da temperatura com o DS18B20 a partir do ESP32.

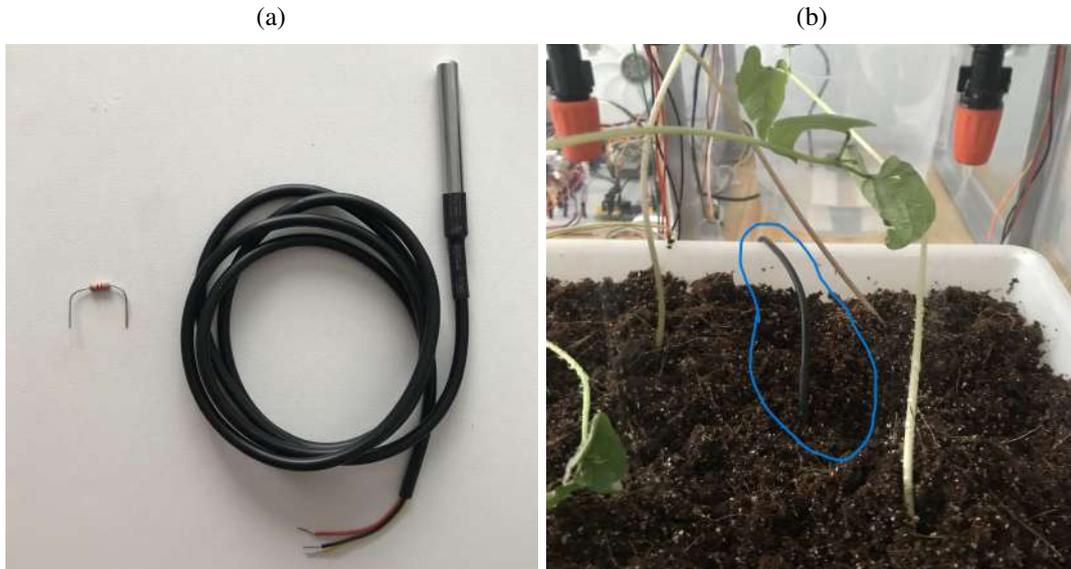
#### 4.5 SENSOR DE LUMINOSIDADE (BH1750FVI)

No monitoramento da luminosidade do ambiente é utilizado o sensor BH1750<sup>7</sup> que fornece as medições de luminosidade em lux e é de baixo custo, assim atende a necessidade de monitorar a quantidade de luz que a planta recebe. Este sensor é um dispositivo de 16 bits de resolução da medição e opera com o protocolo I2C (Texas Instruments, 2015). Esse sensor é capaz de medir valores de luminosidade com um mínimo de 1 lux e um máximo de 65535 lux.

<sup>6</sup> <<https://medium.com/@automacaoem5minutos/guia-r%C3%A1pido-16-utilizando-sensor-de-temperatura-ds18b20-com-esp8266-nodemcu-403c74a6238f>>

<sup>7</sup> <<https://d26lpennugtm8s.cloudfront.net/stores/198/075/rte/Datasheet-BH1750FVI.pdf>>

Figura 18 – Imagens do sensor de temperatura do solo: (a) DS18B20 e (b) em funcionamento na estufa.



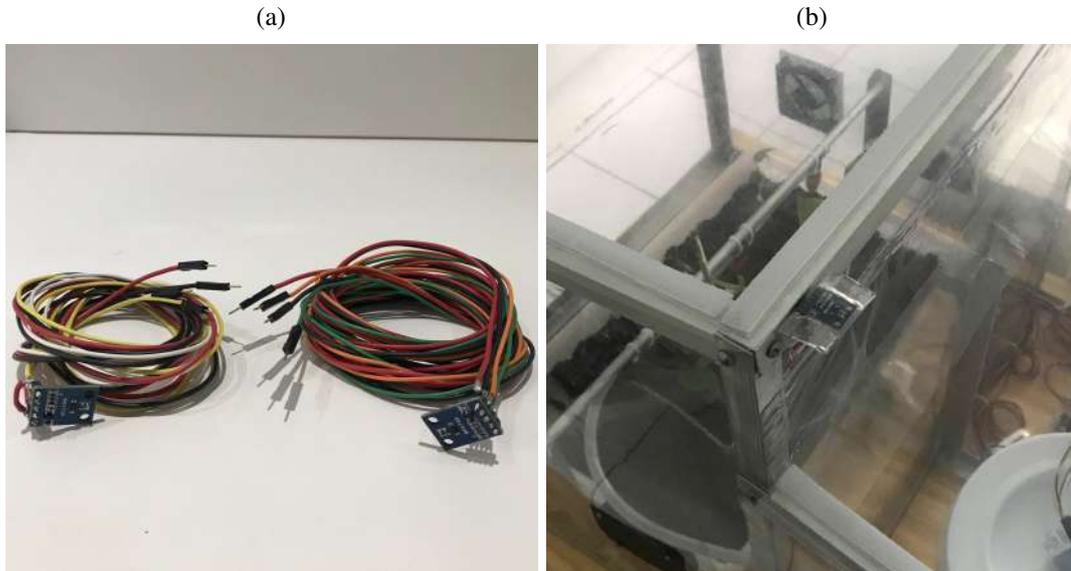
Fonte: Autoria própria.

Outras características interessantes do sensor para o seu funcionamento no projeto são (Rohm Semiconductor, 2010):

- **Conversor de Iluminância para Digital:** converte as leituras de iluminância em valores digitais na qual é processado pelo ESP32;
- **Seleção de Dois Endereços I2C Diferentes:** é possível configurar dois endereços I2C (VCC e GND) diferentes para o sensor, permitindo a conexão de dois sensores ao mesmo canal I2C;
- **Variação nas Medições (+/- 20%):** as medições possuem uma margem de erro de 20%;
- **Modo de Medição Contínua:** suporta o modo de medição contínua, no qual ele faz medições contínuas da luz ambiente;
- **Modo de Medição Única Vez:** também suporta o modo de medição única vez, no qual ele faz uma única medição e depois entra em modo de economia de energia.

Desse modo, a medição da luminosidade do ambiente na estufa é realizada pelo sensor BH1750 e para permitir sua conexão à área dos componentes e ao ESP32 é soldado fios aos seus terminais de ligação, como mostrado na Figura 19a. A fim de monitorar a intensidade luminosa tanto dentro quanto fora da estufa, é fixado dois sensores, um no interior (Figura 16b) e outro no exterior (Figura 19b). Além disso, o sensor externo é importante para obter a intensidade luminosa externa, sem ser afetado pela iluminação artificial no interior da estufa.

Figura 19 – Imagens do sensor de luminosidade BH1750FVI: (a) com extensão de fios, e (b) o sensor fixado no exterior da estufa.



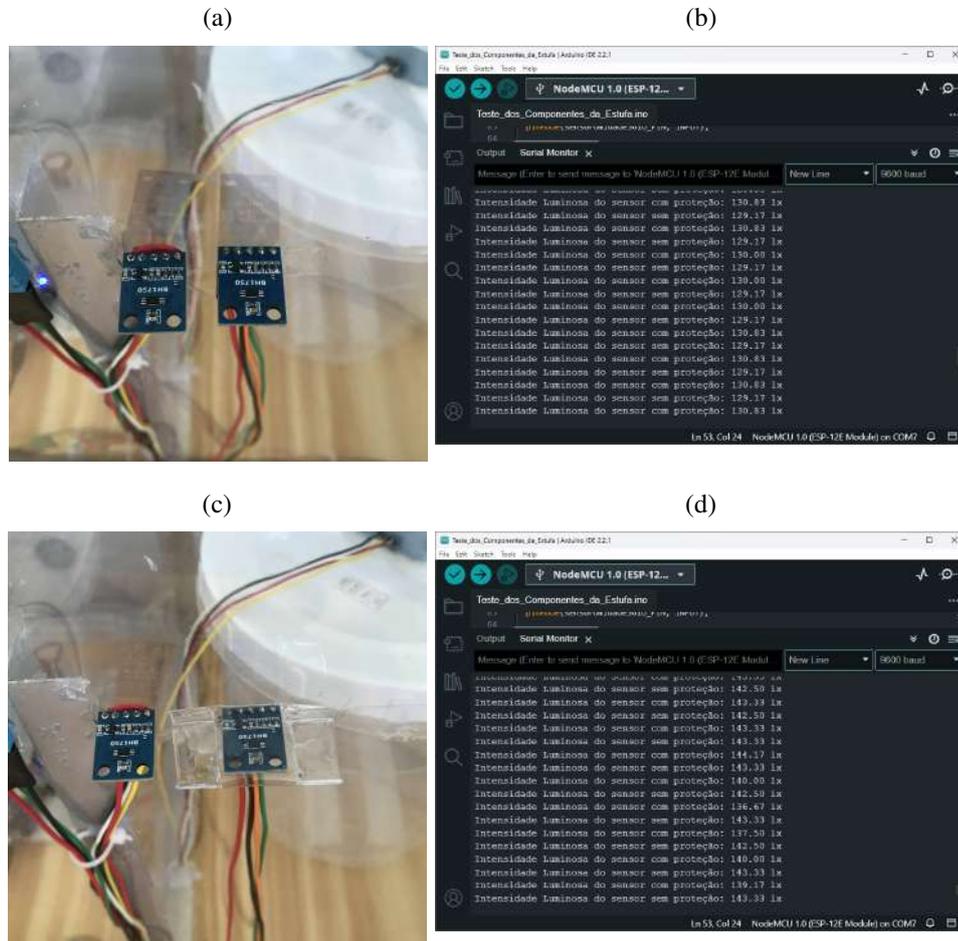
Fonte: Autoria própria.

Uma vez que o ESP32 possui apenas um canal de comunicação I2C, é necessário utilizar dois sensores em um único canal. Para isso, o sensor possui um terminal ADD que permite o endereçamento do sensor e para configurar endereços diferentes, é necessário ligar o pino ADD no VCC e o endereço se torna 0x5C e outro em GND com endereço 0x23, obtendo assim endereços distintos. E na configuração do código ao inicializar o sensor basta passar o valor do endereço como parâmetro da função. Assim, o sensor externo utiliza o endereço GND, enquanto que o sensor interno utiliza o valor do endereço VCC.

O sensor externo como visto na Figura 19b é protegido contra a exposição à água por meio do plástico flexível e vedado com fita dupla face. A fim de avaliar o desempenho na medição de luminosidade do sensor externo com proteção, é realizado dois testes comparativos. No primeiro teste, ambos os sensores foram posicionados lado a lado, sob as mesmas condições de luminosidade, e mantidos sem qualquer tipo de proteção, como demonstrado na Figura 20a. Os dados obtidos para a luminosidade do ambiente é mostrado na serial da IDE do Arduino, como pode ver na Figura 20b. No segundo teste, a proteção de plástico é aplicada ao sensor externo, seguindo o mesmo procedimento de exposição, sob condições idêntica, conforme a Figura 20c. Os dados obtidos no segundo teste estão apresentados na Figura 20d.

Então com base na análise comparativa dos resultados nos dois testes, é possível concluir que existe pouca influência da proteção de plástico transparente. Embora exista uma diferença entre as medições dos dois testes, essa diferença permanece dentro da margem de erro especificada pelo fabricante que é de +- 20% (Rohm Semiconductor, 2010). Portanto, a proteção aplicada não compromete significativamente o desempenho do sensor em termos de medição de luminosidade ambiente.

Figura 20 – Imagens dos dois testes da influência da proteção no sensor de iluminância: (a) primeiro teste com os dois sensores sem proteção, (b) valores medidos para a luminosidade do ambiente no primeiro teste, (c) segundo teste com apenas um sensor com proteção e (d) valores medidos para a luminosidade do ambiente no segundo teste.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.6 SENSOR ULTRASSÔNICO (HC-SR04)

O sensor ultrassônico é utilizado para medir distâncias entre o objeto e o sensor, assim neste projeto é utilizado para medir a distância entre o nível de água no reservatório e o sensor. Com o objetivo de realizar a medição do nível de água no reservatório de forma contínua e precisa, além de evitar a utilização de vários sensores de boia ao longo do reservatório para reduzir os custos.

O funcionamento do sensor HC-SR04<sup>8</sup> baseia-se no princípio de ultrassom. Basicamente, ele emite um pulso ultrassônico, que está fora da faixa de frequência audível pelo ser humano (cerca de 40KHz). Esse pulso é transmitido pelo sensor e quando atinge um objeto ele é refletido de volta para o sensor. A distância até o objeto é calculada medindo o tempo decorrido entre

<sup>8</sup> <<https://d26lpennugtm8s.cloudfront.net/stores/198/075/rte/Datasheet-BH1750FVI.pdf>>

o momento em que o pulso é emitido e o momento em que o eco é recebido. Esse processo é semelhante à ecolocalização usada por morcegos e golfinhos para encontrar objetos no escuro e debaixo d'água (Flávio Babos, 2023).

O sensor HC-SR04 é construído com elementos piezoelétricos, que são cristais sensíveis a pressão e vibração. Quando uma energia elétrica é aplicada a esses cristais, eles oscilam em altas frequências. Quando uma onda ultrassônica atinge a superfície do sensor, ela causa uma mudança na pressão, fazendo com que os cristais gerem um sinal elétrico em resposta (Handson Technology, 2023).

E para sua fixação é realizado furos na tampa do reservatório e revestido por cola quente para proteger da água, como pode ver nas Figuras 21a e 21b. E na Figura 21c é possível ver a sua utilização no sistema, bem como os fios que foram soldados aos seus terminais para energizar e conectar os pinos de trigger e echo do sensor ao microcontrolador.

O primeiro código para teste de funcionamento do sensor na medição de distância é baseado no exemplo do código (Handson Technology, 2023). E para o cálculo da porcentagem do nível do reservatório é baseado em (Porto Seguro IoT, 2023), que consiste em dividir a altura do nível de água pela altura máxima que o reservatório suporta, e em (4.1), que é utilizada para este cálculo, na qual seus parâmetros estão exemplificados na Figura 22 e são definidos como:

- $DT$  = Distância entre o sensor e o limite inferior do reservatório;
- $DS$  = Distância entre o sensor e o nível máximo do reservatório;
- $DA$  = Distância entre o sensor e o nível da água;
- $NA$  = Nível de água presente no reservatório em porcentagem.

$$NA = \frac{DT - DA}{DT - DS} \times 100. \quad (4.1)$$

#### 4.7 FITA LED ENDEREÇÁVEL (WS2812B)

Para situações na qual a planta necessita de mais iluminação do que a iluminação natural, é interessante que o sistema possua algum tipo de iluminação artificial e para isto é utilizado a luz de LED WS2812B. Além disso, esta luz pode ser ligada em diferentes cores possibilitando ao sistema a realização de testes do desenvolvimento da planta estimulada por cores diferentes. Porém para o escopo deste projeto é utilizado apenas a cor branca como uma iluminação artificial.

A fita LED utilizada neste projeto possui 1 metro de comprimento com 60 LEDs RGB do tipo WS2812B<sup>9</sup>. Cada um desses LEDs é, na verdade, uma combinação de LEDs de três

<sup>9</sup> <<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812.pdf>>

Figura 21 – Imagens do sensor ultrassônico (HC-SR04): (a) com extensão de fios, (b) sensor fixado no interior da estufa e (b) o sensor fixado no exterior da estufa.

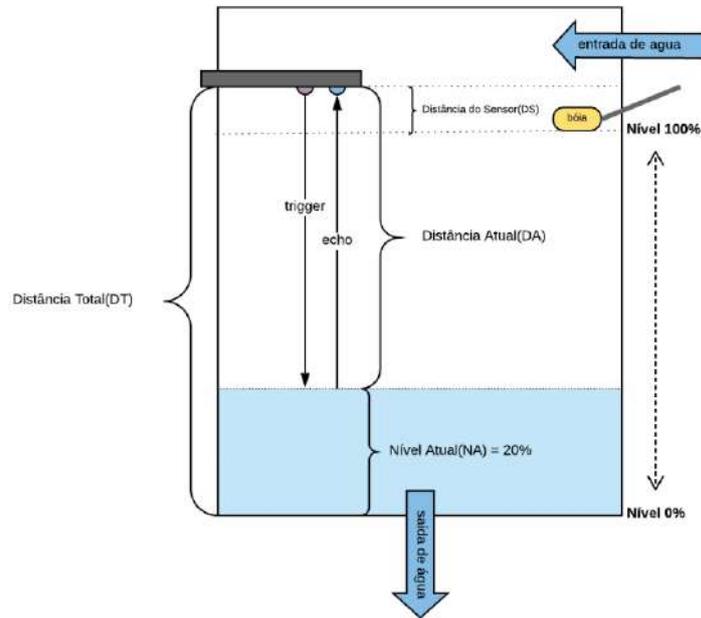


Fonte: Autoria própria.

cores distinta: vermelho, verde e azul; em um único encapsulamento. A intensidade luminosa de cada cor pode ser controlada individualmente, permitindo a combinação delas para formar a cor desejada. Além disso esta fita de LED possui um microcontrolador em seu encapsulamento o qual utiliza um protocolo de comunicação serial conhecido como *non-return-to-zero* (NRZ), que é transmitido através de apenas um fio (Electronic Design, 2017). Assim, cada LED possui dois pinos específicos para essa comunicação: um para entrada de dados e outro para saída. O pino de entrada recebe os dados e controla o acendimento do LED de acordo com as instruções recebidas. E o pino de saída, por sua vez, repassa esses dados para o próximo LED na sequência, permitindo um controle individual de cada LED ao longo da fita (RoboCore, 2023).

Na Figura 23a é apresentada a fita LED utilizada a qual possui uma proteção de plástico,

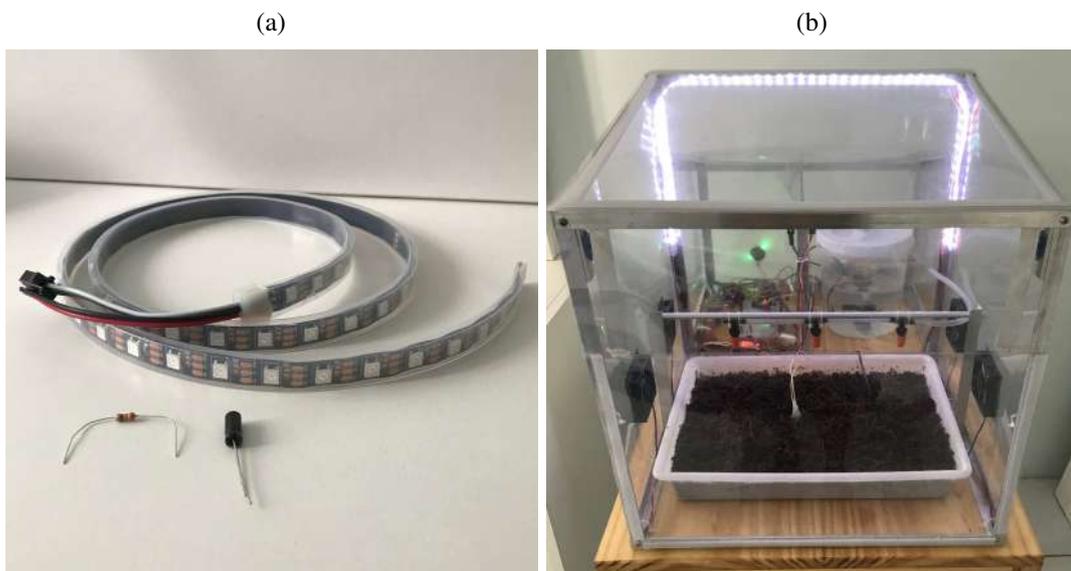
Figura 22 – Representação dos parâmetros para o cálculo do nível do reservatório.



