

**UEA - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS**

**EST - ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA**

**ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**ARLINDO MESSIAS MENDES DA COSTA**

**SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE LONGO ALCANCE PARA SENSORIAMENTO  
EM ÁREA RURAL**

Manaus

2022

**ARLINDO MESSIAS MENDES DA COSTA**

**SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE LONGO ALCANCE PARA SENSORIAMENTO  
EM ÁREA RURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca avaliadora do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Msc. Moisés Pereira Bastos.

Manaus  
2022

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
**Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.**

C837ss Costa, Arlindo Messias Mendes da  
Sistema de transmissão de longo alcance para  
sensoriamento em área rural / Arlindo Messias Mendes  
da Costa. Manaus : [s.n], 2022.  
68 f.: color.; 30 cm.

TCC - Graduação em Engenharia de Controle e  
Automação; - Universidade do Estado do Amazonas,  
Manaus, 2022.

Inclui bibliografia

Orientador: Bastos, Moisés Pereira

1. LoRa. 2. Sensoriamento. 3. Telemetria. 4.  
Estufa. 5. Sistema Supervisório. I. Bastos, Moisés  
Pereira (Orient.). II. Universidade do Estado do  
Amazonas. III. Sistema de transmissão de longo alcance  
para sensoriamento em área rural

**Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463**

# **Sistema de transmissão de longo alcance para sensoriamento em área rural**

ARLINDO MESSIAS MENDES DA COSTA

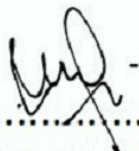
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado por:

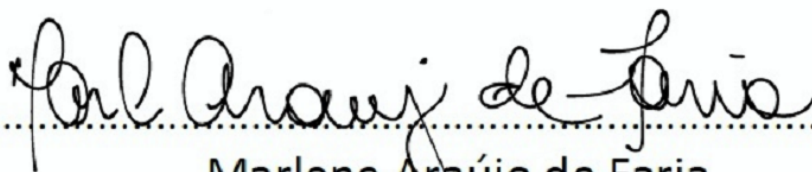
---



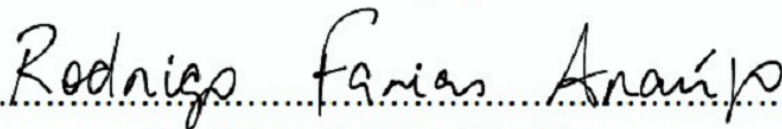
Moisés Pereira Bastos



Israel Mazaira Morales



Marlene Araújo de Faria



Rodrigo Farias Araújo

Avaliador (UEA)

Manaus-AM, 20 de outubro de 2022

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades e para conseguir desenvolver esse trabalho acadêmico.

Agradeço aos meus pais, Arlindo da Costa e Joelma Mendes, pelo amor, incentivo e apoio no decorrer dessa trajetória universitária. Sou grato aos meus irmãos pelo apoio durante esses anos de estudo.

Ao meu orientador, Me. Moisés Pereira Bastos, pelo suporte e pelas orientações durante o desenvolvimento desse trabalho. Sou grato por ter aceitado o convite e me auxiliado da melhor forma para a conclusão deste trabalho.

Agradeço também a todos os meus amigos e colegas que me acompanharam e me ajudaram nessa caminhada acadêmica.

Agradeço à UEA, pela oportunidade de realizar o curso em uma conceituada instituição de ensino e pelo suporte dado ao longo do ensino acadêmico.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação.

## RESUMO

O sensoriamento remoto de variáveis ambientais em áreas rurais geralmente torna-se um desafio devido à dificuldade de acesso às principais redes de comunicação em grande parte dessas regiões. Portanto, uma alternativa é utilizar um sistema baseado na tecnologia LoRa (Long Range), que utiliza a radiofrequência para transmitir dados em aplicações que não necessitam de grandes taxas de transferência. Sendo assim, esse trabalho tem o objetivo de desenvolver um sistema de transmissão utilizando a rede LoRa para monitoramento remoto dos dados de uma estufa localizada no Iranduba (Amazonas). Para a coleta e envio dos dados, foi desenvolvido um módulo emissor utilizando a placa WiFi LoRa 32 (V2), os sensores DHT22, LDR e de umidade do solo. Para receber e tratar as informações, foi elaborado um módulo receptor com base na mesma placa microcontroladora, que encaminha os dados pela comunicação serial até o computador com o sistema supervisório feito no LabVIEW para exibição dos dados da estufa. Após a realização de testes do sistema, foi possível obter resultados satisfatórios, apresentando alcance de 1204,7 metros com RSSI de -118,1 dBm e SNR de -9,43 dB. Dessa forma, o sistema foi capaz de realizar a coleta dos dados da estufa, transmitir as informações via LoRa e as exibir de forma gráfica para o usuário por meio do sistema supervisório.

Palavras-chave: LoRa, Sensoriamento, Telemetria, Estufa, Sistema Supervisório.

## ABSTRACT

The remote sensing of environmental variables in rural areas generally becomes a challenge due to difficult access to the main communication networks in most of these regions. Therefore, an alternative is to use a system based on LoRa (Long Range) technology, which uses radiofrequency to transmit data in applications that do not require high transfer rates. Therefore, this work aims to develop a transmission system using the LoRa network for remote monitoring of data from a greenhouse located in Iranduba (Amazonas). To collect and send the data, an emitter module was developed using the WiFi LoRa 32 (V2) board, the DHT22, LDR and soil moisture sensors. To receive and process the information, a receiver module was created based on the same microcontroller board, which forwards the data through serial communication to the computer with the supervisory system made in LabVIEW for displaying the greenhouse data. After performing system tests, it was possible to obtain satisfactory results, with a range of 1204.7 meters with RSSI of -118.1 dBm and SNR of -9.43 dB. In this way, the system was able to collect data from the greenhouse, transmit the information via LoRa and display it graphically to the user through the supervisory system.

Keywords: LoRa, Sensing, Telemetry, Greenhouse, Supervisory System.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tabela de comparação entre as redes sem fio.....	15
Figura 2 - Modulação Chirp Spread Spectrum - CSS .....	16
Figura 3 - Esquema de camada LoRaWAN .....	18
Figura 4 - Estrutura da rede LoRaWAN.....	18
Figura 5 - Módulo sensor DHT22 e componentes internos.....	22
Figura 6 - Descrição dos pinos do sensor DHT22.....	23
Figura 7 - Módulo sensor de luminosidade LDR .....	24
Figura 8 - Componentes e pinagem do módulo sensor de luminosidade LDR.....	24
Figura 9 - Sensor capacitivo de umidade do solo .....	25
Figura 10 - Pinagem do sensor capacitivo de umidade do solo .....	26
Figura 11 - Diagrama em bloco funcional do ESP32.....	27
Figura 12 - Módulo WiFi LoRa 32 (V2).....	28
Figura 13 - Diagrama de pinos do módulo WiFi LoRa 32.....	28
Figura 14 - Exemplo das janelas de programação do LabVIEW .....	29
Figura 15 - Representação de uma impressora 3D de FDM.....	30
Figura 16 - Representação da arquitetura do sistema proposto .....	32
Figura 17 - Estrutura da estufa utilizada no trabalho.....	33
Figura 18 - Módulo WiFi LoRa 32 (V2) utilizado no projeto.....	34
Figura 19 - Módulo sensor DHT22 utilizado no projeto .....	35
Figura 20 - Módulo sensor de luminosidade LDR utilizado no projeto .....	36
Figura 21 - Sensor capacitivo de umidade do solo utilizado no projeto.....	36
Figura 22 - Modelo da antena TX900-XPL23-100 .....	37
Figura 23 - Modelo da antena TX900-XPL-100 .....	38
Figura 24 - Esquema elétrico do módulo sensor de transmissão.....	39
Figura 25 - Montagem do protótipo do módulo emissor.....	40
Figura 26 - Modelagem 3D do módulo emissor com a caixa de proteção .....	40
Figura 27 - Peças da caixa do módulo emissor no software Ultimaker Cura.....	41
Figura 28 - Modelo da Impressora 3D CR-10S Pro .....	42
Figura 29 - Montagem do protótipo do módulo emissor.....	42
Figura 30 - Fluxograma do código do módulo emissor .....	43
Figura 31 – Trecho do código para envio do pacote LoRa de dados .....	44
Figura 32 - Montagem do protótipo do módulo receptor .....	45