Fonte: Porto Seguro IoT (2023).

proporcionando resistência à água. E na Figura 23b é mostrado onde é fixado a fita LED na estrutura da estufa e o seu funcionamento com todos os LEDs emitindo luz branca.

Figura 23 – Imagens da fita LED endereçável WS2812B : (a) com proteção à prova d'água, (b) funcionamento na estufa com iluminação branca.



Fonte: Autoria própria.

## 4.8 SERVO MOTOR

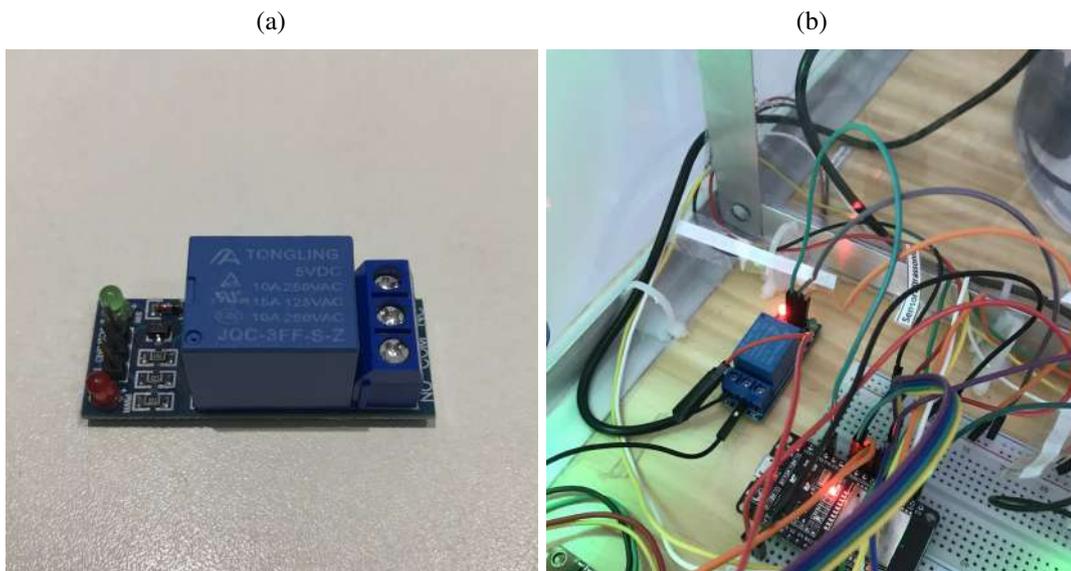
Neste projeto, o servo utilizado é do modelo *Tower Micro Servo SG90* (Figura 14d) que possui rotação do eixo variando entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$  (Luxorparts, 2017). Sua utilização é no mecanismo de abertura frontal da estufa e sua fixação é descrita na Seção 3.2.4.

O servo motor<sup>10</sup> é um dispositivo eletromecânico controlado por um sinal de modulação de largura de pulso (PWM, do inglês *pulse width modulation*) que possui rotação variável de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  ou  $360^\circ$  (a depender do modelo utilizado) e contém três componentes: atuador, potenciômetro e controlador. O atuador é um conjunto de engrenagens acopladas a um motor que proporciona torque e velocidade ao mecanismo. Já o potenciômetro é conectado ao eixo do motor e fornece a informação da posição atual a partir da variação do valor da resistência elétrica. E o controlador é responsável ajustar a posição do servo motor a partir da interpretação da posição atual e comparar com os sinais de controle que recebe do microcontrolador, geralmente na forma de sinais PWM (Equipe Embarcados, 2023).

## 4.9 MODULO RELÉ

Para o controle da bomba d'água é utilizado um módulo relé de 5V, especificamente o modelo JQC-3FF-S-Z<sup>11</sup>, como mostrado na Figura 24a e 24b. Embora o módulo seja projetado para operar em 5V, também é possível alimentá-lo em 3.3V e esta alimentação é utilizada quando se utiliza o microcontrolado ESP32, uma vez que a tensão de operação é de 3.3V.

Figura 24 – Imagens do módulo relé: (a) modelo 5V JQC-3FF-S-Z, (b) módulo em funcionamento no circuito.



Fonte: Autoria própria.

<sup>10</sup> <[https://www.kjell.com/globalassets/mediaassets/701916\\_87897\\_datasheet\\_en.pdf?ref=4287817A7A](https://www.kjell.com/globalassets/mediaassets/701916_87897_datasheet_en.pdf?ref=4287817A7A)>

<sup>11</sup> <<https://www.makerhero.com/img/files/download/JQC-3FF-S-Z-Datasheet.pdf>>

#### 4.10 BOMBA D'ÁGUA

Para o bombeamento da água do reservatório para a plantação é utilizado uma bomba de aquário de 5 volts e pode ser visualizado na Figura 25. A fim de evitar o seu funcionamento em vazio, ou seja, com o nível de água abaixo do necessário para seu funcionamento, é implementado na lógica de controle da bomba submersa um limite mínimo de água no reservatório que deve ter para o acionamento da bomba d'água.

Figura 25 – Bomba de aquário no reservatório.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.11 PONTE H (L298N)

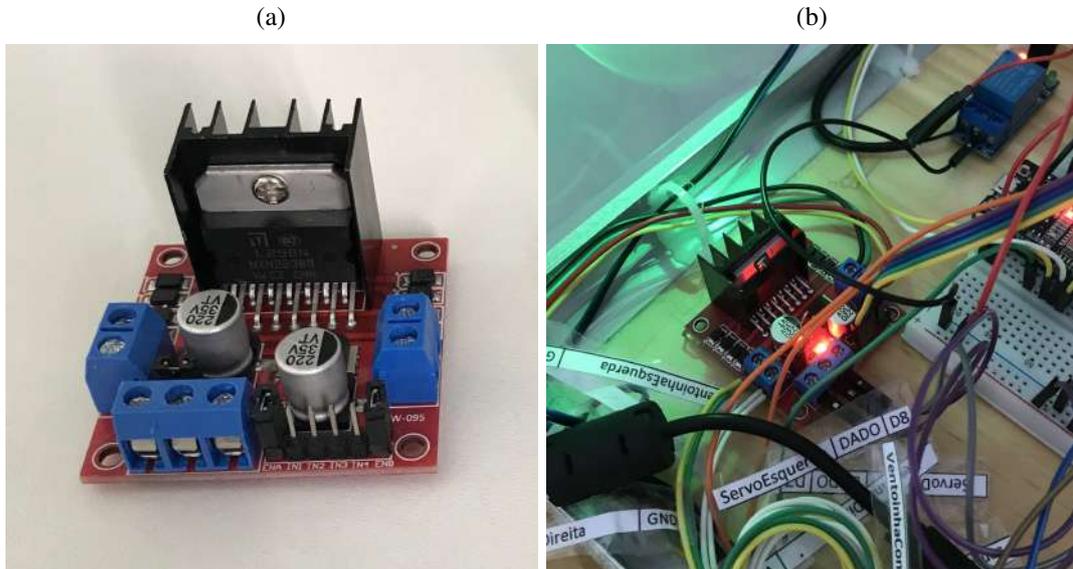
Neste projeto a ponte H (Figura 26b) é utilizada para o controle de acionamento das ventoinhas e possui um chip L298<sup>12</sup> (Figura 26a), este componente é usado em aplicações com motores para controlar sua direção de rotação. Ela funciona alternando o sentido da corrente, permitindo que o motor gire em ambas as direções. Porém para este projeto as ventoinhas ligam apenas em uma direção por limitação própria e o único componente disponível no laboratório de desenvolvimento é a ponte H, assim não foi utilizado um módulo relé para esta aplicação.

#### 4.12 VENTOINHA (COOLER)

Ventoinhas de 5 volts são utilizadas na estufa para promover a circulação do ar dentro da estufa e redução da temperatura do ambiente para as plantas. Então é colocado quatro ventoinhas (Figura 27a) na área da plantação como mostrado na Figura 13 e uma ventoinha maior (Figura 27b) na área dos componentes eletrônicos como mostrado na Figura 32 para dissipar o calor gerado pelos dispositivos eletrônicos.

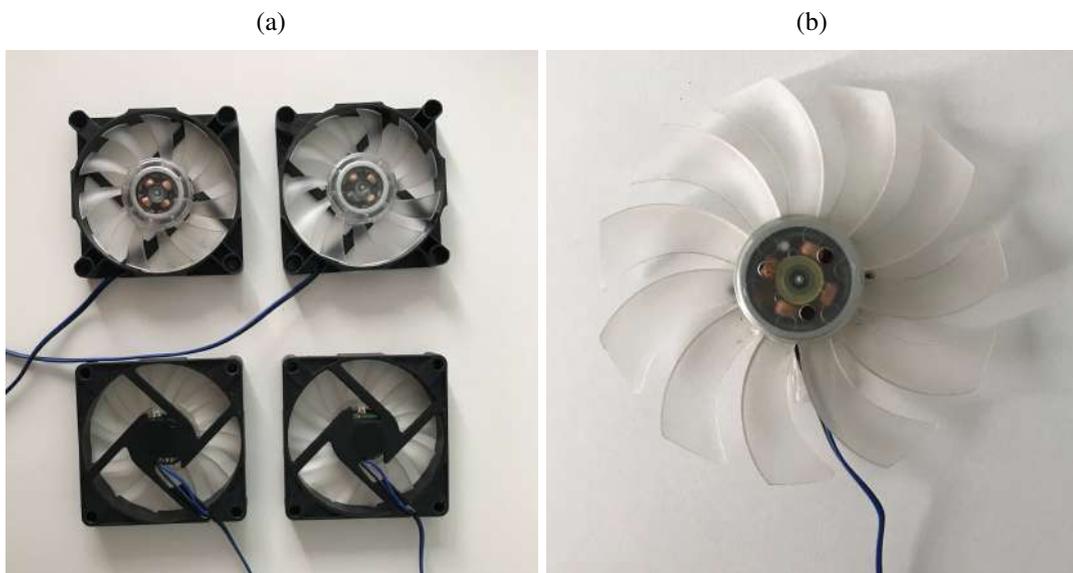
<sup>12</sup> <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf>>

Figura 26 – Imagens da ponte H: (a) do módulo L298N, (b) um módulo das ventoinhas e outro módulo da bomba d’água.



Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Imagens das ventoinhas: (a) para a área da plantação, (b) para a área dos componentes eletrônicos.



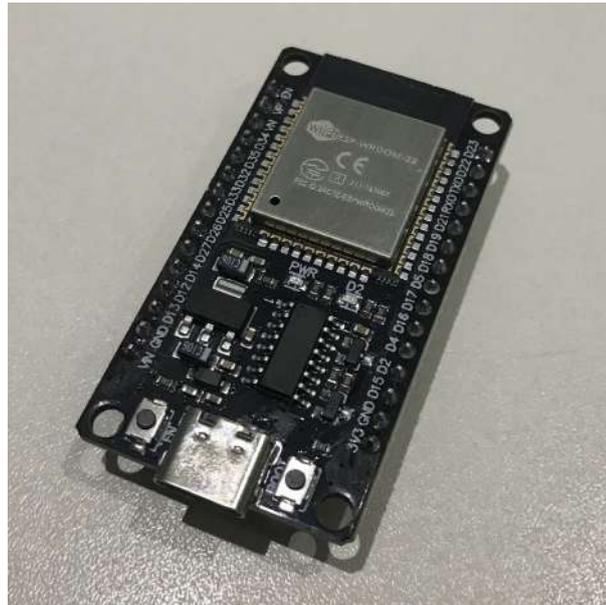
Fonte: Autoria própria.

#### 4.13 MICROCONTROLADOR: ESP32

O ESP32 é um microcontrolador muito utilizado para o desenvolvimento de aplicações de IoT devido ao seu processador dual-core, conectividade Wi-Fi e Bluetooth integrada, além de um grande número de pinos de entrada/saída de propósito geral (GPIO, do inglês *general purpose input/output*) e baixo consumo de energia. Esses pinos suportam diversas interfaces, como SPI,

I2C, UART e PWM. Além disso, o ESP32 pode ser programado usando várias estruturas de desenvolvimento e linguagens. A linguagem de programação mais comumente usada é o C++, e é possível programá-lo usando o Arduino IDE ou o PlatformIO (HERCOG et al., 2023). Existem várias placas de desenvolvimento que possuem ESP32 e para este projeto é utilizado o módulo ESP32-WROOM-32<sup>13</sup> com 30 pinos, como mostrado na Figura 28.

Figura 28 – ESP-WROOM-32 de 30 pinos.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.14 FONTE DE ENERGIA

No projeto, é utilizada uma fonte de alimentação (Figura 29a) com entrada de corrente alternada (110V/220V) e saída de corrente contínua (5V) com capacidade de corrente de até 6A. Na saída da fonte possui um conector DC P4 que para conectar ao circuito é utilizado um adaptador como mostrado na Figura 29b.

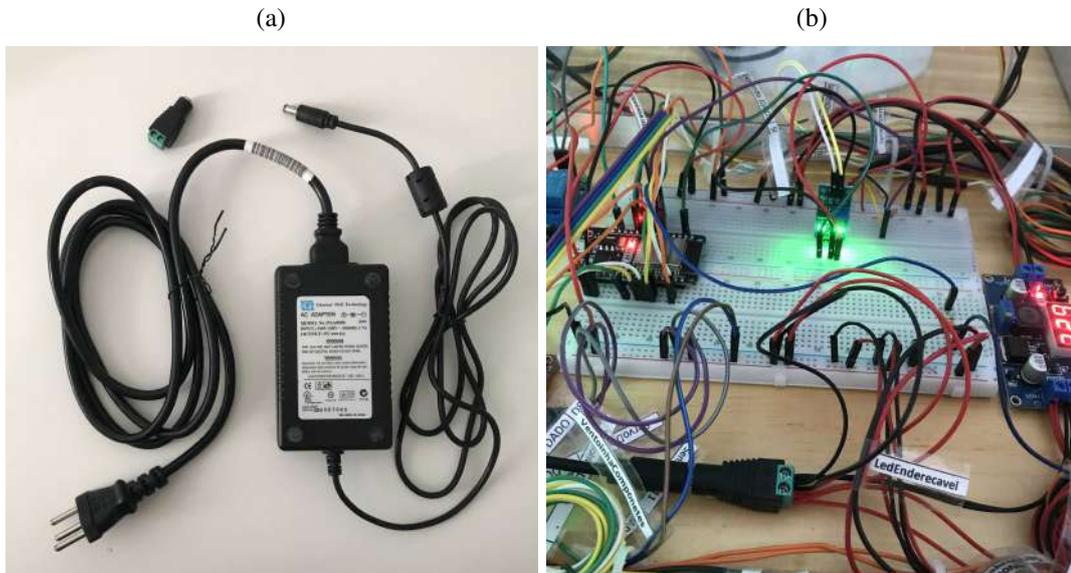
Esta fonte é utilizada para alimentar diretamente os componentes de 5V do sistema como a ponte H para ligar as ventoinhas da plantação, a ventoinha dos componentes eletrônicos, os servos motores, a fita LED e a bomba d'água.

#### 4.15 MÓDULO REGULADOR DE TENSÃO (LM2596)

Tanto os sensores quanto o ESP32 têm a capacidade de operar com alimentação de 5V ou 3.3V. Entretanto, para garantir a proteção dos pinos de dados do ESP32, que são sensíveis a tensões acima de 3.3V, os sensores são alimentados com 3.3V a fim de evitar tensões elevadas no recebimento dos dados dos sensores e não danificar o pino do microcontrolador. Para atender

<sup>13</sup> <[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf)>

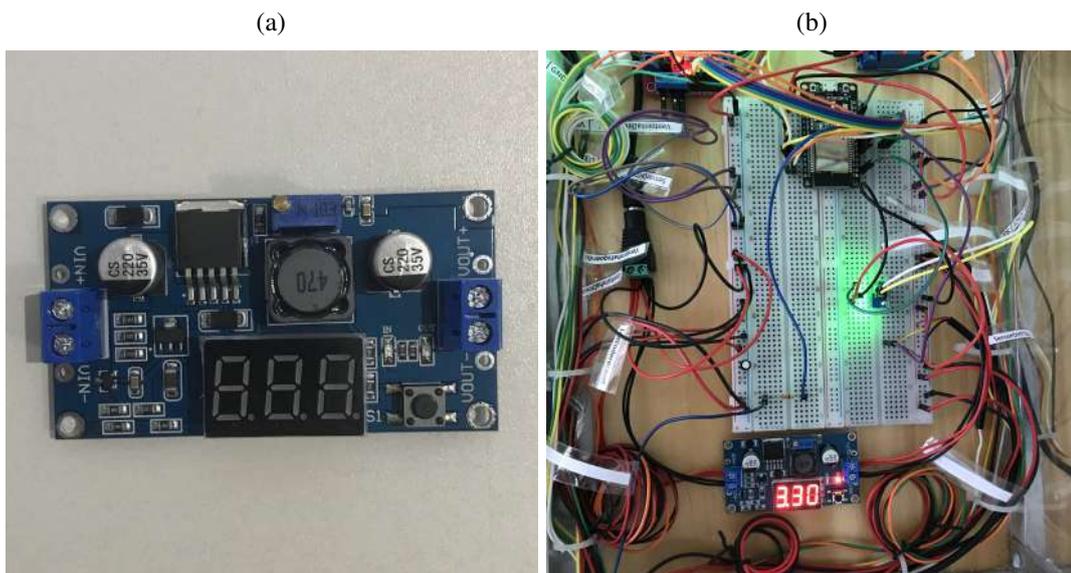
Figura 29 – Fonte de alimentação: (a) DC de 5V, (b) adaptador P4 para a fonte.



Fonte: Autoria própria.

a essa exigência e utilizar a fonte de alimentação AC-DC de 5V, é utilizado o módulo regulador de tensão DC-DC LM2596<sup>14</sup> (Figura 30a). Esse regulador de tensão tem a função de reduzir a tensão de 5V para 3.3V (Figura 30b) e alimentar os componentes como o sensor de umidade do solo, DHT11, DS18B20, BH1750FVI, HC-SR04 e o ESP32.

Figura 30 – Regulador de tensão LM2596: (a) módulo com voltímetro, (b) em funcionamento no circuito (de 5V para 3.3V).



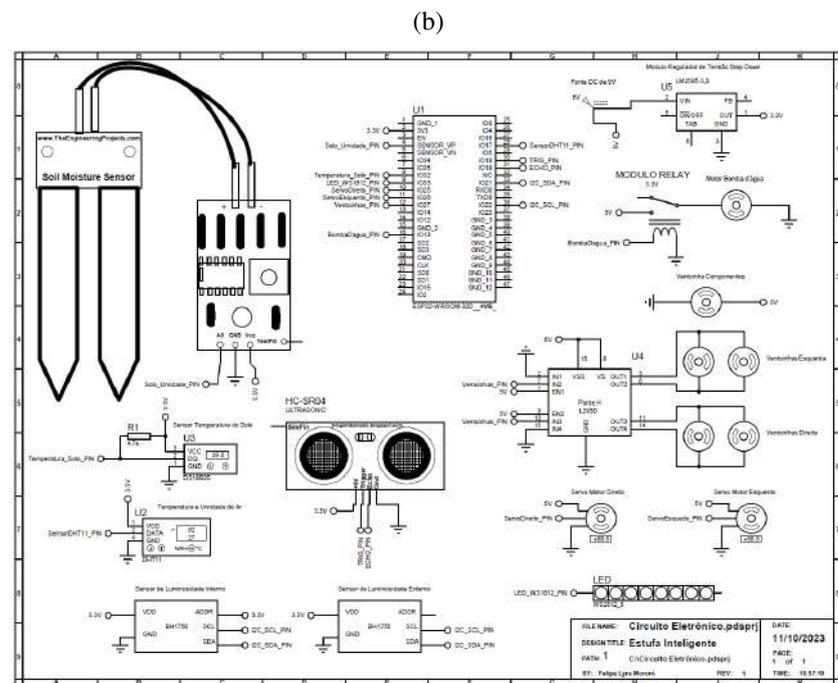
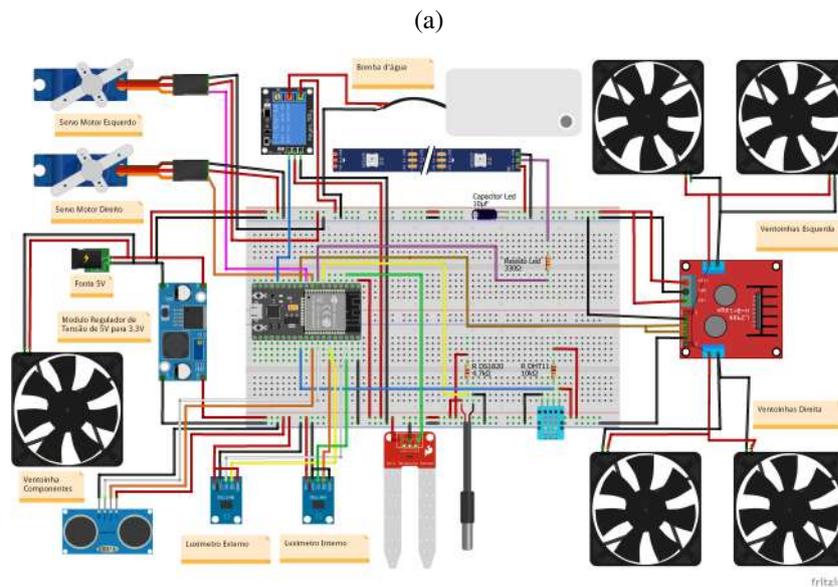
Fonte: Autoria própria.

<sup>14</sup> <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf?ts=1699440715021>>

### 4.16 CIRCUITO ELETRÔNICO

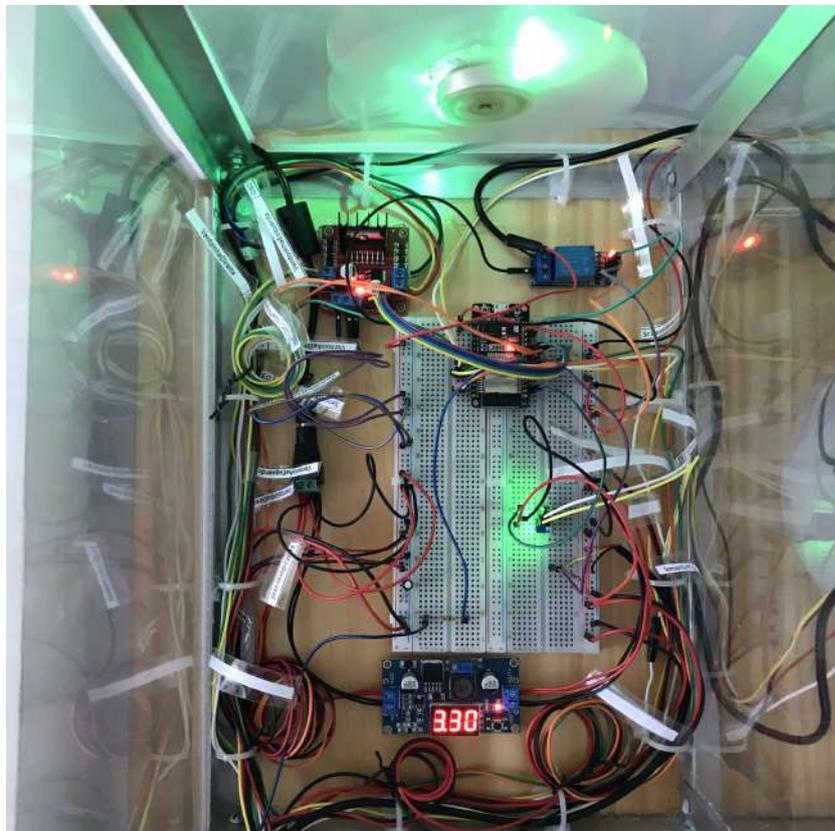
Após o desenvolvimento e aprendizado das ligações de cada sensor e atuador com o microcontrolador, o circuito completo é montado de acordo com o esquemático detalhado na Figura 31a e 31b, que é criado com o auxílio do software Fritzing (Fritzing, 2023), e a montagem na estufa do circuito é realizada com auxílio de duas protoboard, como pode ser visualizado na Figura 32.

Figura 31 – Circuito eletrônico da estufa: (a) Esquemático 1 e (b) Esquemático 2.



Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Circuito eletrônico montado na estufa com duas protoboard.



Fonte: Autoria própria.

## 5 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE DO MICROCONTROLADOR DA ESTUFA

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do firmware do microcontrolador para a estufa automatizada, detalhando a lógica do funcionamento de cada sistema de controle na estufa. Bem como a comunicação do microcontrolador com a plataforma IoT e a integração ao banco de dados SQL.

### 5.1 FIRMWARE

O firmware implementado no projeto de automação da estufa é responsável pela comunicação entre três componentes principais: o microcontrolador, a plataforma IoT e o banco de dados SQL. A lógica dessa comunicação está representado na Figura 33. Nesse sistema, o microcontrolador envia os dados a cada trinta segundos e requisita as atualizações feitas pelo usuário na plataforma IoT, a cada um segundo. Além disso, todos os valores e estados das variáveis do sistema (Figura ??) são armazenados em um banco de dados SQL.

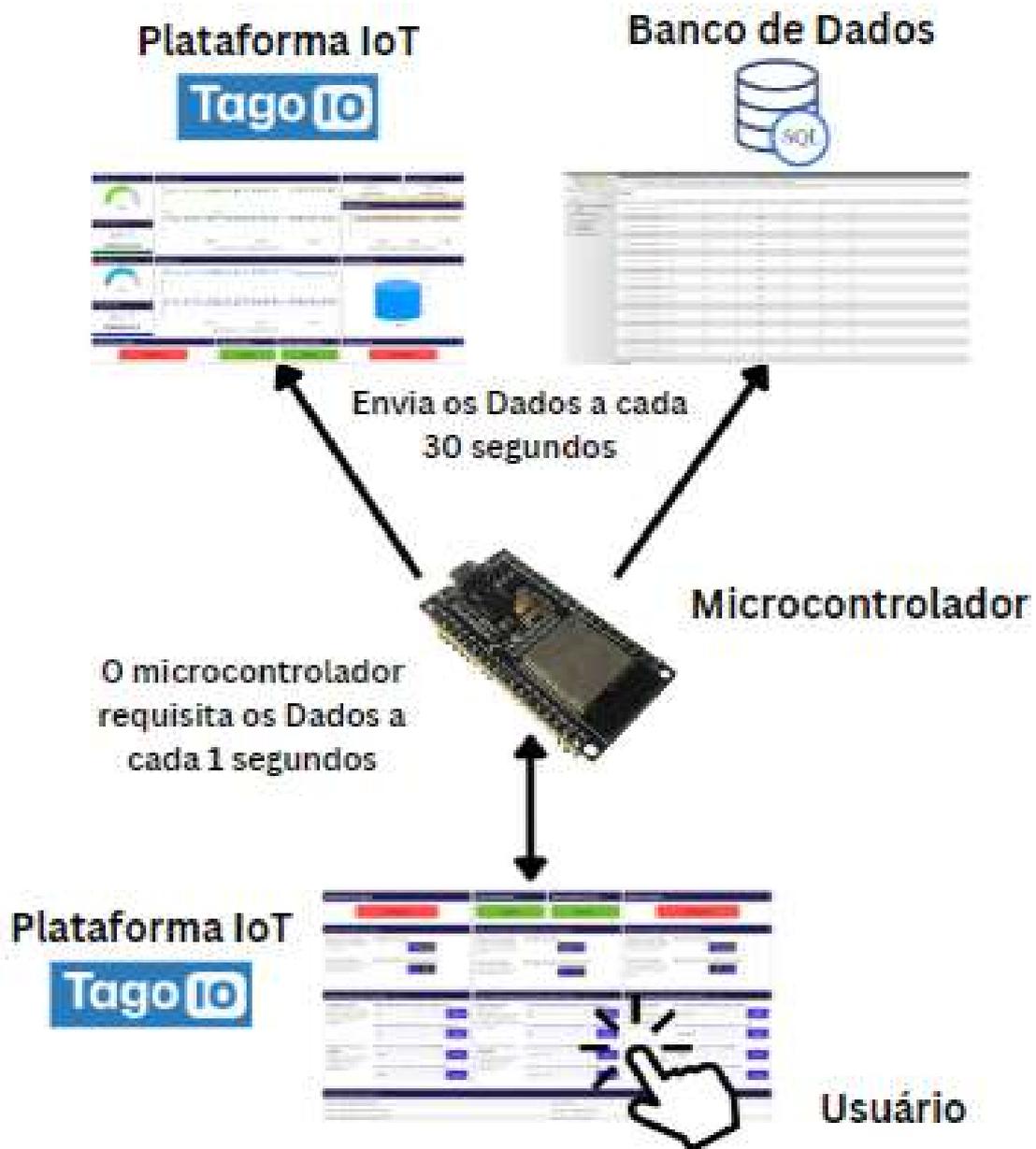
#### 5.1.1 Firmware do microcontrolador

Para este projeto o desenvolvimento do código para o ESP32 (microcontrolador) é realizado através da Arduino IDE (Integrated Development Environment) (Arduino, 2023a). A lógica do algoritmo implementado no microcontrolador pode ser visualizado no fluxograma da Figura 34. E o funcionamento do sistema começa com o microcontrolador estabelecendo uma conexão à internet por meio do Wi-Fi. Em seguida, ele solicita os valores de todas as variáveis de controle no *dashboard* da plataforma IoT (TagoIO). Desse modo, para os sistemas de irrigação, ventilação e de iluminação artificial, é solicitado as informações específicas dos atuadores, como:

- Estado - Estado no qual o atuador se encontra (ligado ou desligado);
- Modo de controle - Informa qual o modo de controle é definido pelo usuário (Automático ou Manual);
- Tipo de automação - Informa qual o tipo de automação para o controle automático, ou seja, se o sistema será automático pelo controle através de variáveis do ambiente ou pelo horário do dia;
- Valores de máximo e mínimo que faz ativar ou desativar o sistema;
- Horário do dia para ativar e desativar o sistema.

Após atualizar todas essas variáveis, o microcontrolador verifica se passaram mais de trinta segundos desde da última atualização das variáveis entre o microcontrolador, a plataforma IoT e o banco de dados SQL. Caso esse intervalo tenha passado, os dados são atualizados. Caso

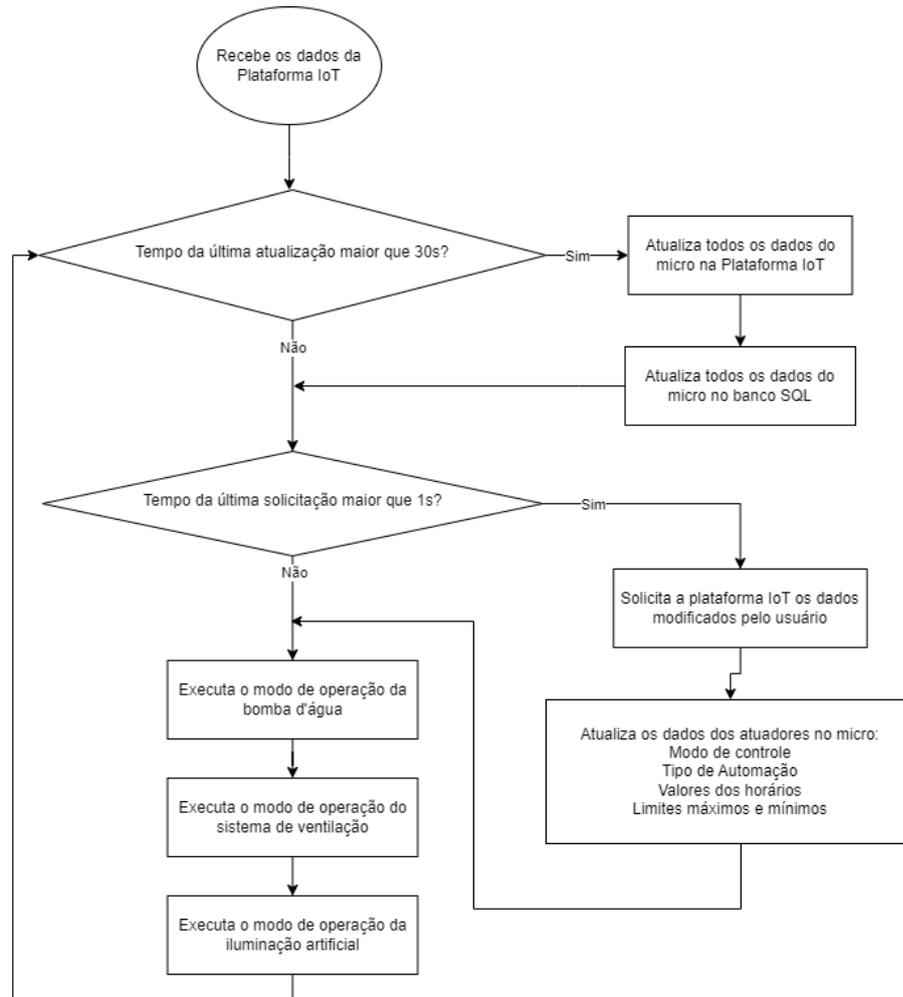
Figura 33 – Lógica da comunicação entre os pontos do sistema.



Fonte: Autoria própria.

contrário, ele verifica se passou mais de um segundo desde da última solicitação a plataforma IoT para obter os valores modificados pelo usuário. Essas alterações incluem o modo de operação para algum atuador, definição dos valores de horário ou limites máximos e mínimos. E com base nos valores obtidos pela plataforma IoT, passa como parâmetro para a função correspondente para controlar o funcionamento da bomba d'água, do sistema de ventilação e do sistema de iluminação artificial.

Figura 34 – Fluxograma da lógica do sistema no microcontrolador.



Fonte: Autoria própria.

#### 5.1.1.1 Firmware do controle da bomba d'água

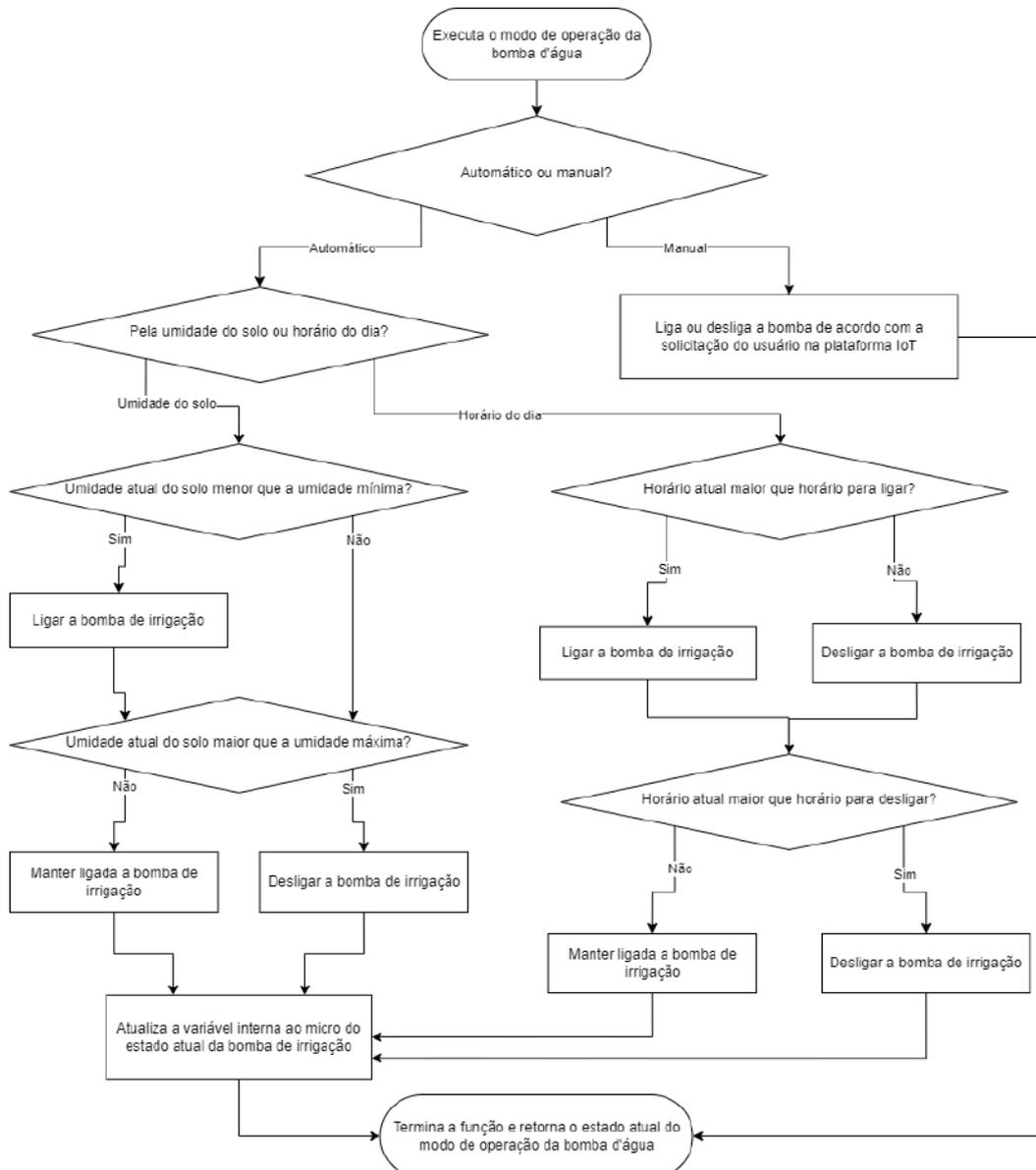
A função de controle da bomba d'água é detalhada no fluxograma apresentado na Figura 35. O sistema de irrigação opera pelo controle da bomba na qual pode ser configurada para funcionar em dois modos: manual ou automático.

No modo manual, o usuário tem a capacidade de ligar ou desligar a bomba de forma direta através de um botão no painel de controle. E no modo automático, a bomba é controlada de duas maneiras: por meio da umidade do solo ou com base no horário do dia.