Figura 33 - Modelagem 3D do módulo receptor com a caixa de proteção .....	46
Figura 34 - Peças da caixa do módulo receptor no software Ultimaker Cura.....	46
Figura 35 - Montagem do protótipo do módulo receptor .....	47
Figura 36 - Fluxograma do código do módulo receptor.....	48
Figura 37 - Trecho do código do loop do módulo receptor.....	49
Figura 38 - Diagrama em blocos no LabVIEW do sistema de supervisão.....	50
Figura 39 - Partes principais do diagrama em blocos do módulo supervisorio.....	50
Figura 40 - Teste de funcionamento dos sensores com o microcontrolador .....	52
Figura 41 - Formato do pacote de dados enviado.....	53
Figura 42 - Local da realização dos testes de desempenho das antenas.....	54
Figura 43 - Distância entre o ponto O e A.....	54
Figura 44 - Distância entre o ponto O e B.....	55
Figura 45 - Distância entre o ponto O e C.....	56
Figura 46 - Local da realização dos testes de alcance das antenas.....	57
Figura 47 - Alcance da antena 1 para a região definida .....	58
Figura 48 - Alcance da antena 2 para a região definida .....	58
Figura 49 - Alcance da antena 3 para a região definida .....	59
Figura 50 - Tela do sistema de supervisão desenvolvido no LabVIEW .....	60
Figura 51 - Localização dos módulos na aplicação do protótipo .....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados do teste das antenas para o ponto A.....	55
Tabela 2 - Resultados do teste das antenas para o ponto B.....	56
Tabela 3 - Resultados do teste das antenas para o ponto C.....	57
Tabela 4 - Resultados do teste de alcance das antenas.....	59
Tabela 5 - Relação de custos estimados para desenvolvimento do protótipo .....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Analog to Digital Converter
BLE	Bluetooth Low Energy
BW	Bandwidth
CR	Code Rate
CSS	Chirp Spread Spectrum
DAC	Digital to Analog Converter
dB	Decibel
dBm	Decibel por miliwatt
FDM	Fused Deposition Modeling
GPIO	General Purpose Input/Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
IoT	Internet of Things
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LDR	Light Dependent Resistor
LoRa	Long Range
LPWAN	Low Power Wide Area Network
OLED	Organic Light-Emitting Diode
PLA	Ácido Polilático
RF	Radiofrequência
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SF	Spreading Factor
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	12
1.1.1	<b>OBJETIVO GERAL</b>	<b>12</b>
1.1.2	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>12</b>
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>14</b>
2.1	REDES DE COMUNICAÇÃO	14
2.2	REDES DE COMUNICAÇÃO SEM FIO	14
2.2.1	<b>Redes de comunicação sem fio na área rural</b>	<b>15</b>
2.3	REDE LORA	16
2.3.1	<b>Características da rede LoRa</b>	<b>16</b>
2.3.2	<b>LoRaWAN</b>	<b>18</b>
2.3.3	<b>Aplicações das tecnologias LoRa e LoRaWAN</b>	<b>19</b>
2.4	ANTENAS DE TRANSMISSÃO	20
2.5	SENSORIAMENTO NA ÁREA RURAL	20
2.5.1	<b>Aplicações dos sensores</b>	<b>21</b>
2.5.2	<b>Sensores</b>	<b>21</b>
2.5.2.1	Sensor DHT22	22
2.5.2.2	Módulo Sensor de Luminosidade LDR	23
2.5.2.3	Sensor Capacitivo de Umidade do Solo	25
2.6	MICROCONTROLADORES	26
2.6.1	<b>Definição de microcontroladores</b>	<b>26</b>
2.6.2	<b>ESP32</b>	<b>26</b>
2.6.2.1	Módulo WiFi LoRa 32 (V2)	27
2.7	SISTEMA SUPERVISÓRIO	29
2.7.1	<b>LabVIEW</b>	<b>29</b>
2.8	MANUFATURA ADITIVA	30
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>32</b>
3.1	ARQUITETURA DO PROTÓTIPO	32
3.2	CENÁRIO DE APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO	33

3.3 MÓDULO EMISSOR.....	33
3.3.1 Materiais utilizados .....	34
3.3.2 Esquema elétrico .....	39
3.3.3 Montagem do protótipo .....	39
3.3.4 Caixa de proteção para o módulo .....	40
3.3.5 Firmware do módulo emissor .....	43
3.4 MÓDULO RECEPTOR.....	45
3.4.1 Materiais utilizados .....	45
3.4.2 Montagem do protótipo .....	45
3.4.3 Caixa de proteção para o módulo .....	46
3.4.4 Firmware do módulo receptor .....	47
3.5 MÓDULO DE SUPERVISÃO .....	49
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
4.1 TESTES DE DESEMPENHO DAS ANTENAS.....	53
4.2 TESTES DE ALCANCE DAS ANTENAS.....	57
4.3 <i>DASHBOARD</i> DO SISTEMA SUPERVISÓRIO.....	59
4.4 APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO NA ESTUFA .....	60
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>62</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	63
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O monitoramento remoto de variáveis climáticas em áreas rurais torna-se um desafio devido à dificuldade de obter acesso à internet nessas regiões.

É possível desenvolver um sistema de telemetria de longo alcance na área rural baseado na rede LoRa (Long Range), que utiliza a radiofrequência para transmitir informações em aplicações que não necessitam de grandes taxas de transferência de dados.

Na área rural, o monitoramento remoto de variáveis possui diversas aplicações, entre elas, o uso de sensores em estufas para a supervisão de diversas variáveis do ambiente, como temperatura, luminosidade, potencial hidrogeniônico do solo, umidade do solo e do ar.

O monitoramento remoto de variáveis climáticas em áreas rurais apresenta alguns fatores limitantes, já que em grande parte das regiões do campo não há acesso às principais redes de comunicação, como sinal de telefone e internet. De acordo com o Censo Agropecuário de 2017, cerca de 70% das propriedades rurais brasileiras não possuem conexão com a internet. Além disso, as grandes distâncias e a presença de vegetações, dificultam o uso de sistemas que permitem realizar a transmissão de dados nessas regiões.

Sendo assim, é possível aplicar um sistema de transmissão de longo alcance com base na rede LoRa para que dados obtidos em uma estufa possam ser acessados de forma remota. Essa tecnologia facilita o processo de tomada de decisão com base nas informações ambientais para melhor gerenciar a produção, permitindo que o plantio alcance um nível adequado de qualidade.

### 1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

#### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema de telemetria baseado na rede LoRa para longas distâncias em áreas rurais com difícil acesso às principais redes de comunicação para monitoramento remoto de variáveis climáticas.

#### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Realizar levantamento bibliográfico referente às áreas envolvidas no estudo;

- b) Implementar o uso de um microcontrolador em conjunto com sensores;
- c) Realizar a transmissão dos dados por meio da rede LoRa;
- d) Testar diferentes antenas de transmissão de dados visando verificar o desempenho da rede LoRa;
- e) Implementar um sistema supervisor para monitoramento dos dados ambientais de uma estufa;
- f) Testar e avaliar a aplicação do sistema desenvolvido na área rural.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1, são caracterizados os seguintes itens do trabalho: problema de pesquisa, hipótese, justificativa, objetivos gerais e específicos.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos temas relacionados com o trabalho proposto, com o objetivo de mostrar ao leitor uma visão geral sobre os principais tópicos abordados no decorrer do trabalho, além disso, o referencial teórico permite que o leitor tenha um maior entendimento sobre o mesmo.

No capítulo 3, são descritos os principais materiais, as etapas de desenvolvimento do protótipo e as metodologias aplicadas no decorrer do trabalho.

Já no capítulo 4, são apresentados os resultados alcançados durante o desenvolvimento do trabalho.

Por fim, no capítulo 5, apresenta as conclusões com interpretações e comentários sobre os resultados obtidos, além de relatar as considerações finais e os trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 REDES DE COMUNICAÇÃO

As redes de comunicação podem ser definidas como ambientes nos quais diversos dispositivos, enlaces de comunicação e conjuntos de *softwares* permitem que os seres humanos e os equipamentos possam realizar a transmissão de informações. São estruturas capazes de suportar as transformações tecnológicas para o transporte de diversos tipos de informações entre dois pontos quaisquer no ambiente na rede, como arquivos de texto, imagens, vídeos, sinais de TV, sinais de controle, voz e entre outros (DANTAS, 2010).

### 2.2 REDES DE COMUNICAÇÃO SEM FIO

A rede de comunicação sem fio é uma solução aplicada em lugares onde a infraestrutura não permite o uso convencional de cabos. A comunicação sem fio surgiu com o objetivo de suprir as limitações causadas pelo uso de cabeamento (SOUZA, 2016).

Esse tipo de tecnologia oferece diversas vantagens em comparação com as redes que utilizam cabos, como: mais mobilidade, são mais flexíveis e possuem uma instalação rápida e fácil. Entretanto, é importante estar atento em relação à alguns fatores que impactam as redes sem fio: desempenho, gerenciamento, interferências na comunicação e a segurança das informações (SOUZA, 2016).

A seguir são comentadas algumas das principais tecnologias sem fio utilizadas:

- **WiFi:** O WiFi é baseado no protocolo IEEE 802.11, esse protocolo foi projetado para fornecer comunicação sem fio com grande largura de banda. Essa tecnologia possibilita a conexão sem fio com uma grande taxa de transferência de dados. Os sinais de rádio são transmitidos pelo roteador para dispositivos que possuem placas de rede compatíveis, como celulares ou computadores (RONCHI, 2020).
- **Bluetooth Low Energy (BLE):** é uma atualização do *Bluetooth* original com foco na economia de energia. O BLE trabalha na frequência de 2,4 GHz e alcance máximo de 50 metros. Entre as topologias dessa rede estão a P2P (ponto a ponto entre dois dispositivos), estrela (vários dispositivos conectados com um central) e malha (vários dispositivos conectados entre si). Possui pequena área de cobertura que limita certas aplicações com grande fluxo de dados (ROSSATO, 2019).



- ZigBee: De acordo com RONCHI (2020), é um padrão de comunicação sem fio projetado para aplicações de baixo consumo de energia e custo reduzido na sua implementação. É capaz de cobrir um raio de aproximadamente 100 metros, com uma taxa máxima transmissão de 250 kbps. Além disso, a rede ZigBee pode trabalhar nas topologias estrela, árvore e malha.
- LoRaWAN: Para ROSSATO (2019), é um protocolo de comunicação aberto para a rede que opera sobre a camada física LoRa. É uma tecnologia que utiliza a modulação de radiofrequência (RF) com base no espalhamento de espectral de chirp, que permite cobrir longas distâncias de comunicação e normalmente utiliza a topologia estrela nas suas aplicações. É importante citar que o alcance máximo da camada física LoRa varia de acordo com a topologia e antenas utilizadas, podendo apresentar alcance inferior ao indicado na Figura 1.

A Figura 1 relaciona as principais informações de algumas das redes sem fio mais utilizadas, como alcance máximo e frequência de operação da rede.

Figura 1 - Tabela de comparação entre as redes sem fio

Protocolo	Alcance	Frequência	Taxa	Topologia
Wi-Fi	50 m	2,4/5 Ghz	1.300 Mbps	Estrela
BLE	80 m	2,4 Ghz	1 Mbps	Estrela/Malha
ZigBee	100 m	915 MHz/2,4 GHz	250 kbps	Estrela/Malha
NB-IoT	35 km	700 MHz/1,8/2,1/2,5 GHz	170-250 kbps	Estrela
SigFox	3-50 km	868/902 MHz	10-1.000 pbs	Estrela
LoRaWAN	2-40 km	915 MHz (Brasil)	0,3-50 kbps	Estrela

Fonte: ROSSATO, 2019

### 2.2.1 Redes de comunicação sem fio na área rural

A conectividade dos dispositivos para sensoriamento tem sido feita por tecnologias de curto alcance como WiFi e *Bluetooth*, ou por redes de longo alcance como GSM 3G/4G, porém essas tecnologias são ineficientes para aplicações que necessitam ser realizadas em locais sem acesso à essas principais redes de comunicação ou em casos onde espera-se um baixo consumo de energia, como é o caso de grande parte das áreas rurais no Brasil (FARIA; CAVAZOTTI, 2019).

Dessa forma, as redes LPWAN's (*Low Power Wide Area Network* - rede de longa distância de baixa potência) surgem como uma alternativa para as aplicações com foco em baixo consumo de energia e longo alcance, um setor do mercado que não é coberto pelas tecnologias sem fio tradicionais (WiFi, 3G/4G) de forma satisfatória (FARIA; CAVAZOTTI, 2019).

De acordo com FARIA E CAVAZOTTI (2019), essa tecnologia é recomendada para casos onde não são transmitidos grandes volumes de dados, há tolerância para atrasos e onde

os equipamentos podem trabalhar com baixo consumo de energia. A tecnologia LPWAN mais utilizada é a tecnologia LoRa.