No modo automático baseado na umidade do solo, o usuário define valores de umidade mínima e máxima. E o sistema opera de forma autônoma, ativando a irrigação sempre que a umidade do solo cair abaixo do limite mínimo predefinido e desligando-a quando a umidade atingir ou exceder o limite máximo. Isso mantém o solo dentro de um intervalo de umidade definido pelo usuário, ligando a irrigação em umidade baixa e desligando em umidade alta, evitando que a planta sofra com a falta ou excesso de água.

Já no controle automático através do horário do dia, o usuário configura dois horários: um para ligar a irrigação e outro para desligá-la. Dessa forma, a bomba d'água é controlada de acordo com horários predefinidos, garantindo que a irrigação ocorra nos momentos desejados e com a duração adequada.

Figura 35 – Fluxograma detalhado da função que controla o sistema de irrigação.



Fonte: Autoria própria.

#### 5.1.1.2 Firmware do controle do sistema de ventilação

A função que controla o sistema de ventilação é explicada detalhadamente no fluxograma apresentado na Figura 36. O sistema de ventilação é composto pela ativação dos ventiladores e pela abertura do teto da estufa. Que também oferece dois modos de operação: manual e automático.

No modo manual, o usuário tem controle direto sobre a ativação e desativação dos ventiladores, bem como a abertura e o fechamento frontal da estufa. Assim permitindo o controle direto, se necessário. No modo automático, o sistema de ventilação pode ser acionado de duas maneiras: com base na temperatura do ar e de acordo com horários do dia.

No controle automático baseado na temperatura do ar, o usuário define um valor máximo e mínimo para a temperatura de referência. O sistema inteligente entra em ação, ativando a ventilação e a abertura sempre que a temperatura do ar interna da estufa ultrapassar o valor máximo. E o sistema desliga a ventilação e fecha a abertura quando a temperatura abaixa e fica inferior a temperatura mínima. Assim o sistema automático da estufa matem a plantação em temperaturas adequadas, resfriando o ambiente em temperaturas elevadas e desligando a ventilação em temperaturas baixas.

No controle automático baseado no horário do dia, o usuário configura dois horários: um para ligar os ventiladores e abrir o teto da estufa e outro para desligá-los. Isso permite que o sistema de ventilação funcione de acordo com horários específicos, garantindo a circulação adequada do ar na estufa.

#### 5.1.1.3 Firmware do controle do sistema de iluminação artificial

A função que controla o sistema de iluminação artificial é explicada detalhadamente no fluxograma apresentado na Figura 37. O sistema de iluminação artificial funciona com a ativação e desativação das luzes na fita LED que também oferece dois modos de operação: manual e automático.

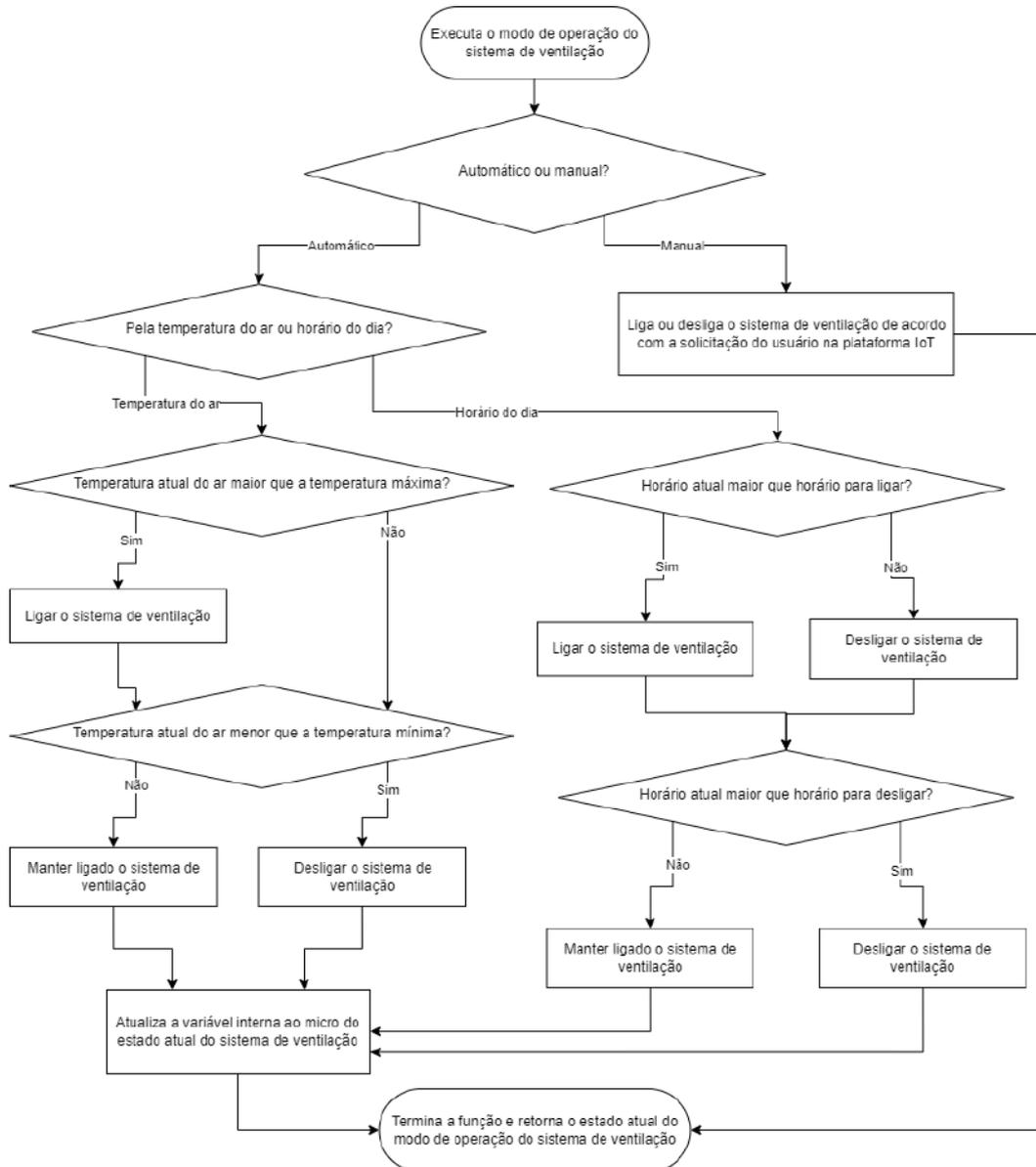
No modo manual, o usuário tem controle direto sobre a ativação e desativação das luzes da fita LED. E no modo automático, o sistema de iluminação pode ser acionado de duas maneiras: com base na luminosidade externa e de acordo com horários do dia.

No modo automático, baseado na iluminância externa, o usuário define um valor mínimo e um valor máximo de iluminância para o controle da iluminação. O sistema inteligente ativa as luzes da fita LED quando a iluminância externa estiver abaixo do valor mínimo configurado. Da mesma forma, o sistema desativa as luzes quando a iluminância externa ultrapassar o valor máximo definido. Assim a iluminação artificial é acionada quando a iluminação externa estiver baixa (ambiente escuro) e desligada quando estiver alta (ambiente claro) e isso garante que as plantas recebam a iluminação adequada, complementando a luz natural quando necessário.

## 5.2 PLATAFORMA IOT: TAGOIO

Uma plataforma IoT desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de projetos IoT ao fornecer um conjunto de ferramentas e serviços que simplificam a criação, gerenciamento e escalabilidade desses projetos (Pedro Bertoleti, 2023). Sua função principal é permitir a conectividade, a coleta de dados dos sensores e controle dos atuadores, além de possibilitar

Figura 36 – Fluxograma detalhado da função que controla o sistema de ventilação.



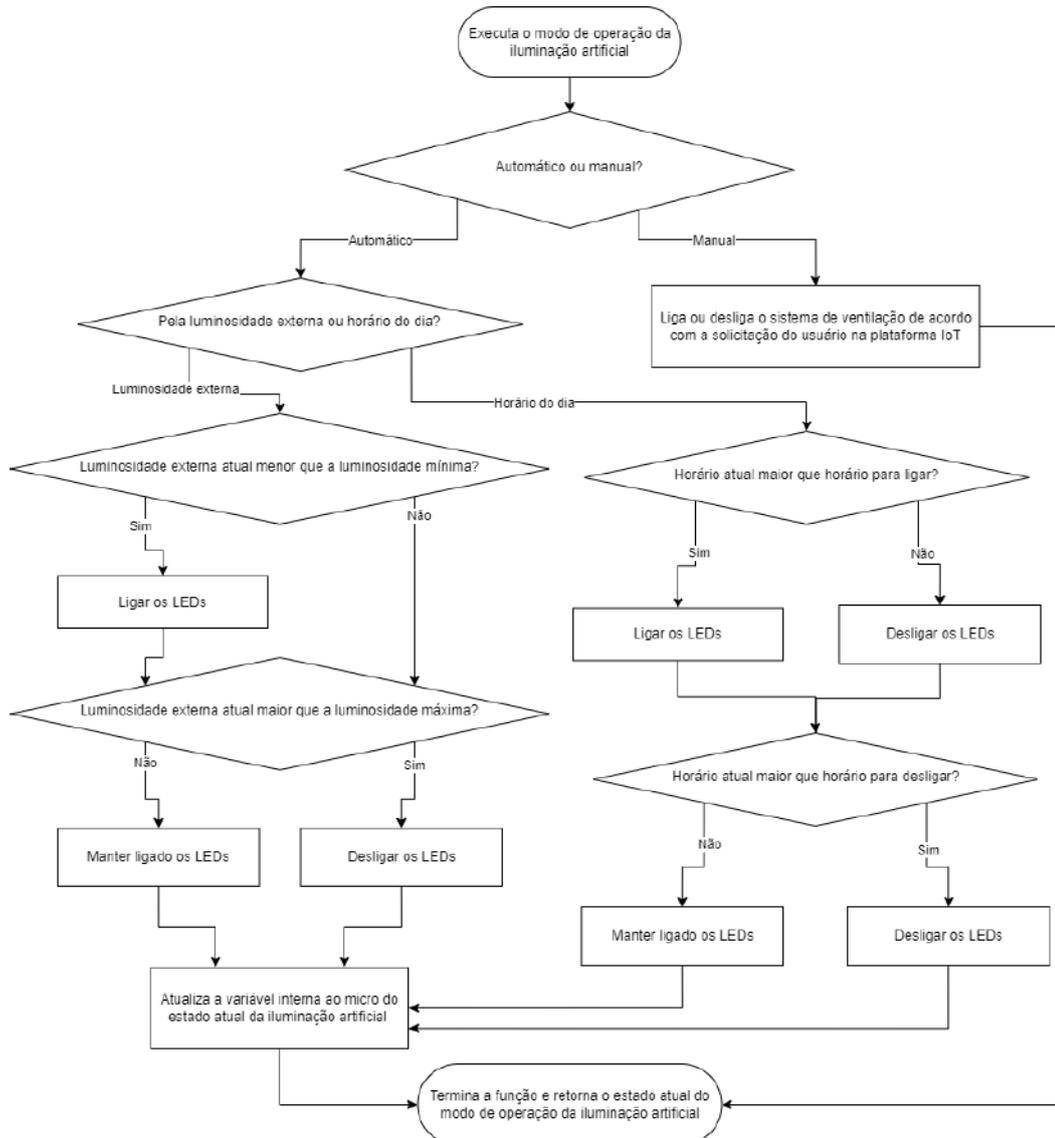
Fonte: Autoria própria.

o processamento, análise e visualização desses dados. Para este projeto é escolhido a TagoIO (TagoIO, 2023d) para desenvolver um painel de controle em forma de *dashboard*. Nesta seção será apresentado como é desenvolvida a interface gráfica e como é realizada a transferência de dados entre o microcontrolador e a TagoIO.

### 5.2.1 Comunicação entre ESP32 e TagoIO

Quando se deseja estabelecer a comunicação entre duas “coisas”, é fundamental definir o processo de envio e recebimento de dados entre elas. Inicialmente, é desenvolvido o envio de informações do ESP32 para o *dashboard* da TagoIO. Para isso, é necessário adicionar o dispositivo externo, para este projeto o ESP32, que irá estabelecer essa comunicação com a

Figura 37 – Fluxograma detalhado da função que controla o sistema de iluminação artificial.



Fonte: Autoria própria.

plataforma TagoIO. Assim, seguindo os passos descritos em (TagoIO, 2023a), é possível criar o primeiro dispositivo, desenvolver um painel de controle simples com um cartão e enviar o valor no sistema do Arduino para o *dashboard* da TagoIO utilizando o protocolo HTTP e o método POST. A função `HttpRequest()` deste tutorial é utilizada como base para o desenvolvimento do código de envio no ESP32. Além disso, é possível encontrar um exemplo de comunicação entre o ESP32 e a TagoIO em (Hackster.io, 2023).

Para obter a comunicação completa do sistema, é fundamental desenvolver a função de receber os dados da plataforma IoT no ESP32. Nesse contexto, a aplicação precisa solicitar à plataforma TagoIO o estado dos botões ou definição de valores as novas variáveis e isto tem como finalidade detectar quando o usuário realiza definições ou aciona o controle de atuadores no sistema. A função que recebe os comandos de controle da TagoIO para executar pelo ESP32,

é desenvolvida a partir da função que envia os dados, diferenciando-se pelo uso do método HTTP GET ao invés de POST e o tratamento da resposta da plataforma IoT no formato JSON. Para este passo, é utilizado as documentações de (TagoIO, 2023c) e (TagoIO, 2023e) para entender como a resposta da TagoIO é estruturada e assim poder trata-la no ESP32. O código, trata a resposta como um objeto JSON, e a biblioteca `ArduinoJson` é usada para desserializá-la e extrair o valor do dado solicitado.

## 5.2.2 Dashboard

O *dashboard* é desenvolvido como um painel de visualização e interação com os dados da estufa automatizada em tempo real (TagoIO, 2023b). O *dashboard* é composto por *widgets* que podem exibir e coletar dados dos usuários. A TagoIO oferece uma variedade de *widgets* para lidar com seus dados em tempo real. As opções disponíveis incluem desde mostradores simples até tabelas, mapas, vídeos e até mesmo formulários para permitir que o usuário insira dados (TagoIO, 2023f).

### 5.2.2.1 Monitoramento dos sensores

No monitoramento dos sensores da estufa como a umidade do solo e do ar é utilizado o *widgets* do tipo *Solid*. Para a temperatura do ar e do solo, luminosidade interna e externa é utilizado o *widgets* do tipo *Card*. E o *widgets* do tipo *Line* é utilizado no monitoramento do histórico para as variáveis citadas anteriormente. Para o nível de água no reservatório é utilizado o *widgets* do tipo *Cylinder*. E para os atuadores o *widgets* do tipo *Push Button*. Esta primeira seção de monitoramento das variáveis do *dashboard* é possível visualizar na Figura 39.

Figura 38 – Visualização da parte do monitoramento das variáveis no *dashboard*.



Fonte: Autoria própria.

### 5.2.2.2 Controle dos atuadores

Nesta parte do controle dos atuadores é desenvolvida com a finalidade do usuário personalizar o funcionamento do sistema. Assim pode escolher os modos de operações do sistema de irrigação, ventilação e iluminação artificial, além disso pode definir os valores específicos para a operação autônoma dos atuadores, com base em variáveis do ambiente ou horário do dia.

Para o controle manual e visualização do estado dos atuadores, é utilizado o *Push Button*, como já é citado. E para a definição dos modos de operação dos sistemas de irrigação, ventilação e iluminação é utilizado o *widgets* do tipo *Input Control* com o tipo de campo *Switch* e para a inserção dos valores de limites das variáveis do ambiente e do horário do dia no controle automático é utilizado o mesmo *Input Control* porém com o campo de *Text* para a inserção dos dados. E por fim é utilizado o *widgets* do tipo *Static Table* para mostrar o *feedback* do microcontrolador relacionado ao estado dos modos de operação de cada sistema. Todo este sistema de controle do *dashboard* pode ser visualizado na Figura 39.

Figura 39 – Visualização da parte do controle dos atuadores no *dashboard*.

Estado Bomba da Irrigação	Estado das Ventrinhas	Abertura Superior da Estufa	Estado do Led Grow
<b>Desligado</b>	<b>Ligado</b>	<b>Aberto</b>	<b>Desligado</b>
<b>Modo de Operação da Irrigação</b> Define como será o controle da irrigação. <input checked="" type="radio"/> Manual ou Automático <input checked="" type="radio"/> Modo de Controle <input type="button" value="Manual"/>	<b>Modo de Operação das Ventrinhas e Abertura Superior</b> Define como será o controle do ventilador e do abertura do teto. <input checked="" type="radio"/> Manual ou Automático <input checked="" type="radio"/> Modo de Controle <input type="button" value="Automático"/>	<b>Modo de Operação da Iluminação Artificial</b> Define como será o controle da Iluminação Artificial. <input checked="" type="radio"/> Manual ou Automático <input checked="" type="radio"/> Modo de Controle <input type="button" value="Automático"/>	
<b>Tipo de Automação</b> Altera o horário do dia ou pelo nível de umidade do solo. <input checked="" type="radio"/> Horário do Dia ou Umidade do Solo <input type="button" value=""/>	<b>Tipo de Automação</b> Altera o horário do dia ou pelo temperatura do ar. <input checked="" type="radio"/> Horário do Dia ou Temperatura do Ar <input type="button" value=""/>	<b>Tipo de Automação</b> Altera o horário do dia ou pelo nível de luminosidade externa. <input checked="" type="radio"/> Horário do Dia ou Luminosidade Externa <input type="button" value=""/>	
<b>Valores da Automação na Irrigação</b> -- 11:04:19 AM <b>Umidade Do Solo</b> Define o valor de umidade do solo para ligar a irrigação e o valor para desligar a irrigação. <input type="text" value="exemplo: 50"/> <input type="button" value="Definir"/> <input type="text" value="exemplo: 90"/> <input type="button" value="Definir"/>	<b>Valores da Automação das Ventrinhas e Abertura Superior</b> -- 11:04:19 AM <b>Temperatura do Ar</b> Define o valor de temperatura do ar para ligar o sistema de ventilação e o valor para desligar o sistema de ventilação. <input type="text" value="exemplo: 30.2"/> <input type="button" value="Definir"/> <input type="text" value="exemplo: 22.5"/> <input type="button" value="Definir"/>	<b>Valores da Automação da Iluminação Artificial</b> -- 11:04:19 AM <b>Iluminância Externa</b> Define o valor de luminância externa para ligar o led e o valor de luminância máxima para desligar o led. <input type="text" value="exemplo: 50"/> <input type="button" value="Definir"/> <input type="text" value="exemplo: 80"/> <input type="button" value="Definir"/>	
<b>Horário de Controle da Irrigação</b> Define um horário para ligar a irrigação e outro para desligá-la. Formato: Hora:Minuto. <input type="text" value="exemplo: 13:50"/> <input type="button" value="Definir"/> <input type="text" value="exemplo: 18:32"/> <input type="button" value="Definir"/>	<b>Horário de Controle da Ventilação</b> Define um horário para ligar e ventilador outro para desligá-lo. Formato: Hora:Minuto. <input type="text" value="exemplo: 11:20"/> <input type="button" value="Definir"/> <input type="text" value="exemplo: 13:45"/> <input type="button" value="Definir"/>	<b>Horário de Controle do Led</b> Define um horário para ligar o led e outro para desligá-lo. Formato: Hora:Minuto. <input type="text" value="exemplo: 19:15"/> <input type="button" value="Definir"/> <input type="text" value="exemplo: 22:30"/> <input type="button" value="Definir"/>	
<b>Informações Internas ao Micro</b> Modo de Operação Bomba d'Água: <span style="float: right;">Controle Manual</span> Modo de Operação Sistema de Ventilação: <span style="float: right;">Automático / temperatura do ar</span> Modo de Operação da Iluminação Artificial: <span style="float: right;">Automático / horário do dia</span>			

Fonte: Autoria própria.