## 2.3 REDE LORA

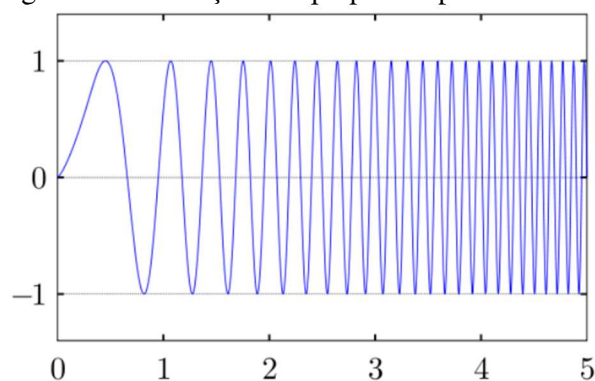
LoRa é uma sigla de *Long Range*, que traduzido do inglês significa “Longo alcance”, essa é uma tecnologia de rede de comunicação sem fio desenvolvida pela *Semtech Corporation* e promovida pela *LoRa Alliance*, que é uma associação sem fins lucrativos e aberta, onde diversas empresas ao redor do mundo participam. O objetivo em comum dessas companhias é o desenvolvimento e aplicação da rede LoRa na Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*) (TEIXEIRA; ALMEIDA, 2017).

### 2.3.1 Características da rede LoRa

A rede LoRa é comumente formada por uma topologia que usa um número reduzido de dispositivos, sendo um deles o *endpoint* LoRa, principal responsável em receber os dados obtidos dos sensores e em seguida, faz a transmissão das informações para o *gateway* via rede LoRa. O *gateway* pode enviar os dados recebidos para os servidores de rede, que realizam o tratamento dos dados e retornam uma resposta quando necessário (SCHWAB, 2020).

O LoRa utiliza a modulação de radiofrequência (RF) com base no espalhamento de espectral de *chirp* (*Chirp Spread Spectrum* - CSS), essa técnica é utilizada na comunicação militar e espacial que possibilita alcançar longas distâncias de comunicação e obtendo resistência à interferência. A técnica de CSS viabiliza transformar o sinal gerado em uma banda estabelecida e o espalhar no domínio da frequência utilizando pouca energia para transmissão de dados. O pulso de *chirp* pode ser definido como um sinal senoidal que diminui e aumenta a sua frequência com o passar do tempo em função de um sinal de informação, conforme ilustrado na Figura 2 (ROSSATO, 2019).

Figura 2 - Modulação Chirp Spread Spectrum - CSS



Fonte: WERNER, 2018

De acordo com DELLALIBERA (2018), há três parâmetros configuráveis que influenciam diretamente na taxa de transmissão LoRa:

- Fator de Espalhamento (*Spreading Factor*, SF) é um valor que varia de 7 à 12 e determina o número de *chirps* necessários para representar um símbolo. É determinado pela razão entre a taxa de *chirp*  $R_C$  (é o número de *chirps* transmitidos ou recebidos por unidade de tempo) e a taxa de símbolo  $R_S$  (é o número de mudanças de símbolos por unidade de tempo). Ou seja:

$$SF = \log_2(R_C/R_S). \quad (1)$$

- Largura de Banda (*Bandwidth*, BW) é definida pela diferença entre a frequência máxima e mínima do sinal trabalhado, da seguinte maneira:

$$BW = f_{max} - f_{min} \quad (2)$$

E o valor de BW pode variar em 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz.

- Taxa de código (*Code Rate*, CR): a unidade de medida para esse parâmetro é bps (bits por segundo) e pode ser dada por:

$$CR = \frac{4}{4+n}. \quad (3)$$

onde  $n \in \{1, 2, 3, 4\}$ .

Com base nos parâmetros citados, pode-se definir a taxa de bits útil ( $R_B$ ) como sendo:

$$R_B = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times CR. \quad (4)$$

Para uma transmissão sem fio apresentar qualidade, é importante observar dois fatores: o receptor precisa de uma boa intensidade de sinal e uma relação sinal-ruído para separar o sinal original da portadora modulada. O RSSI (Indicador de intensidade do sinal recebido) e SNR (relação sinal-ruído) são os indicadores mais conhecidos para essa análise (The Things Network, 2022).

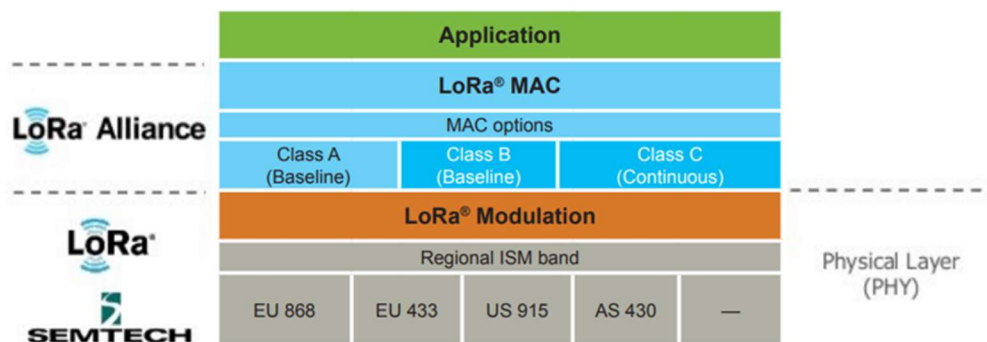
O RSSI é uma medida relativa que ajuda a determinar se o sinal recebido é forte o suficiente para obter uma boa conexão sem fio do transmissor. Esse indicador é medido em dBm (decibel por miliwatt) e quanto mais próximo o valor de RSSI estiver de zero, o sinal recebido é mais forte. Essa métrica é afetada principalmente pelas perdas do caminho, ganho da antena e perdas nos cabos e conectores (The Things Network, 2022).

Já o SNR é a relação entre a potência do sinal recebido e o piso de ruído, é comumente usado para determinar a qualidade do sinal recebido, geralmente expresso em dB (decibéis). O SNR positivo significa que a potência do sinal é maior que a potência do ruído, ou seja, o receptor será capaz de demodular o sinal (The Things Network, 2022).

### 2.3.2 LoRaWAN

O protocolo LoRaWAN foi desenvolvido para ser utilizado em conjunto com a camada física do LoRa, enquanto o protocolo define a comunicação e arquitetura do sistema, a camada física é responsável em habilitar o *link* de comunicação de longo alcance. O protocolo e a arquitetura de rede têm a maior influência na determinação na capacidade da rede, na qualidade do serviço, a segurança e a variedade de aplicativos servidos pela rede (ALLIANCE, 2015). A Figura 3 ilustra a organização das camadas no protocolo LoRaWAN.

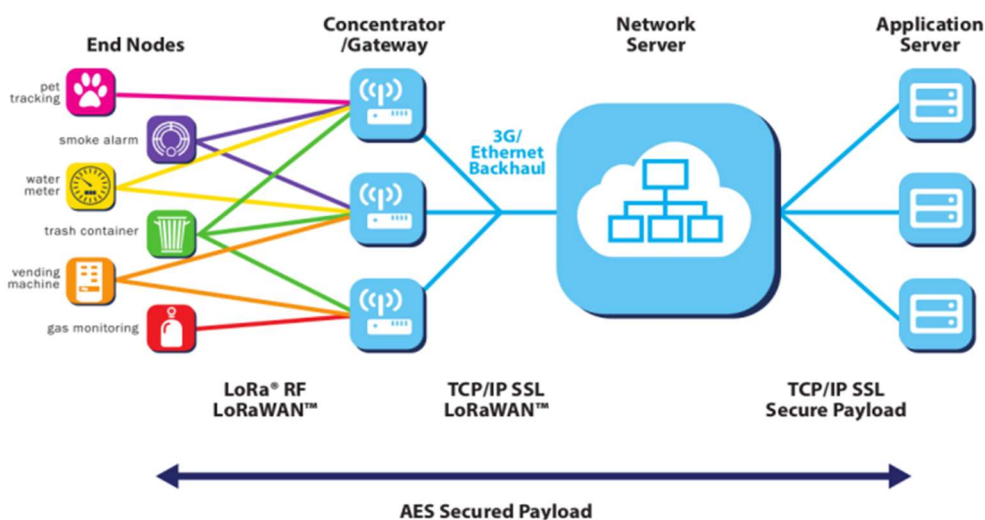
Figura 3 - Esquema de camada LoRaWAN



Fonte: DELLALIBERA, 2018

O LoRaWAN é um protocolo de comunicação aberto para a rede que é feita sobre a camada física LoRa. As regras desse protocolo são regidas pela *LoRa Alliance*, grupo formado por diversas empresas da área, como IBM, *Actility*, *Semtech* e *Microchip*. Normalmente é utilizado a topologia estrela para esse protocolo, conforme mostrado na Figura 4 (SANT'ANA, 2017).

Figura 4 - Estrutura da rede LoRaWAN



Fonte: ROSSATO, 2019

Pode-se observar os tipos de dispositivos existentes na estrutura típica na rede LoRaWAN (ROSSATO, 2019):

- Os *End Nodes* (dispositivos finais): realizam a aquisição de dados por meio de sensores e se comunicam com um ou mais *gateways* da rede.
- *Gateway* (Concentrador): é responsável em se conectar com vários dispositivos finais via LoRa e o protocolo LoRaWAN. Recebe os dados dos *end nodes* e os envia para o *Network Server* (servidor da rede LoRaWAN).
- *Network Server*: são os servidores que fazem o gerenciamento da rede, recebem as informações dos *gateways* e encaminha para os servidores de aplicação.
- *Application Server* (servidores de aplicação): é o caminho final dos pacotes de dados provenientes dos dispositivos finais. Após o devido tratamento das informações, os dados podem ser exibidos através de *softwares* específicos para o usuário.

### 2.3.3 Aplicações das tecnologias LoRa e LoRaWAN

A proposta do LoRa é viabilizar uma tecnologia de comunicação sem fio que atenda as condições de ter um baixo consumo de energia, baixo custo, vasta área de cobertura e baixa taxa de transmissão. Além disso, essa comunicação deve ocorrer entre dispositivos separados por uma longa distância sem a necessidade de sistemas complexos de transmissores e receptores (DE OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Segundo SCHWAB (2020), para considerar o uso da tecnologia LoRa em determinadas aplicações, é necessário considerar alguns requisitos, como a baixa transmissão de dados e longo alcance. Entre algumas das aplicações compatíveis com essas características estão as soluções direcionadas para cidades inteligentes, como por exemplo: medição inteligente de gás, água, eletricidade, monitoramento de condições ambientais como poluição e clima.

De acordo com DE OLIVEIRA *et al.* (2018), há diversas aplicações para a tecnologia LoRa atualmente:

- Aplicações em *Smart Cities*: rastreamento de veículos, monitoramento da qualidade do ar, monitoramento do congestionamento urbano, gerenciamento do lixo, controle de vagas de estacionamento e monitoramento de condições veiculares.
- Aplicações em *Smart Grids*: monitoramento de energia e controle de temperatura em componentes relacionados a linhas de transmissão de energia.

- Aplicações em *Smart Farms*: monitoramento de plantações, consumo de água, energia consumida por painéis solares e monitoramento da temperatura em animais de fazenda.
- Aplicações em *Health Care*: monitoramento de frequência cardíaca e respiração, monitoramento de pacientes em centros de saúde e monitoramento de condições físicas de atletas.

## 2.4 ANTENAS DE TRANSMISSÃO

De acordo com MOTA (2017), as antenas podem ser definidas como dispositivos utilizados para transmitir e/ou receber ondas eletromagnéticas. Elas são desenvolvidas para trabalharem em determinada faixa de frequência, de forma que fora desse intervalo, a antena atenua fortemente o sinal ou o ignore completamente.

Antenas são dispositivos para a emissão ou a recepção de ondas de rádio, ou seja, é uma estrutura capaz de transmitir e receber sinais utilizando o ambiente como meio de propagação. Sendo assim, não há necessidade de usar linhas de transmissão e guias de onda (SILVA; MOURA, 2013).

As antenas podem ser de diferentes tipos: Yagi, Log-Periodica, Dipolo e outras. Além do mais, elas podem ser usadas em diversas aplicações, como: transmissão de rádio, televisão, sistema de celular e outros (MOTA, 2017).

Para MOURA (2013), há alguns parâmetros importantes na análise antenas:

- Ganho: o ganho de uma antena é definido como o produto da diretividade pela eficiência da radiação.
- Largura de Banda: é definida como a faixa de frequência na qual a antena apresenta parâmetros que atendem uma série de especificações.
- Polarização: é definida como a curva descrita pelo campo elétrico no decorrer do tempo, para um determinado ponto fixo no espaço.
- Diretividade: ela indica o quanto de potência a antena irá enviar para uma certa direção.

## 2.5 SENSORIAMENTO NA ÁREA RURAL

A agricultura vem evoluindo junto com os avanços tecnológicos do homem ao longo dos anos. Além disso, o controle da qualidade e o conhecimento da variação dos índices de produção são condições primordiais para o bom desenvolvimento de qualquer cultura agrícola.

Dessa forma, é importante o trabalho da coleta contínua de dados para que as decisões tomadas possam estar de acordo com a real necessidade do cultivo (FARIA; CAVAZOTTI, 2019).

As condições climáticas são fatores que afetam diretamente a agricultura, e o aumento da temperatura global torna-se um agravante desses efeitos. Dessa forma, o cultivo em ambientes protegidos surge como uma alternativa para minimizar os impactos causados pela variação climática, visto que o cultivo em estufas permite um certo controle sobre as condições do ambiente, principalmente luminosidade, temperatura, umidade do ar, entre outros (DA COSTA *et al.*, 2021).

### **2.5.1 Aplicações dos sensores**

Um das aplicações mais comuns de sensoriamento em área rural é no controle do ambiente de estufas. As estufas agrícolas são usadas em plantações para fornecer uma proteção contra as variações climáticas e para amenizar as variações imprevistas de temperatura e umidade. Além do uso de sensores, é interessante utilizar dispositivos atuadores, que são capazes de alterar as condições ambientais, como ventiladores, aquecedores, entre outros (SAMPAIO, 2016).

O uso de estufas possibilita o aumento na qualidade dos produtos e aumento na produtividade. Porém, é necessário proporcionar as condições favoráveis para o desenvolvimento das plantas de forma contínua. Sendo assim, é imprescindível que haja um controle preciso na estufa para prover as condições adequadas. Desse modo, é importante o uso de tecnologias nesse processo, pois permite o controle e monitoramento de forma remota, principalmente em casos em que as estufas estão em locais de difícil acesso (DA COSTA *et al.*, 2021).