### 5.3 BANCO DE DADOS SQL

O sistema de automação da estufa é integrado também a um banco de dados SQL no servidor Web gratuito (000webhost, 2023). Todas as variáveis do sistema e estados dos controladores foram armazenados no banco de dados *MYSQL* como pode ser visualizado na Figura ???. Além disso na Figura 40 é mostrada a página do gerenciador do banco de dados *phpMyAdim*. Para desenvolver esta integração do ESP32 com o armazenamento em um banco de

Tabela 1 – Todas as variáveis e estados do sistema da estufa criadas no banco MySQL.

Nome	Tipo	Nulo	Valor Padrão
id	int(6)	Não	Sem valor
dataTempoLeituraBR	varchar(30)	Sim	Vazio
dataTempoLeituraUTC	varchar(30)	Sim	Vazio
umidadeSolo	varchar(30)	Sim	Vazio
temperaturaSolo	varchar(30)	Sim	Vazio
nivelAguaReservatorio	varchar(30)	Sim	Vazio
estadoBombaDagua	varchar(30)	Sim	Vazio
estadoOperacaoBombaDagua	varchar(30)	Sim	Vazio
modoControleBombaDagua	varchar(30)	Sim	Vazio
tipoAutomacaoBombaDagua	varchar(30)	Sim	Vazio
umidadeParaLigarIrrigacao	varchar(30)	Sim	Vazio
umidadeParaDesligarIrrigacao	varchar(30)	Sim	Vazio
horarioParaLigarIrrigacao	varchar(30)	Sim	Vazio
horarioParaDesligarIrrigacao	varchar(30)	Sim	Vazio
temperaturaAr	varchar(30)	Sim	Vazio
umidadeAr	varchar(30)	Sim	Vazio
estadoTeto	varchar(30)	Sim	Vazio
estadoVentoinha	varchar(30)	Sim	Vazio
estadoOperacaoTetoVentoinha	varchar(30)	Sim	Vazio
modoControleTetoVentoinha	varchar(30)	Sim	Vazio
tipoAtomacaoTetoVentoinha	varchar(30)	Sim	Vazio
temperaturaParaLigarVentilacao	varchar(30)	Sim	Vazio
temperaturaParaDesligarVentilacao	varchar(30)	Sim	Vazio
horarioParaLigarVentilacao	varchar(30)	Sim	Vazio
horarioParaDesligarVentilacao	varchar(30)	Sim	Vazio
iluminanciaInterna	varchar(30)	Sim	Vazio
iluminanciaExterna	varchar(30)	Sim	Vazio
estadoLed	varchar(30)	Sim	Vazio
estadoOperacaoLed	varchar(30)	Sim	Vazio
modoControleLed	varchar(30)	Sim	Vazio
tipoAutomacaoLed	varchar(30)	Sim	Vazio
iluminanciaParaLigarLed	varchar(30)	Sim	Vazio
iluminanciaParaDesligarLed	varchar(30)	Sim	Vazio
horarioParaLigarLed	varchar(30)	Sim	Vazio
horarioParaDesligarLed	varchar(30)	Sim	Vazio
reading_time	timestamp		

Fonte: Autoria própria.

dados *MYSQL* é utilizado o tutorial disponível em (Random Nerd Tutorial, 2023) apenas com a modificação no servidor Web utilizado.

Figura 40 – Página do gerenciador do *phpMyAdmin*.

The screenshot shows the phpMyAdmin interface. The main content area displays a table with the following data:

id	dataTempo	estado	dataTempo	estado	umidadeSolo	temperaturaFoco	nivelAguaDoReservatorio	estadoBombaFogosa	estadoOperacaoBombaFogosa	modoControleBombaFogosa	tipoAutomacaoBombaFogosa
1	NULL	NULL	25	22.88	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
2	NULL	NULL	20	22.15	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
3	NULL	NULL	24	22.88	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
4	NULL	NULL	26	22.62	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
5	NULL	NULL	25	22.69	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
6	NULL	NULL	25	22.69	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
7	NULL	NULL	25	22.69	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
8	NULL	NULL	20	22.69	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
9	NULL	NULL	20	22.69	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
10	NULL	NULL	10	22.69	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
11	NULL	NULL	21	22.69	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
12	NULL	NULL	10	22.99	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
13	NULL	NULL	20	22.15	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
14	NULL	NULL	24	22.69	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

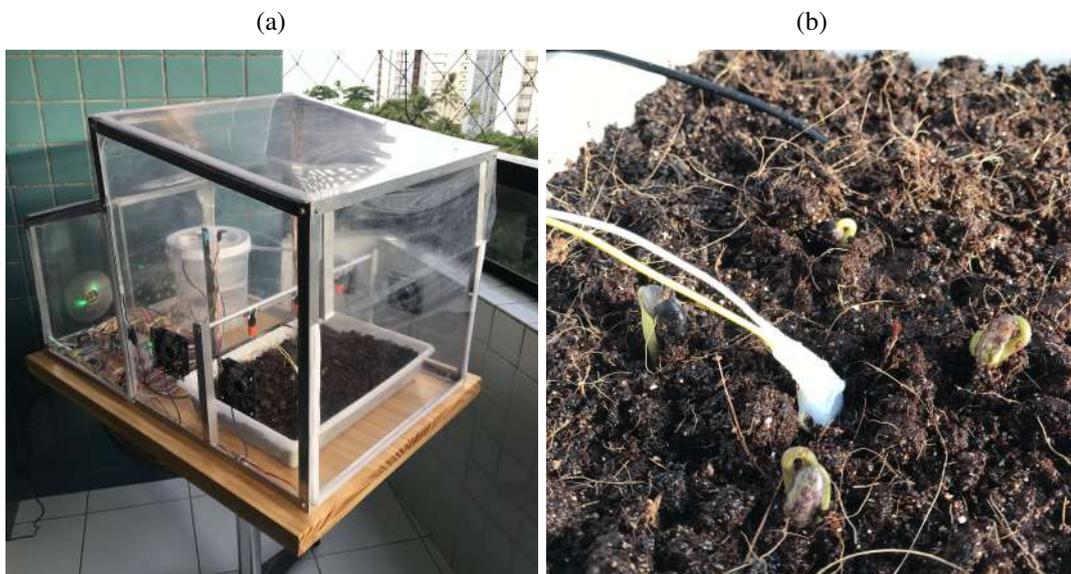
Fonte: Autoria própria.

## 6 RESULTADOS

Após a conclusão do desenvolvimento do protótipo da estufa, que incluiu desde a fabricação da estrutura até o desenvolvimento do software, cada sistema da estufa inteligente foi submetido a testes. Esses testes englobaram todos os modos de operação com todos os sistemas da estufa inteligente (irrigação, ventilação e iluminação). Para exemplificar, no sistema de irrigação foi realizado o teste no modo de operação manual e automático, considerando tanto o controle baseado na umidade do solo quanto o horário do dia. Esses testes foram replicados para os outros sistemas, e todos operaram conforme o esperado.

Além disso, outro teste foi realizado para verificar o funcionamento do sistema ao longo de 3 dias. Nessa situação, os valores definidos para umidade, temperatura e luminosidade no modo automático, foi escolhido apenas para verificação do funcionamento do sistema e de forma aleatória. Assim o teste se iniciou com o plantio de sementes de feijão no dia 16/10/2023 às 17:00 (Figura 41a) e finalizou no dia 19/10/2023 às 11:00 com a germinação de alguns feijões (Figura 41b). Os dados relativos aos parâmetros do ambiente e do solo podem ser extraídos tanto do banco de dados SQL, como também da plataforma TagoIO; Para plotar os gráficos, foi extraído um arquivo CSV do banco de dados e importado no Excel.

Figura 41 – Protótipo da estufa inteligente durante a fase de testes: (a) no início da plantação 16/10/2023 e (b) germinação de alguns feijões no último de do teste 19/10/2023.

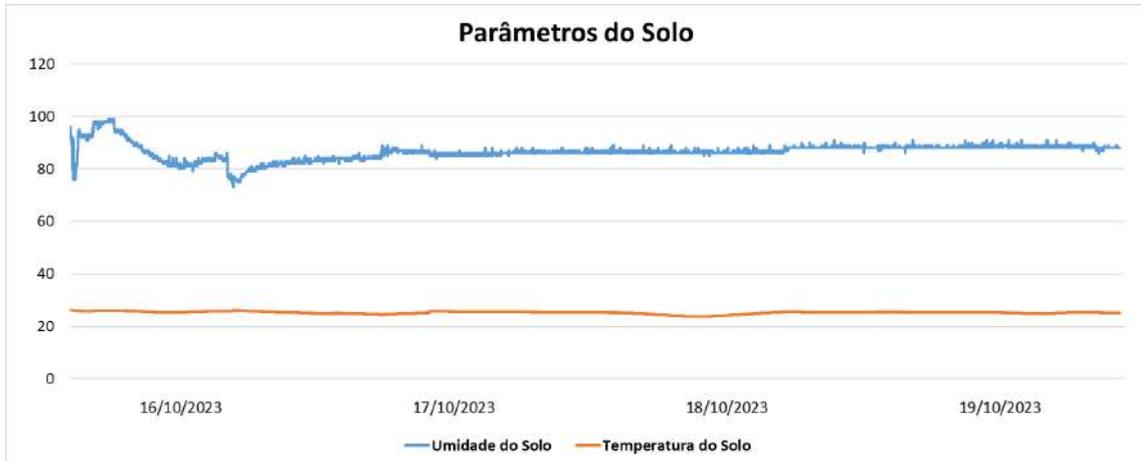


Fonte: Autoria própria.

Durante os testes da estufa, o sistema de irrigação foi configurado para operar automaticamente com base na umidade do solo, e a umidade mínima para ligar a irrigação configurada como 60% e umidade máxima para desligar a irrigação como 90%. Entretanto, como mostrado no gráfico da Figura 42 a umidade do solo não ficou abaixo de 60%, resultando no não acionamento

da bomba de irrigação. E os valores mínimo, máximo e médio para a temperatura e umidade do solo, podem ser visualizados na Tabela 2.

Figura 42 – Dados da temperatura e umidade do solo.



Fonte: Autoria própria.

Para o sistema de ventilação foi definido para operar no modo automático pela temperatura do ar, e ligar o sistema em temperaturas superiores a  $27.5C$  e para desligar o sistema em temperaturas inferiores a  $26.5C$ . Para este caso o sistema de ventilação foi ativado (abertura frontal e acionamento das ventoinhas) em sua maioria durante no início da tarde e desativado no fim do dia, como podemos observar na Figura 43. Na Tabela 2 também é possível ver que esses valores foram atingidos em algum momento, devido a temperatura mínima e máxima ao longo do período de teste.

Figura 43 – Dados da temperatura e umidade do ar.



Fonte: Autoria própria.

E por fim para o sistema de iluminação artificial, foi definido para operar no modo automático baseado no horário do dia e para ligar de 18:00 e desligar de 20:00, porém o sistema por alguma instabilidade não funcionou e o LED não foi ligado neste intervalo de hora. No

entanto, durante os testes, sistema funcionou normalmente, tanto no modo manual, como no automático pelo horário do dia e iluminância externa. O comportamento da iluminância interna e externa pode ser observado na Figura 44. E os valores mínimos e máximos são observados na Tabela 2.

Figura 44 – Dados da iluminância interna e externa.



Fonte: Autoria própria.

Durante os três dias de testes, também foi observado que em alguns momentos ocorria instabilidade do ESP32 na comunicação com o servidor Web para armazenar os dados no banco de dados, e com a plataforma IoT da TagoIO e para retornar a comunicação era necessário reiniciar o microcontrolador.

Tabela 2 – Dados de mínimo, máximo e média para os parâmetros medidos na estufa.

<b>Parâmetro</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Média</b>
<b>Umidade do Solo</b>	99 %	73 %	86 %
<b>Temperatura do Solo</b>	26.25 °C	23.75 °C	25.19 °C
<b>Umidade do Ar</b>	84 %	60 %	73 %
<b>Temperatura do Ar</b>	29.30 °C	23.20 °C	26.24 °C
<b>Iluminância Externa</b>	5303 lx	0 lx	572 lx
<b>Iluminância Interna</b>	2884 lx	0 lx	520 lx

Fonte: Autoria própria.

## 7 CONCLUSÕES

O desenvolvimento e teste deste protótipo de estufa inteligente representam um passo significativo em direção à aplicação prática da automação no cultivo de plantas, com foco na medição das condições ambientais para maximizar o crescimento e a saúde das plantas. Neste projeto, foi desenvolvido um protótipo de estufa inteligente, integrando sistemas de irrigação, ventilação e iluminação artificial, todos controlados por um microcontrolador ESP32, com interface de usuário acessível por meio da plataforma IoT TagoIO e o armazenamento das informações em um banco de dados SQL.

Uma das principais contribuições deste projeto é a capacidade de operar a estufa de forma remota em diferentes modos de funcionamento, tanto de forma manual, quanto em modos automáticos, permitindo aos agricultores a personalização do cultivo de acordo com suas necessidades e preferências. No modo automático, os sistemas de irrigação, ventilação e iluminação artificial podem ser controlados com base em leituras de sensores como a umidade do solo, temperatura do ar e níveis de iluminância. Além de poder trocar o modo de controle automático desses sistemas com base no horário do dia, uma para ligar e outro para desligar.

Desse modo, este projeto fornece uma contribuição para o campo da agricultura e demonstra o potencial da tecnologia IoT na otimização das práticas agrícolas. A capacidade de controlar e monitorar as condições ambientais da estufa de forma remota e automatizada tem implicações na agricultura inteligente e de precisão. À medida que a automação e a tecnologia IoT se torna mais desenvolvida e acessível, esse sistema têm grande potencial de melhorar e revolucionar a maneira como os agricultores lidam com o cultivo das plantas, aumentando a eficiência e reduzindo o desperdício.

### 7.0.1 Trabalhos futuros

Este projeto é apenas um primeiro passo e podem ser realizadas melhorias e expansões, para se tornar um produto com mais recursos e confiabilidade. No âmbito da parte estrutural do protótipo, existem várias melhorias e expansões possíveis. Primeiramente, considerar a implementação de um sistema de captação de água da chuva para o armazenamento no reservatório da estufa. Além disso, é necessário testar o funcionamento do protótipo em ambientes externos e melhorar a vedação da estufa para torná-la resistente às condições climáticas e garantir a utilização em ambiente externo.

No que diz respeito aos componentes eletrônicos, há várias oportunidades para aprimorar o sistema. Uma delas é a substituição das ventoinhas existentes por unidades mais potentes para melhorar o sistema de ventilação e, assim, o controle da temperatura ambiente. Desenvolver uma placa de circuito impresso (PCB do inglês, *printed circuit board*) para melhorar a confiabilidade e a durabilidade do sistema eletrônico. Além disso, considerar a transição para fontes de energia sustentável, como painéis solares e baterias.

Por fim para à parte do software é necessário testar a implementação de rotinas de reinicialização para as falhas de comunicação entre o ESP32, o servidor web e a plataforma TagoIO. Além disso, investigar as razões pelas quais o sistema de controle automático, especialmente o controle do LED com base no horário do dia, não esta funcionando em alguns momentos. E implementar controle por tarefas (*tasks*) utilizando sistemas operacionais de tempo real como o FreeRTOS (RTOS do inglês, *Real Time Operating System*) (FreeRTOS, 2023), a fim de obter mais agilidade no controle e resposta do sistema. E para a parte da visualização dos dados na plataforma IoT, considerar o desenvolvimento de um *dashboard* próprio por meio da programação web, em vez de depender exclusivamente da plataforma TagoIO.

Essas melhorias em cada uma das partes do sistema visam garantir que o protótipo se torne mais robusto e confiável, permitindo sua evolução em direção a um produto comercializável e eficaz na vida do agricultor.

## REFERÊNCIAS

- 000webhost. **Free Web Hosting**. 2023. Online. Assesado em 26/09/2023. Disponível em: <<https://www.000webhost.com/>>. Citado na página 63.
- ABDALLA, Z.; EL-RAMADY, H. Applications and challenges of smart farming for developing sustainable agriculture. **Environment, Biodiversity and Soil Security**, Egypt's Presidential Specialized Council for Education and Scientific Research, v. 6, n. 2022, p. 81–90, fev. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.21608/jenvbs.2022.135889.1175>>. Citado na página 14.
- AHMED, A. T. et al. Egyptian and greek water cultures and hydro-technologies in ancient times. **Sustainability**, MDPI AG, v. 12, n. 22, p. 9760, nov. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su12229760>>. Citado na página 14.
- AOSONG. **Temperature and humidity module DHT11 Product Manual**. 2023. Online. Assesado em 08/09/2023. Disponível em: <[https://d229kd5ey79jzj.cloudfront.net/791/Datasheet\\_DHT11.pdf](https://d229kd5ey79jzj.cloudfront.net/791/Datasheet_DHT11.pdf)>. Citado na página 38.
- Arduino. **Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1**. 2023. Online. Assesado em 19/09/2023. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics>>. Citado na página 55.
- Arduino. **Documentação da função map() no arduino**. 2023. Online. Assesado em 02/09/2023. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/reference/pt/language/functions/math/map/>>. Citado na página 39.
- AutoDesk. **Fusion 360 Free professional 3D modeling**. 2023. Online. Assesado em 27/09/2023. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/campaigns/education/fusion-360>>. Citado na página 29.
- BARR, M.; MASSA, A. **Programming embedded systems: with C and GNU development tools**. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2006. Citado na página 26.
- BASSOI, L. H. et al. Agricultura de precisão e agricultura digital. **TECCOGS: Revista Digital de Tecnologias Cognitivas**, Pontifical Catholic University of Sao Paulo (PUC-SP), n. 20, maio 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.23925/1984-3585.2019i20p17-36>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.
- BENHOSSI, G.; REYNALDO, É. F.; MACHADO, T. M. Differences between laboratory and sensor analyses for soil attributes. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, FapUNIFESP (SciELO), v. 51, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1983-40632021v5165491>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 37.
- BERSANI, C. et al. Internet of things approaches for monitoring and control of smart greenhouses in industry 4.0. **Energies**, MDPI AG, v. 15, n. 10, p. 3834, maio 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en15103834>>. Citado 6 vezes nas páginas 14, 15, 24, 25, 27 e 37.
- BEVERUNGEN, D. et al. Conceptualizing smart service systems. **Electronic Markets**, Springer Science and Business Media LLC, v. 29, n. 1, p. 7–18, nov. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12525-017-0270-5>>. Citado na página 24.