### **2.5.2 Sensores**

Um sensor pode ser definido como um componente ou dispositivo capaz de ler e obter dados do ambiente. Os sensores podem identificar a variação dos sinais de diferentes fenômenos físicos, como temperatura, umidade, luminosidade, entre outros (MARTINAZZO; ORLANDO, 2016). Para o sensoriamento em área rural aplicado ao ambiente de estufas agrícolas, podem ser considerados algumas variáveis mais relevantes:

- Umidade do solo: Existem dois métodos para medir a umidade do solo: o método direto e o método indireto. O método direto necessita de uma análise em laboratório e consequentemente, apresenta uma maior precisão e um maior tempo para fornecer o

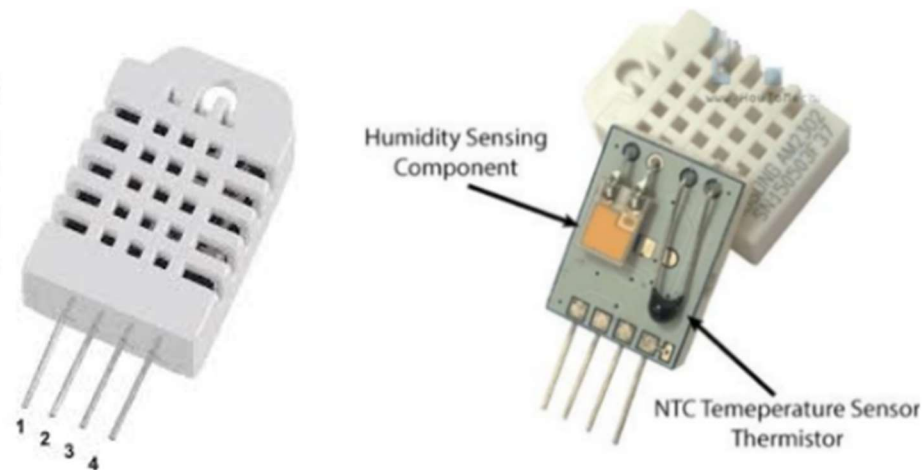
resultado. Já o método indireto usa as propriedades físicas de capacitância ou resistência elétrica para realizar a medição, essas propriedades físicas variam de acordo com a umidade presente no solo. Esse método é o mais popular pois esses tipos de sensores são mais acessíveis no mercado (FARIA; CAVAZOTTI, 2019).

- Temperatura: embora exista uma vasta gama de sensores de temperatura disponíveis no mercado, na maioria das vezes, utilizam-se dispositivos que variam sua resistência em função da temperatura (MARTINAZZO; ORLANDO, 2016).
- Luminosidade: Um dispositivo muito comum para a medição da luminosidade é o LDR (Resistor Dependente da Luz), um componente semiconductor que varia a resistência de acordo com a quantidade de luz que incide sobre ele (JÚNIOR; JÚNIOR, 2013).

#### 2.5.2.1 Sensor DHT22

Um sensor de temperatura e umidade do ar comumente utilizado é o módulo DHT22, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Módulo sensor DHT22 e componentes internos



Fonte: DA SILVEIRA, 2018

Esse módulo possui uma boa estabilidade e confiabilidade, além disso, utiliza a comunicação serial para a transmissão dos dados e pode ser facilmente integrado com os microcontroladores disponíveis no mercado, como Arduino e ESP32 (ALI, 2019).

O sensor possui as seguintes especificações de acordo com o fabricante (AOSONG):

- Modelo: AM2302
- Tensão de operação: 3-5VDC (5,5VDC máximo)

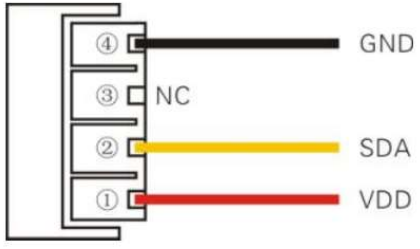


- Faixa de medição de umidade: 0 a 100% UR
- Faixa de medição de temperatura:  $-40^{\circ}$  a  $+80^{\circ}$  °C
- Precisão de umidade de medição:  $\pm 2,0\%$  UR
- Precisão de medição de temperatura:  $\pm 0,5^{\circ}$  °C
- Resolução: 0,1 % UR e 0,1 °C
- Tempo de resposta: 2s
- Dimensões: 25 x 15 x 7 mm (sem os terminais)

Na Figura 6, pode-se observar que o sensor possui 4 pinos disponíveis: VDD (1), SDA (2), NC (3) e GND (4), que representam, respectivamente, o pino de alimentação do sensor, o pino de transmissão dos dados, o pino que não é conectado e o pino conhecido como terra.

Figura 6 - Descrição dos pinos do sensor DHT22

Pin	Name	Description
①	VDD	Power (3.3V–5.5V)
②	SDA	Serial data, bidirectional port
③	NC	Empty
④	GND	Ground



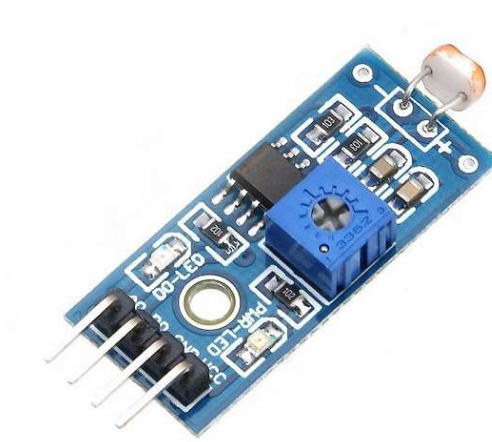
Fonte: AOSONG

#### 2.5.2.2. Módulo Sensor de Luminosidade LDR

O módulo sensor de luminosidade LDR (representado na Figura 7) possui as seguintes especificações (SUNROM ELECTRONICS):

- Tensão de operação: entre 3,3 V e 5 V;
- Saída Digital - 0V a 5V, nível de ativação ajustável por meio do trimpot;
- Saída Analógica - 0V a 5V, dependendo da luz que incide sobre o LDR;
- LEDs indicando a saída e alimentação;
- Tamanho da placa de circuito impresso: 3,2 cm x 1,4 cm;
- Possui um comparador de tensão LM393.

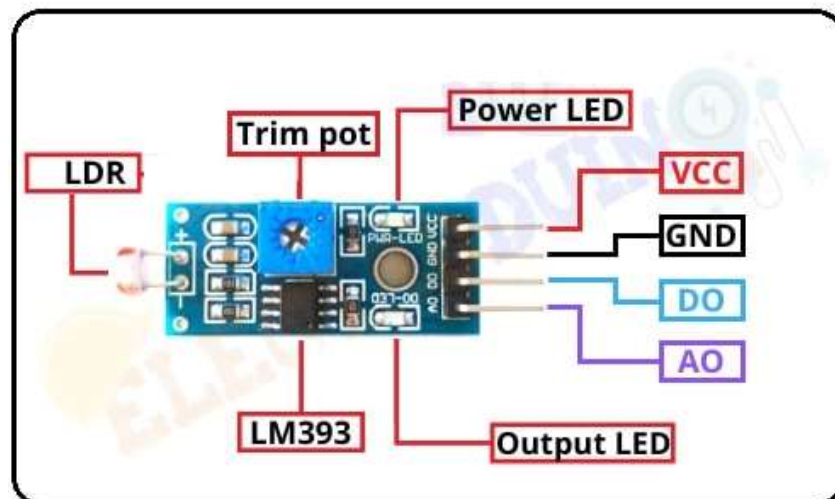
Figura 7 - Módulo sensor de luminosidade LDR



Fonte: OLIVEIRA, 2018

Ao observar a Figura 8, nota-se que o módulo possui 5 componentes principais: LDR, trimpot (um potenciômetro para ajustar a sensibilidade), um LM393 (circuito integrado comparador de tensão), e 2 LEDs, um para indicar a alimentação do módulo e outro para o sinal de saída do módulo (ELECTRODUINO, 2020).