BOCHTIS, D.; SØRENSEN, C. A. G.; KATERIS, D. Agricultural production through technological evolution. In: **Operations Management in Agriculture**. Elsevier, 2019. p. 1–18. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809786-1.00001-1>>. Citado na página 14.

BOURSIANIS, A. D. et al. Internet of things (IoT) and agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review. **Internet of Things**, Elsevier BV, v. 18, p. 100187, maio 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100187>>. Citado na página 14.

Dallas Semiconductor. **DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire® Digital Thermometer**. 2019. Online. Acessado em 08/09/2023. Disponível em: <<https://image.dfrobot.com/image/data/DFR0198/DS18B20.pdf>>. Citado na página 40.

Danilo Almeida. **SENSOR DE UMIDADE DO SOLO COM ARDUINO - HIGRÔMETRO**. 2017. Online. Acessado em 02/09/2023. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/sensor-de-umidade-do-solo-higrometro/>>. Citado na página 39.

DANITA, M. et al. IoT based automated greenhouse monitoring system. In: **2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)**. IEEE, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/iccons.2018.8662911>>. Citado na página 23.

DENARDIN, G. W.; BARRIQUELLO, C. H. **Sistemas operacionais de tempo real e sua aplicação em sistemas embarcados**. [S.l.]: Editora Blucher, 2019. Citado na página 27.

Electronic Design. **What's the Difference Between NRZ, NRZI, and Manchester Encoding?** 2017. Online. Acessado em 18/11/2023. Disponível em: <<https://www.electronicdesign.com/technologies/communications/article/21802271/electronic-design-whats-the-difference-between-nrz-nrzi-and-manchester-encoding>>. Citado na página 46.

ElectronicWings. **Soil Moisture Sensor Interfacing with NodeMCU**. 2023. Online. Acessado em 02/09/2023. Disponível em: <<https://www.electronicwings.com/nodemcu/soil-moisture-sensor-interfacing-with-nodemcu>>. Citado na página 39.

Equipe Embarcados. **Franzininho WiFi: Servo Motor com Arduino**. 2023. Online. Acessado em 18/09/2023. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/franzininho-wifi-servo-motor-com-arduino/>>. Citado na página 48.

FILHO, B. d. S. F. et al. **Agricultura de precisão em casas de vegetação: controle e gestão de cultivo em produção de mudas**. 128 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias da Informação e Comunicação) — Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Araranguá, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 21, 26, 27 e 28.

Flávio Babos. **Sensor Ultrassônico com Arduino: Como Controlar?** 2023. Online. Acessado em 08/11/2023. Disponível em: <<https://flaviobabos.com.br/sensor-ultrassonico-arduino/>>. Citado na página 45.

FreeRTOS. **Real-time operating system for microcontrollers**. 2023. Online. Acessado em 08/11/2023. Disponível em: <<https://www.freertos.org/index.html>>. Citado na página 70.

Fritzing. **Fritzing electronics made easy**. 2023. Online. Acessado em 18/09/2023. Disponível em: <<https://fritzing.org/>>. Citado na página 53.

GARCÍA, C. G. et al. A review about smart objects, sensors, and actuators. **International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence**, Universidad Internacional de La Rioja, v. 4, n. 3, p. 7, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.9781/ijimai.2017.431>>. Citado na página 15.

Hackster.io. **Cool Dashboard for ESP32**. 2023. Online. Acessado em 23/09/2023. Disponível em: <<https://www.hackster.io/cstram/cool-dashboard-for-esp32-8f315f>>. Citado na página 61.

Handson Technology. **HC-SR04 Ultrasonic Sensor Module User Guide**. 2023. Online. Acessado em 07/09/2023. Disponível em: <<https://www.handsontec.com/dataspecs/HC-SR04-Ultrasonic.pdf>>. Citado na página 45.

HERCOG, D. et al. Design and implementation of ESP32-based IoT devices. **Sensors**, MDPI AG, v. 23, n. 15, p. 6739, jul. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s23156739>>. Citado na página 51.

HERNÁNDEZ-MORALES, C. A. et al. IoT-based spatial monitoring and environment prediction system for smart greenhouses. **IEEE Latin America Transactions**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 21, n. 4, p. 602–611, abr. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/tla.2023.10128933>>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 25.

IZHAR ALAM. **Structured, Semi Structured and Unstructured Data**. 2023. Online. Acessado em 07/11/2023. Disponível em: <<https://k21academy.com/microsoft-azure/dp-900/structured-data-vs-unstructured-data-vs-semi-structured-data/#:~:text=Structured%20data%20is%20stored%20in,databases%20or%20other%20data%20table>>. Citado na página 25.

KOPETZ, H. Real-time operating systems. In: \_\_\_\_\_. **Real-Time Systems**. Springer US, 2011. p. 215–237. ISBN 9781441982377. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-8237-7\\_9](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-8237-7_9)>. Citado na página 27.

LEE, I. The internet of things for enterprises: An ecosystem, architecture, and IoT service business model. **Internet of Things**, Elsevier BV, v. 7, p. 100078, set. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.iot.2019.100078>>. Citado na página 14.

Luxorparts. **SG90 Micro Servo**. 2017. Online. Acessado em 18/09/2023. Disponível em: <[https://www.kjell.com/globalassets/mediaassets/701916\\_87897\\_datasheet\\_en.pdf?ref=4287817A7A](https://www.kjell.com/globalassets/mediaassets/701916_87897_datasheet_en.pdf?ref=4287817A7A)>. Citado na página 48.

MAGRANI, E. **A internet das coisas**. [S.l.]: Editora FGV, 2018. Citado na página 25.

MARAVEAS, C. et al. Applications of IoT for optimized greenhouse environment and resources management. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier BV, v. 198, p. 106993, jul. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106993>>. Citado na página 15.

MASSRUHÁ, S. M. F. S. et al. **Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas**. [S.l.]: Brasília, DF: Embrapa, 2020., 2020. Citado 4 vezes nas páginas 20, 21, 22 e 23.

MOHAMED, E. S. et al. Smart farming for improving agricultural management. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, Elsevier BV, v. 24, n. 3, p. 971–981, dez. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.08.007>>. Citado na página 14.

NYAGA, J. M. et al. Precision agriculture research in sub-saharan africa countries: a systematic map. **Precision Agriculture**, Springer Science and Business Media LLC, v. 22, n. 4, p. 1217–1236, jan. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11119-020-09780-w>>. Citado na página 14.

Pedro Bertoleti. **O que são as plataformas IoT e quais são as maiores do mercado**. 2023. Online. Assesado em 08/11/2023. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/iot/17606-o-que-sao-as-plataformas-iot-e-quais-sao-as-maiores-do-mercado-mic435.html>>. Citado na página 59.

PIVOTO, D. et al. Scientific development of smart farming technologies and their application in brazil. **Information Processing in Agriculture**, Elsevier BV, v. 5, n. 1, p. 21–32, mar. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.12.002>>. Citado na página 20.

Porto Seguro IoT. **Usando a Placa NodeMCU para Monitorar um Reservatório de Água**. 2023. Online. Assesado em 07/09/2023. Disponível em: <<https://portoseguroidot.wordpress.com/2019/03/07/monitorando-o-reservatorio-de-agua/>>. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 47.

QUEIROZ, D. M. de et al. Sensors applied to digital agriculture: A review. **REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA**, GN1 Genesis Network, v. 51, n. 5, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200086>>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 27.

QUEIROZ, D. M. de et al. **Agricultura digital**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2022. Citado 5 vezes nas páginas 24, 25, 26, 27 e 28.

Random Nerd Tutorial. **ESP32/ESP8266 Insert Data into MySQL Database using PHP and Arduino IDE**. 2023. Online. Assesado em 26/09/2023. Disponível em: <<https://randomnerdtutorials.com/esp32-esp8266-mysql-database-php/>>. Citado na página 64.

REETISHWAREE, S.; HURBUNGS, V. Evaluating the performance of sql and nosql databases in an iot environment. In: **2020 3rd International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering (ELECOM)**. IEEE, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ELECOM49001.2020.9297028>>. Citado na página 16.

REZVANI, S. M. eddin et al. IoT-based sensor data fusion for determining optimality degrees of microclimate parameters in commercial greenhouse production of tomato. **Sensors**, MDPI AG, v. 20, n. 22, p. 6474, nov. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s20226474>>. Citado na página 23.

RoboCore. **Fita LED Endereçável com a Vespa**. 2023. Online. Assesado em 18/09/2023. Disponível em: <<https://www.robocore.net/tutoriais/fita-led-enderecavel-ws2812b-vespa>>. Citado na página 46.

Rohm Semiconductor. **Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC**. 2010. Online. Assesado em 07/09/2023. Disponível em: <<https://d26lpennugtm8s.cloudfront.net/stores/198/075/rte/Datasheet-BH1750FVI.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.

SAIZ-RUBIO, V.; ROVIRA-MÁS, F. From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. **Agronomy**, MDPI AG, v. 10, n. 2, p. 207, fev. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>>. Citado na página 20.

TagoIO. **Arduino**. 2023. Online. Assesado em 23/09/2023. Disponível em: <<https://help.tago.io/portal/en/kb/articles/6-arduino>>. Citado na página 61.

TagoIO. **Dashboard Overview**. 2023. Online. Assesado em 26/09/2023. Disponível em: <[https://help.tago.io/portal/en/kb/articles/15-dashboard-overview#Building\\_dashboards](https://help.tago.io/portal/en/kb/articles/15-dashboard-overview#Building_dashboards)>. Citado na página 62.

TagoIO. **Getting Data**. 2023. Online. Assesado em 25/09/2023. Disponível em: <<https://help.tago.io/portal/en/kb/articles/36-getting-data>>. Citado na página 62.

TagoIO. **IoT Cloud Platform**. 2023. Online. Assesado em 23/09/2023. Disponível em: <<https://tago.io/>>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 60.

TagoIO. **TagoIO API Documentation**. 2023. Online. Assesado em 25/09/2023. Disponível em: <<https://api.docs.tago.io/#intro>>. Citado na página 62.

TagoIO. **Widgets Overview**. 2023. Online. Assesado em 26/09/2023. Disponível em: <<https://help.tago.io/portal/en/kb/articles/18-widgets-overview>>. Citado na página 62.

Texas Instruments. **Understanding the I2C Bus**. 2015. Online. Assesado em 08/11/2023. Disponível em: <[https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf?ts=1699346343144&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf?ts=1699346343144&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)>. Citado na página 41.

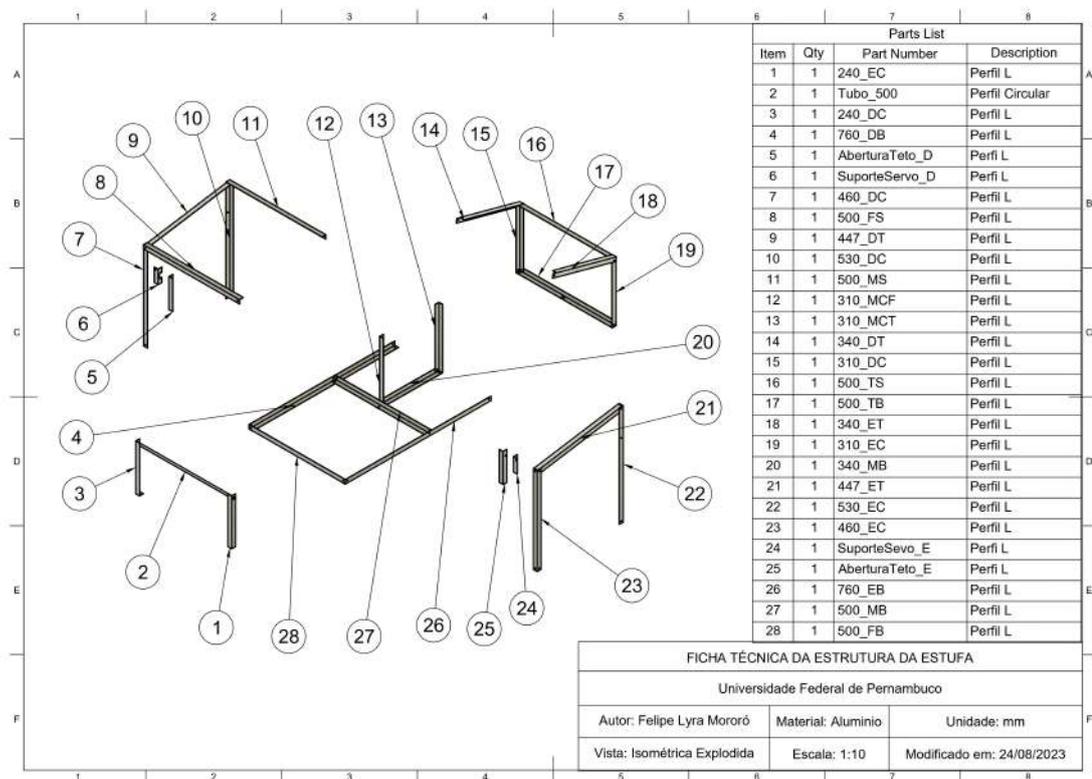
VALENTE, F. J.; NETO, A. C. Intelligent steel inventory tracking with IoT / RFID. In: **2017 IEEE International Conference on RFID Technology & Application (RFID-TA)**. IEEE, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/rfid-ta.2017.8098639>>. Citado na página 15.

## APÊNDICE A – FICHA TÉCNICA DA ESTRUTURA DE ALUMÍNIO DO PROTÓTIPO DE ESTUFA

### DIMENSÕES DOS PERFIS DE ALUMÍNIO

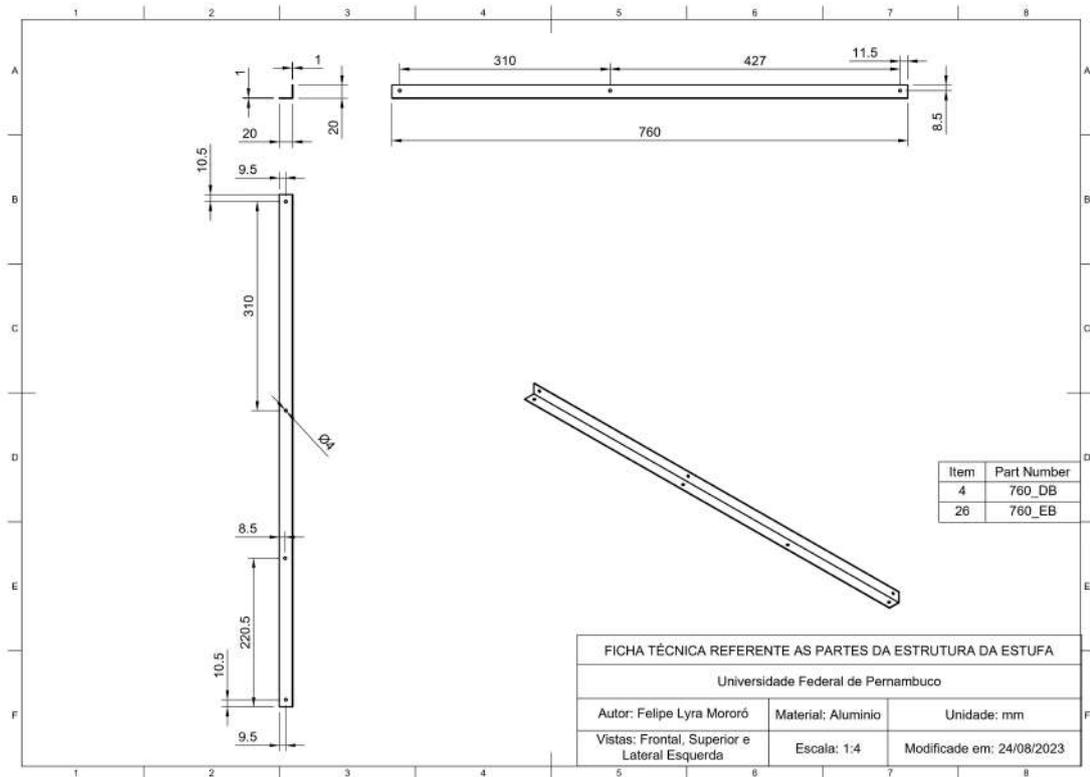
Neste apêndice, é apresentado uma ficha técnica completa que inclui as medidas de cada perfil de alumínio utilizado na estrutura destinada à fabricação e montagem do protótipo de estufa, conforme descrito na seção 3.1.

Figura 45 – Vista explodida e numeração de cada perfil de alumínio da estrutura.



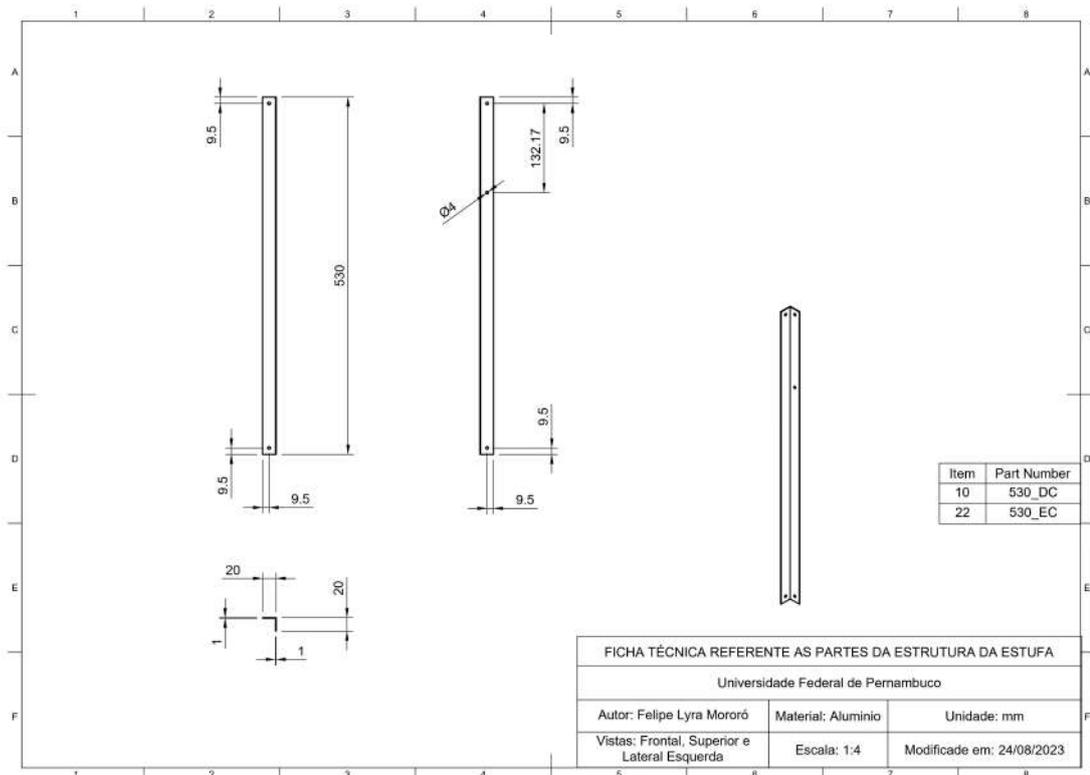
Fonte: Autoria própria.

Figura 46 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 4 e 26.