Figura 8 - Componentes e pinagem do módulo sensor de luminosidade LDR



Fonte: ELECTRODUINO, 2020.

A pinagem do módulo pode ser descrita da seguinte forma: VCC é o pino de entrada da fonte de alimentação (3,3 ~ 5 V), GND é o pino de terra da fonte (0 V), D0 é o pino de saída do sinal digital do sensor e A0 é o pino de saída do sinal analógico do sensor.

### 2.5.2.3 Sensor Capacitivo de Umidade do Solo

O sensor capacitivo de umidade do solo (ilustrado na Figura 9) possui as seguintes especificações (CIRCUIT SCHOOLS, 2021):

- Construído com material anticorrosivo;
- Tensão de alimentação entre 3,3 e 5 V;
- Tensão analógica de saída entre 0 e 3,0 V;
- Interface de conexão do tipo PH2.0-3P;
- Possui o CI 555;
- Tamanho da placa do sensor: 9,8 cm x 2,3 cm.

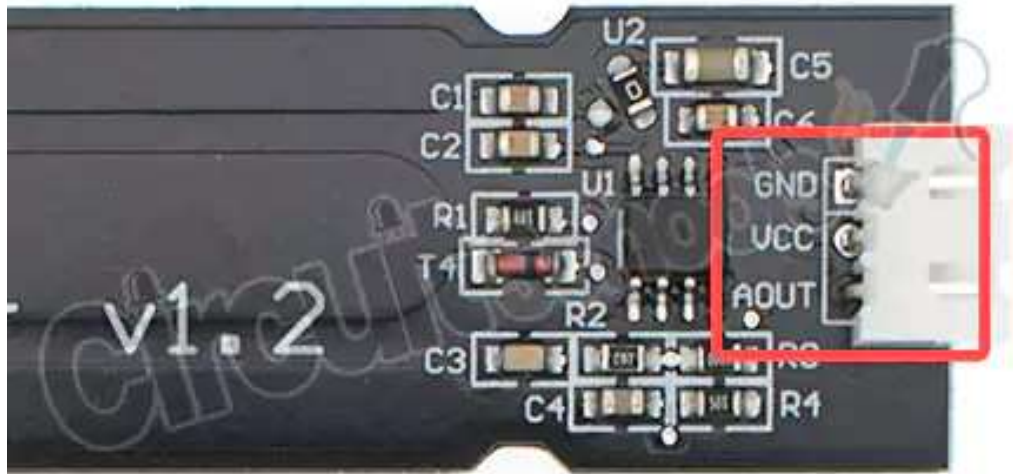
Figura 9 - Sensor capacitivo de umidade do solo



Fonte: QUARTZ COMPONENTS

Ao analisar a pinagem do sensor capacitivo de umidade do solo (conforme a Figura 10), pode-se concluir que ele possui 3 pinos: o pino de VCC para parte positiva da alimentação do sensor (entre 3,3 e 5 V), o GND é o pino de terra da alimentação (0 V) e o pino AOUT para o sinal de saída do sensor capacitivo.

Figura 10 - Pinagem do sensor capacitivo de umidade do solo



Fonte: CIRCUIT SCHOOLS, 2021

## 2.6 MICROCONTROLADORES

### 2.6.1 Definição de microcontroladores

Os microcontroladores podem ser definidos como equipamentos de pequeno porte e baixo custo que podem ser programados, são desenvolvidos para controlar ações e eventos previamente estabelecidos. Basicamente são formados por memórias, unidade processadora, portas de entradas e saídas, controle temporal e conversores analógicos e digitais. O principal objetivo dos microcontroladores é realizar ações de controle em sistemas embarcados (SANTOS; LARA JUNIOR, 2019).

Esses dispositivos são capazes de efetuar processos lógicos com rapidez e usados em uma vasta gama de tarefas devido à relativa facilidade de programação, além da quantidade de circuitos internos dedicados. A aplicação de plataformas de desenvolvimento de sistemas microcontrolados é uma solução para a obtenção de dados de sensores, realizar a comunicação com outros dispositivos, armazenar informações localmente ou na nuvem (RIOS *et al.*, 2020).

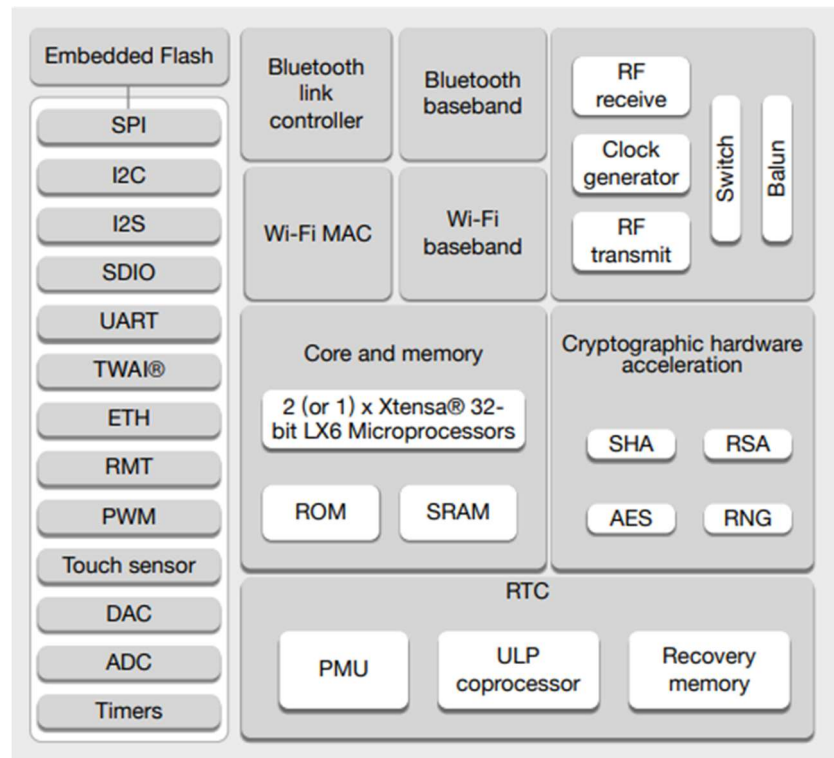
### 2.6.2 ESP32

O ESP32 é um microcontrolador projetado pela empresa de tecnologia *Espressif Systems*, caracterizado pelo baixo custo e baixo consumo de energia, integra os recursos de conectividade Wi-Fi e *Bluetooth*, tornando-o uma solução altamente integrada para aplicações de IoT - *Internet of Things* (MAIER; SHARP; VAGAPOV, 2017).

Esse dispositivo possui o microprocessador *Tensilica Xtensa LX6* de núcleo duplo, amplificador de potência, amplificador de recepção de baixo ruído, filtros e módulos de gerenciamento de energia. Ele é projetado para ser versátil e confiável em uma ampla variedade de aplicações (ESPRESSIF SYSTEMS, 2021).

A Figura 11 ilustra o diagrama de blocos funcional do microcontrolador.