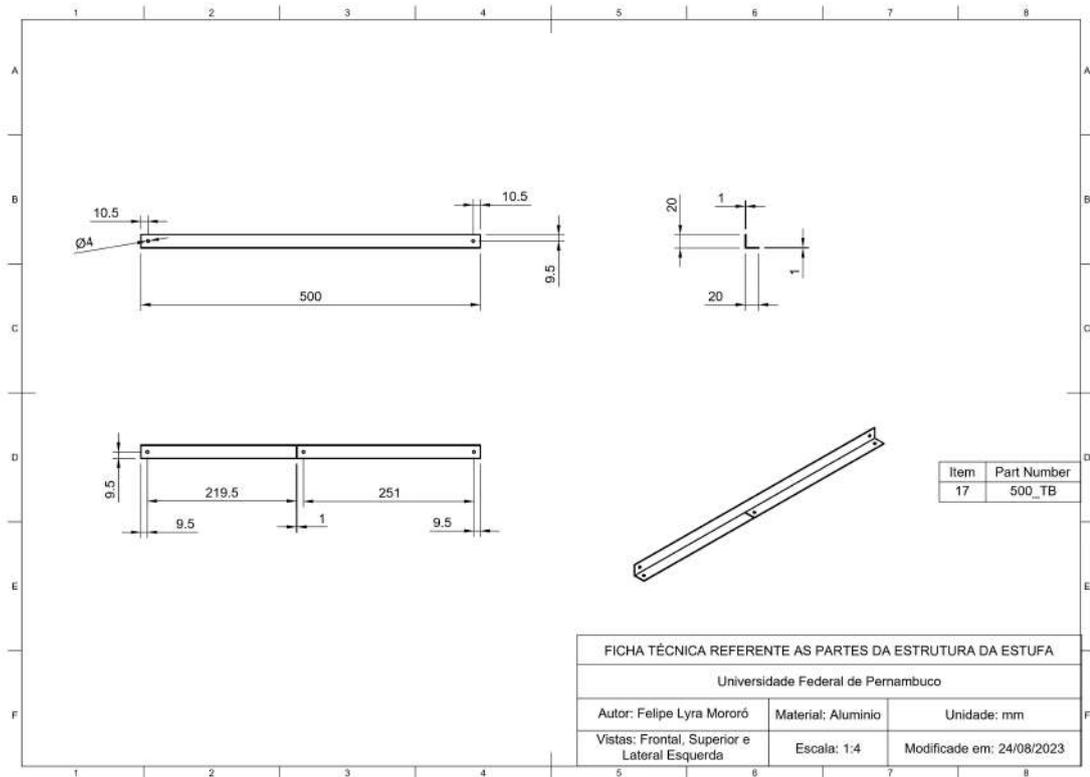
Fonte: Autoria própria.

Figura 47 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 10 e 22.



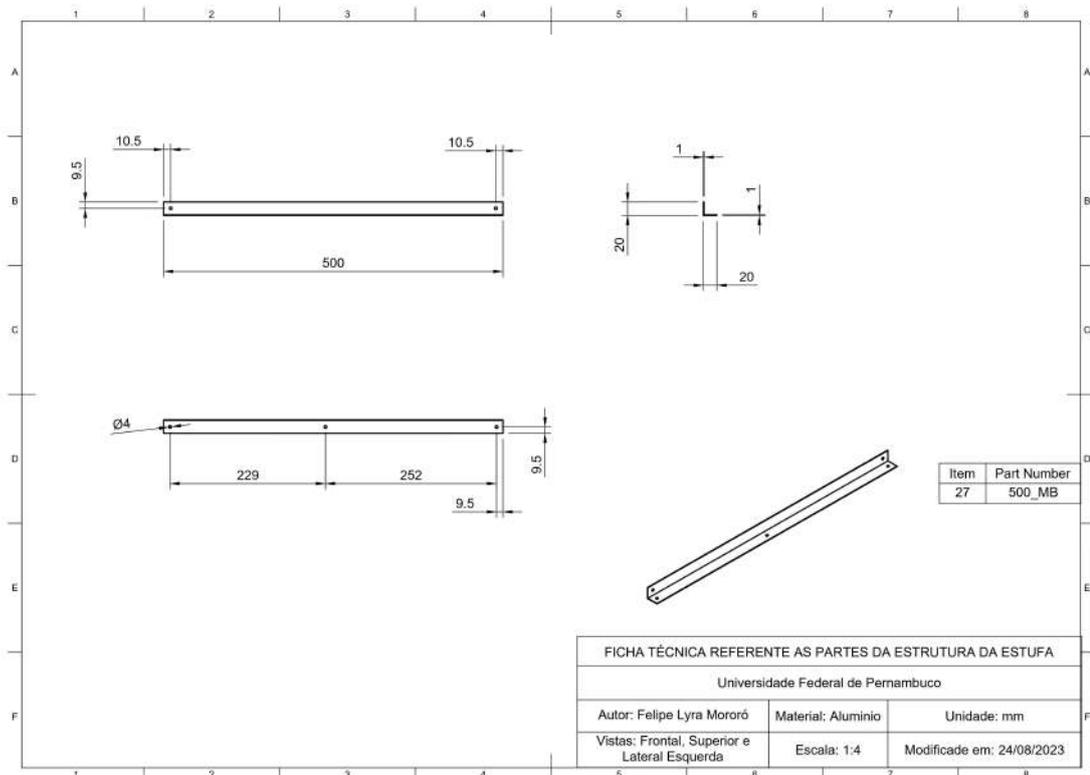
Fonte: Autoria própria.

Figura 48 – Medidas do perfil de alumínio referente ao item de número 17.



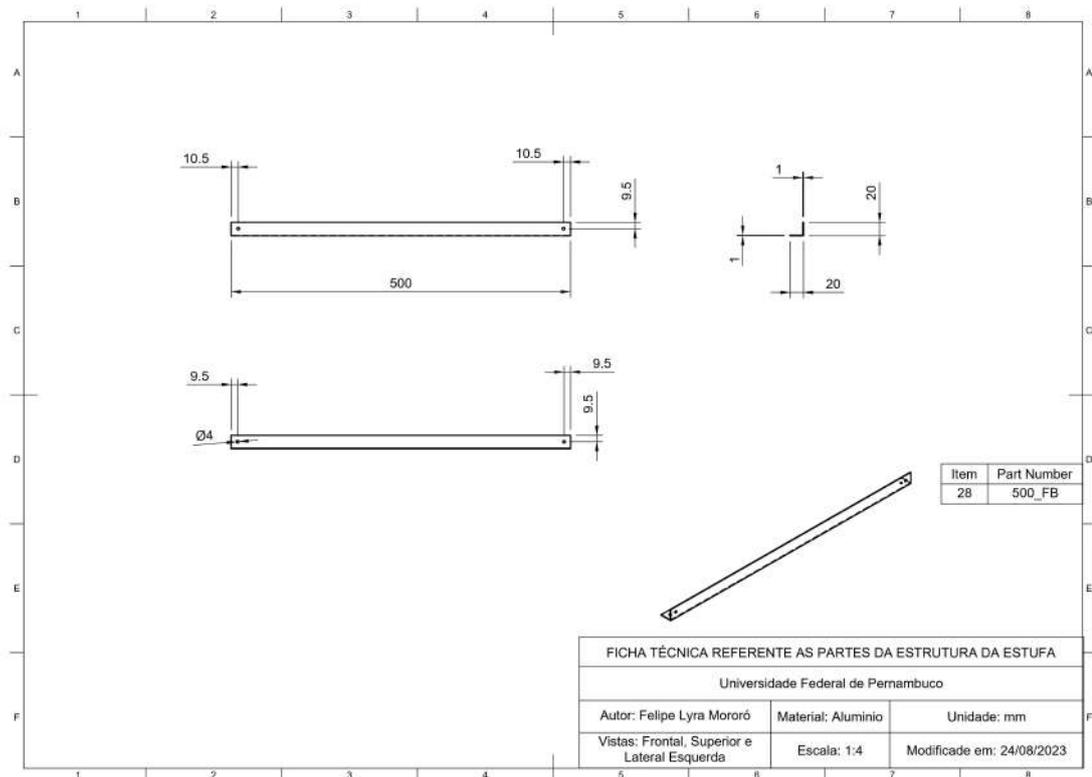
Fonte: Autoria própria.

Figura 49 – Medidas do perfil de alumínio referente ao item de número 27.



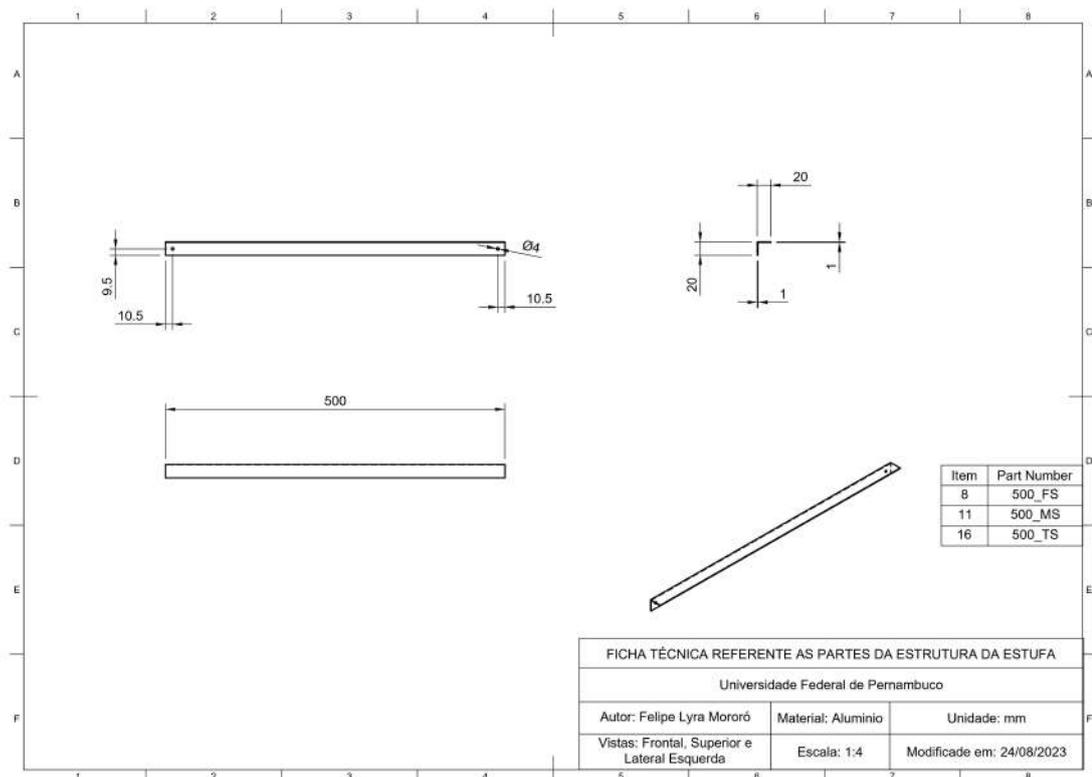
Fonte: Autoria própria.

Figura 50 – Medidas do perfil de alumínio referente ao item de número 28.



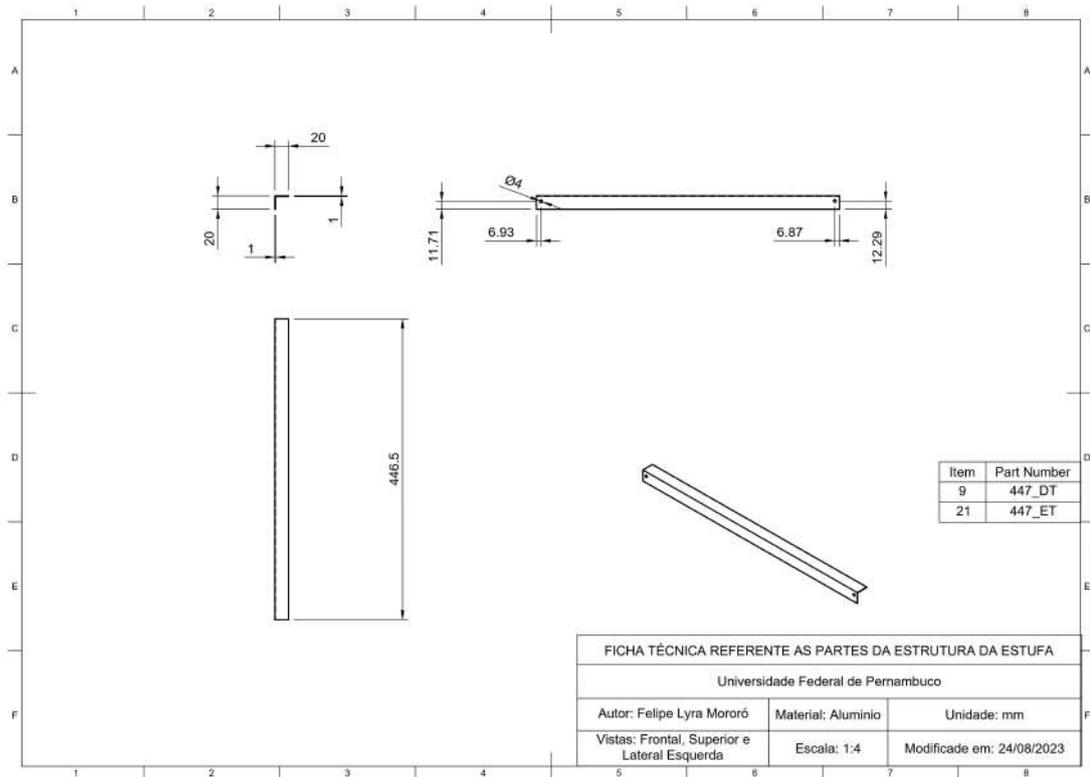
Fonte: Autoria própria.

Figura 51 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 8, 11 e 16.



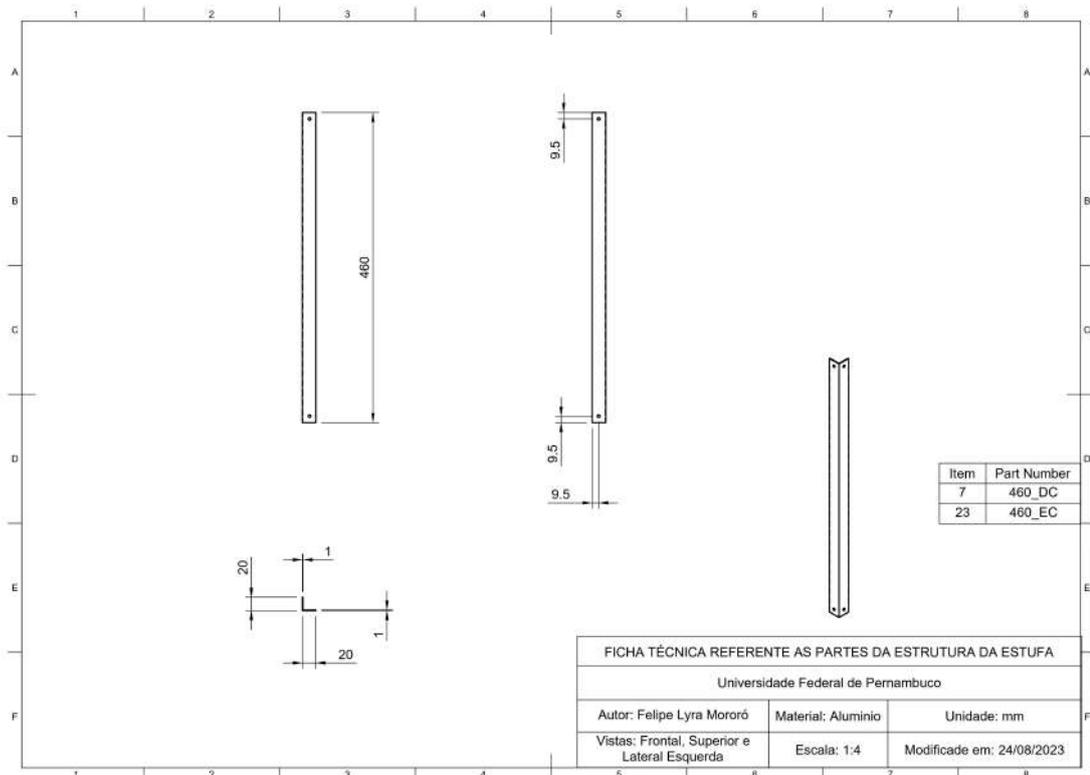
Fonte: Autoria própria.

Figura 52 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 9 e 21.



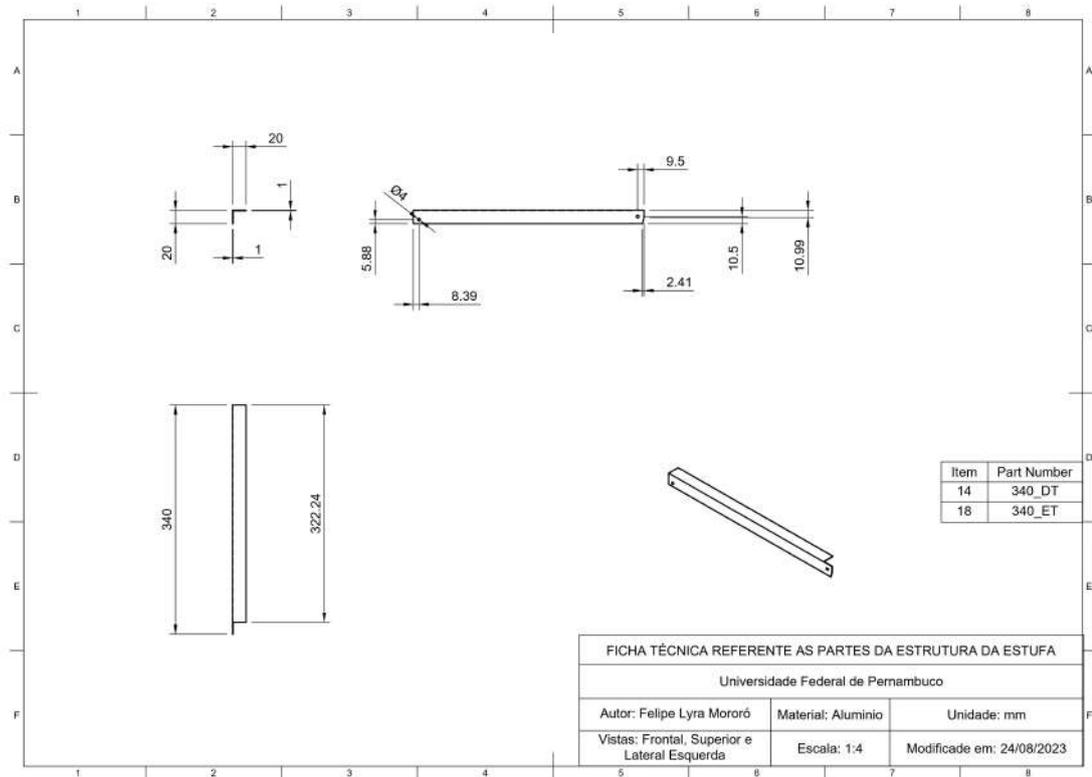
Fonte: Autoria própria.

Figura 53 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 7 e 23.



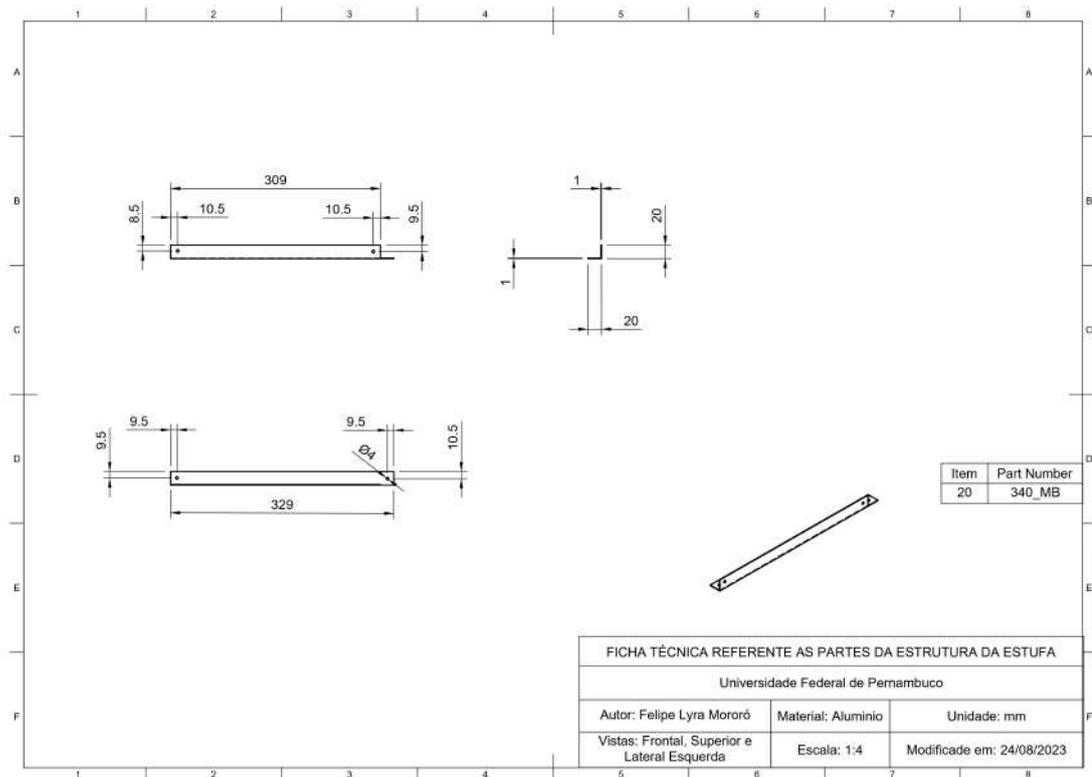
Fonte: Autoria própria.

Figura 54 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 14 e 18.



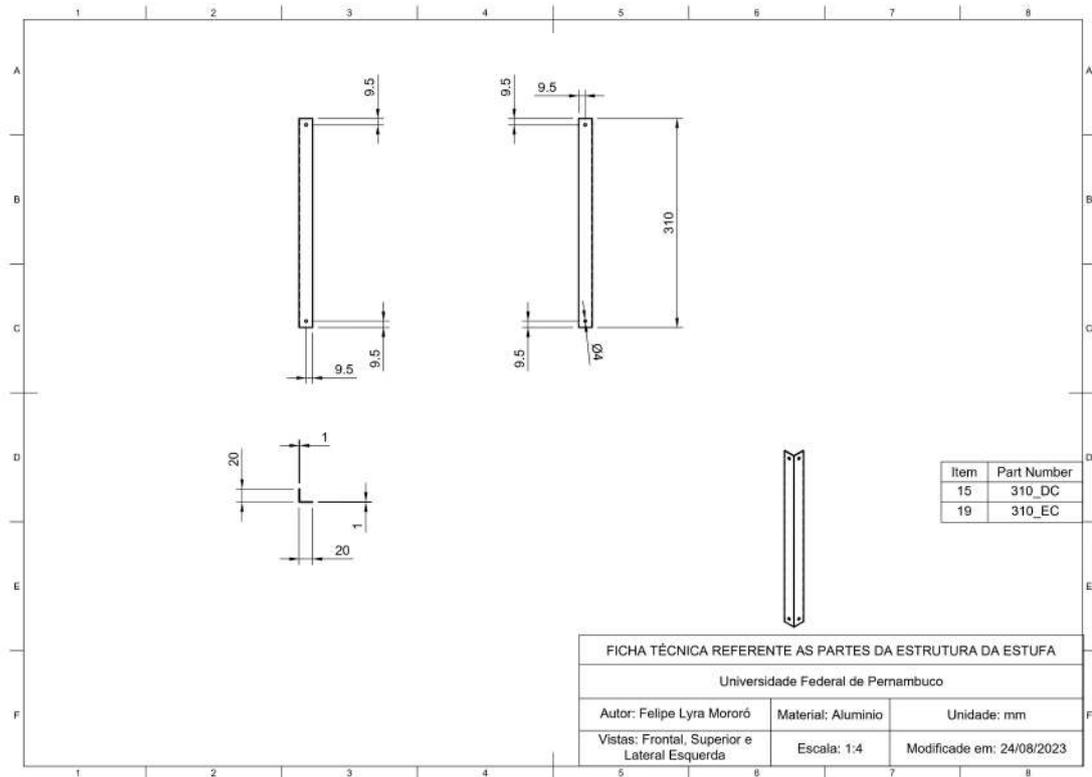
Fonte: Autoria própria.

Figura 55 – Medidas do perfil de alumínio referente ao item de número 20.



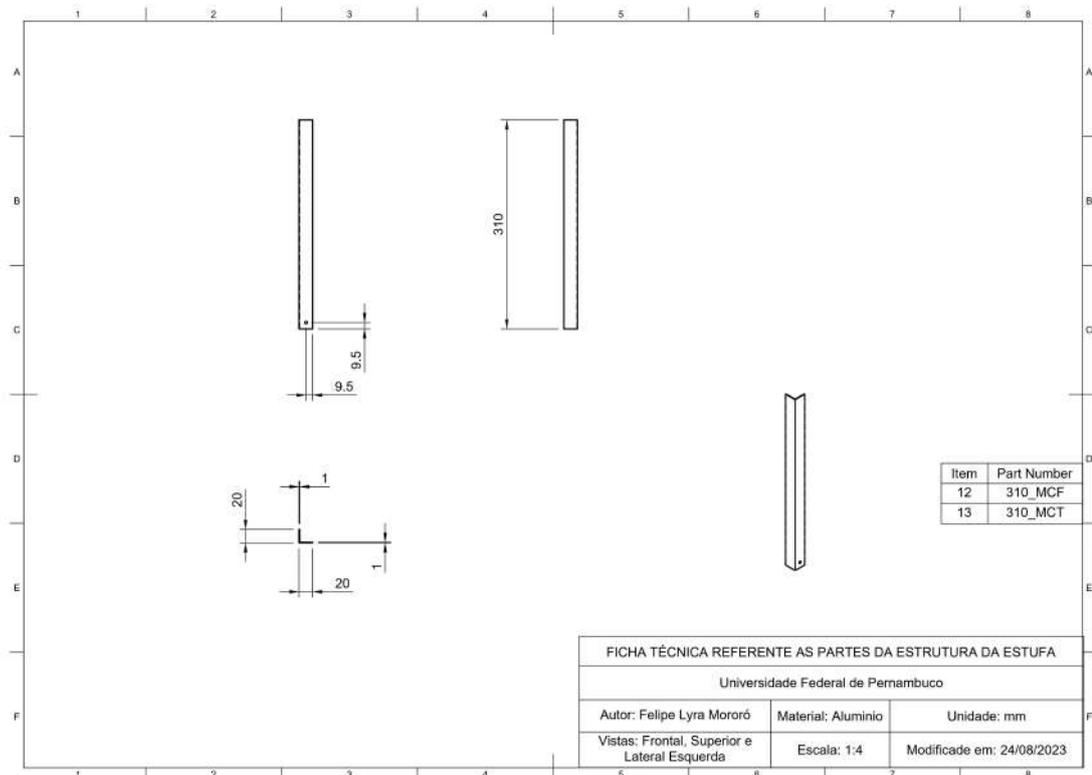
Fonte: Autoria própria.

Figura 56 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 15 e 19.



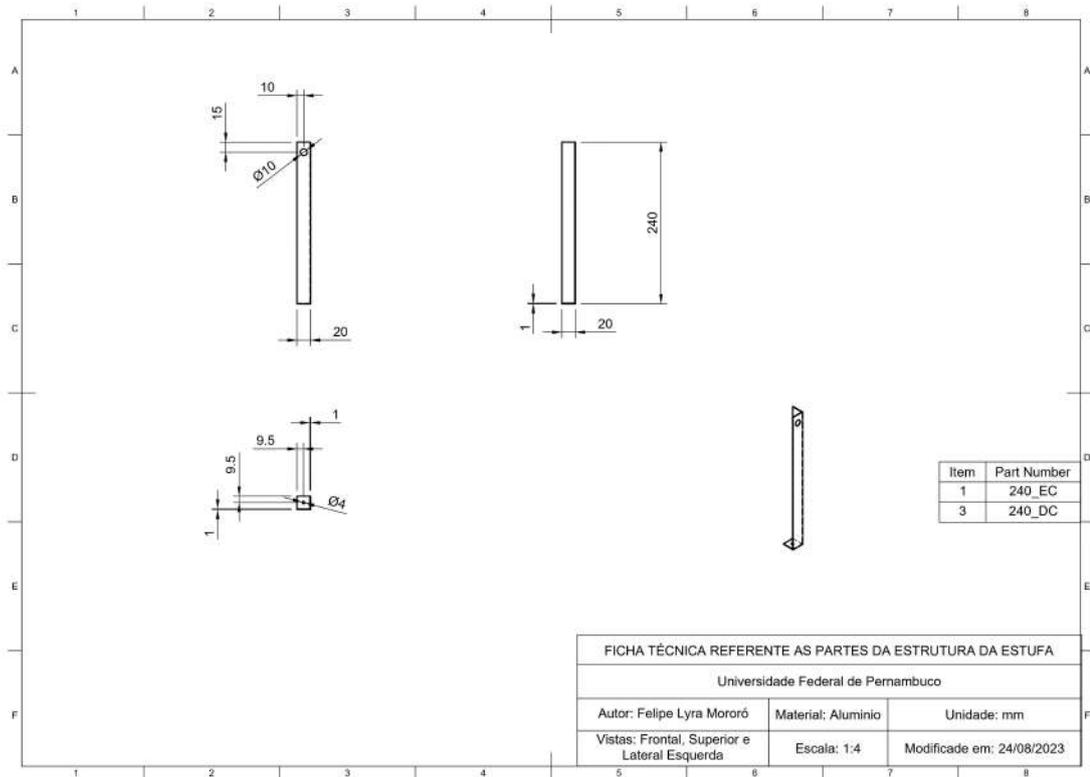
Fonte: Autoria própria.

Figura 57 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 12 e 13.



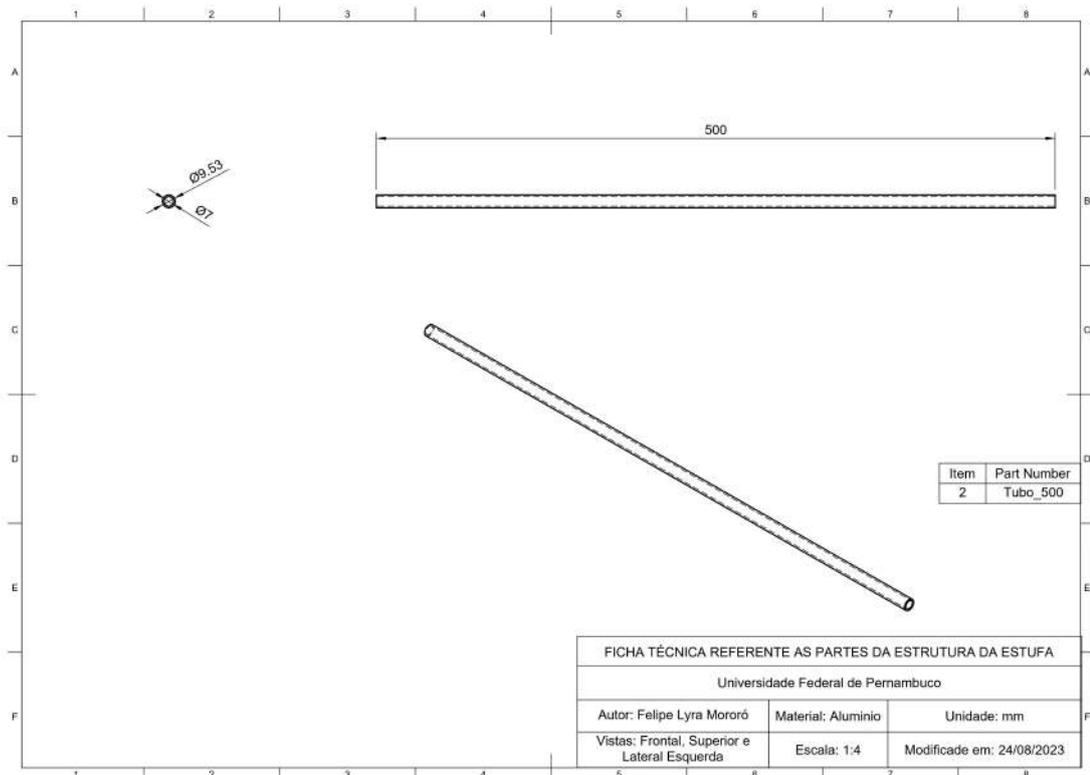
Fonte: Autoria própria.

Figura 58 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 1 e 3.



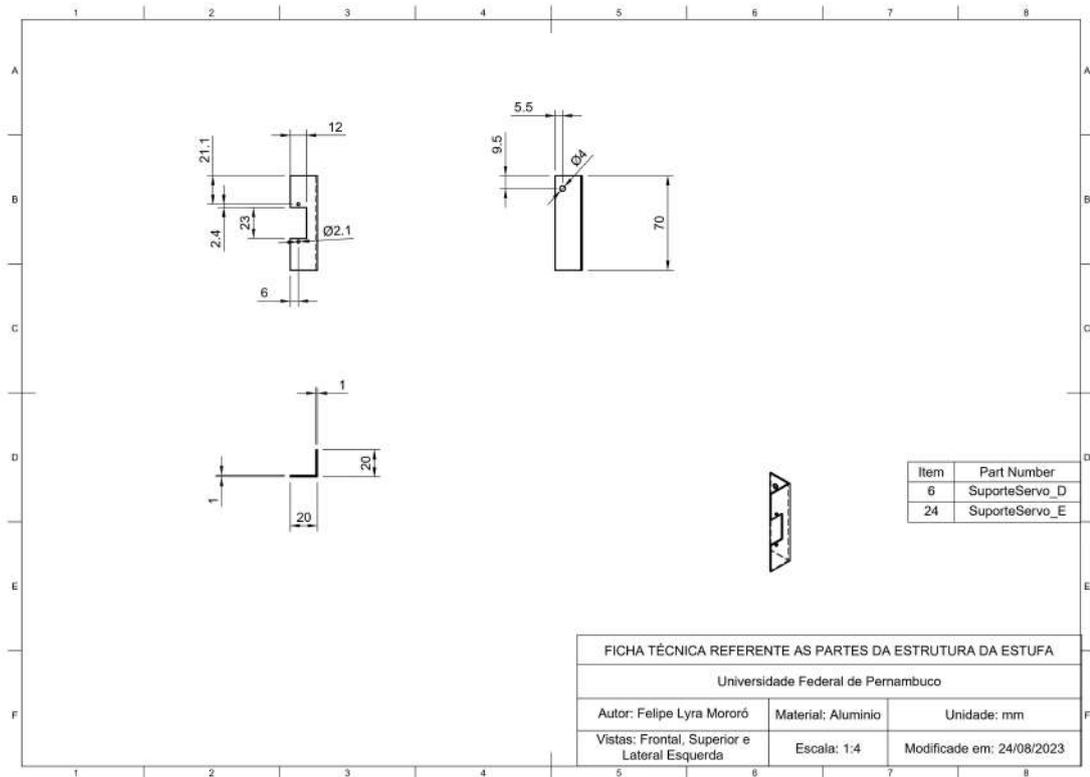
Fonte: Autoria própria.

Figura 59 – Medidas do perfil de alumínio referente ao item de número 2.



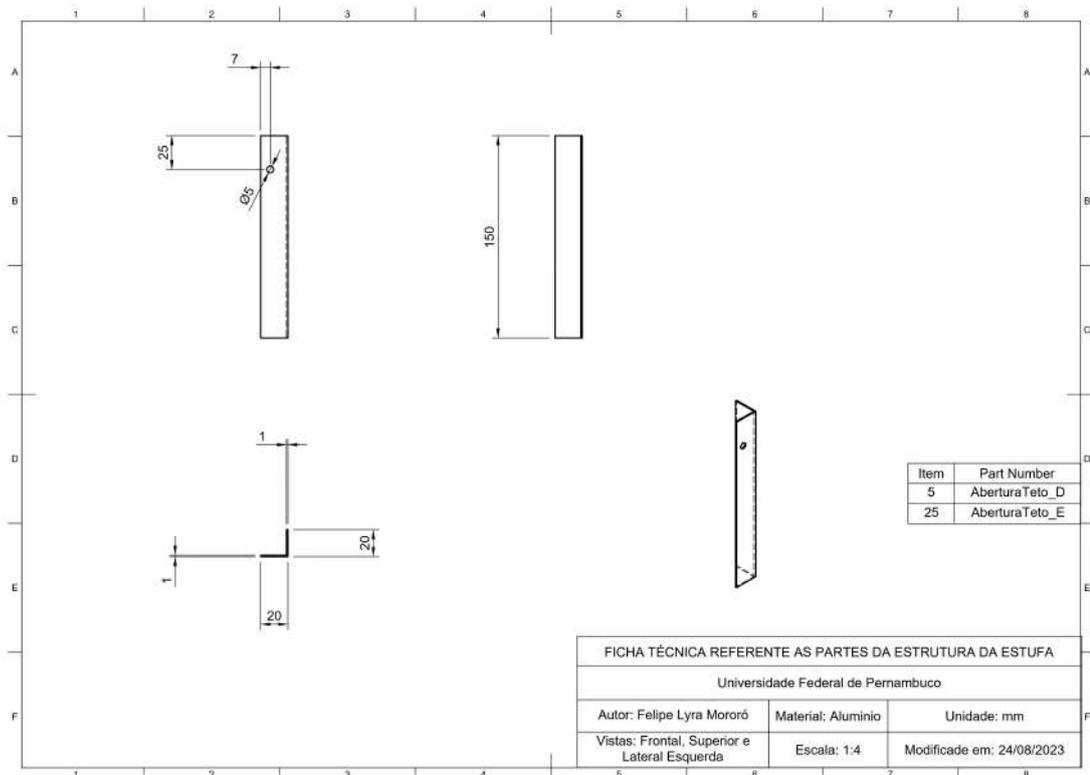
Fonte: Autoria própria.

Figura 60 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 6 e 24.



Fonte: Autoria própria.

Figura 61 – Medidas do perfil de alumínio referentes aos itens de número 5 e 25.



Fonte: Autoria própria.