Figura 11 - Diagrama em bloco funcional do ESP32



Fonte: ESPRESSIF SYSTEMS, 2021

### 2.6.2.1 Módulo WiFi LoRa 32 (V2)

Existem diversos módulos microcontrolados baseados no chip do ESP32, como é o caso do Módulo WiFi LoRa 32 (V2), da fabricante Heltec Automation, ilustrado na Figura 12.

A seguir, encontram-se as principais características do módulo, com base nas informações disponibilizadas pelo fabricante:

- Baseado no chip ESP32 (240MHz Tensilica LX6 dual-core);
- Comunicação Wi-Fi 802.11 b/g/n;
- Comunicação Bluetooth clássico e BLE;
- Possui chip LoRa SX1276, podendo trabalhar nas frequências 868/915 Mhz;
- Memória RAM de 520 kB;
- Interface micro USB com regulador de tensão;

- Recursos de hardware: 3 portas UART, 2 portas SPI, 2 portas I2C, 18 entradas com conversores digital/analógico de 12 bits (ADC), 2 saídas com conversores digital/analógico de 8 bits (DAC), 22 x GPIO;
- Display OLED de 0,96", com resolução de 128x64 pixels;
- Pode ser programado na IDE Arduino;
- Temperatura de operação: entre -40 °C e 80 °C;
- Alimentação recomendada via USB: 5 V;

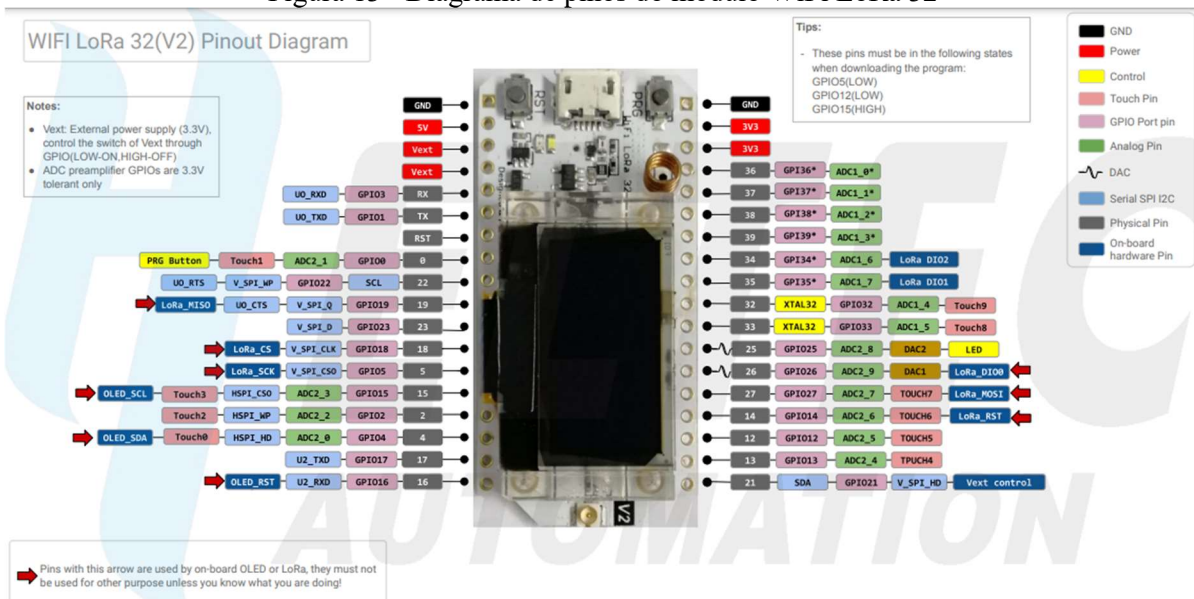
Figura 12 - Módulo WiFi LoRa 32 (V2)



Fonte: HELTEC AUTOMATION, 2018

A pinagem do módulo WiFi LoRa 32 (V2) pode ser visualizada na Figura 13, onde pode ser observado o tipo de comunicação utilizada em cada GPIO disponível, bem como algumas funções já definidas pelo fabricante.

Figura 13 - Diagrama de pinos do módulo WiFi LoRa 32



Fonte: HELTEC AUTOMATION, 2018

## 2.7 SISTEMA SUPERVISÓRIO

Os sistemas supervisórios permitem o monitoramento e rastreamento das informações de um processo produtivo ou de uma instalação física. Essas informações podem ser obtidas por meio de sensores distribuídos no processo e, em seguida, manipuladas, analisadas, armazenadas e finalmente, apresentadas ao usuário (DINIZ; ZORTEA, 2018).

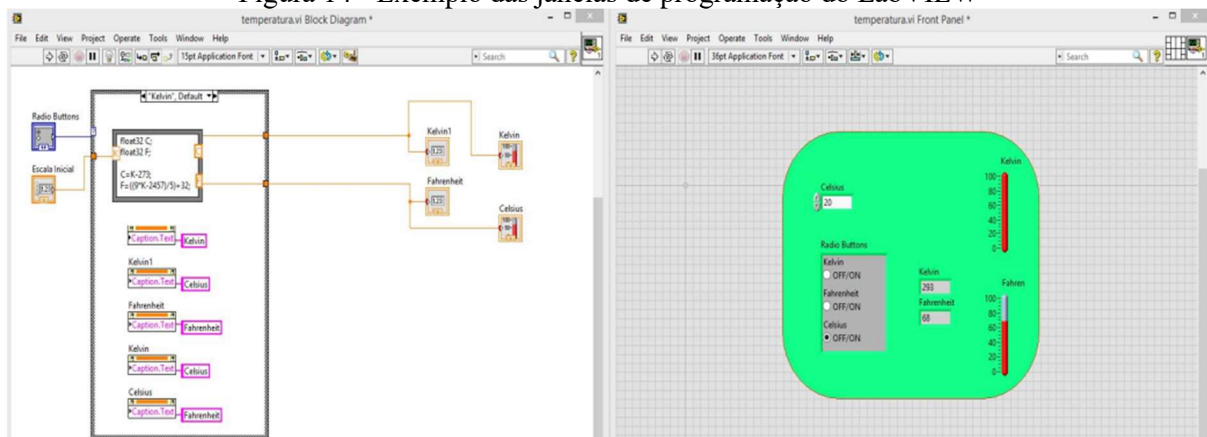
Uma característica importante dos sistemas supervisórios é a capacidade de permitir que o usuário tenha facilidade em obter os dados em tempo real e em simplificar a interpretação das informações para o usuário final (DINIZ; ZORTEA, 2018).

De acordo com MAESTRELLI e NAPOLEÃO (2018), o sistema supervisório permite a operação e visualização dos dados através de telas gráficas desenvolvidas para qualquer tipo de processo residencial, industrial ou comercial, sem levar em conta o tamanho do projeto.

### 2.7.1 LabVIEW

O LabVIEW é uma das tecnologias para o desenvolvimento de sistemas supervisórios. É um *software* criado pela *National Instruments* e possui uma programação versátil e prática, já que é baseado em uma linguagem de programação gráfica G e utiliza um modelo de fluxo de informações, o que possibilita a criação de códigos funcionais utilizando um *layout* visual. O uso do LabVIEW permite o desenvolvimento diversas interfaces que podem conter botões, caixas de texto, gráficos, LED's e indicadores analógicos (DE SOUZA *et al.*, 2017).

Figura 14 - Exemplo das janelas de programação do LabVIEW



Fonte: DA SILVA, 2017

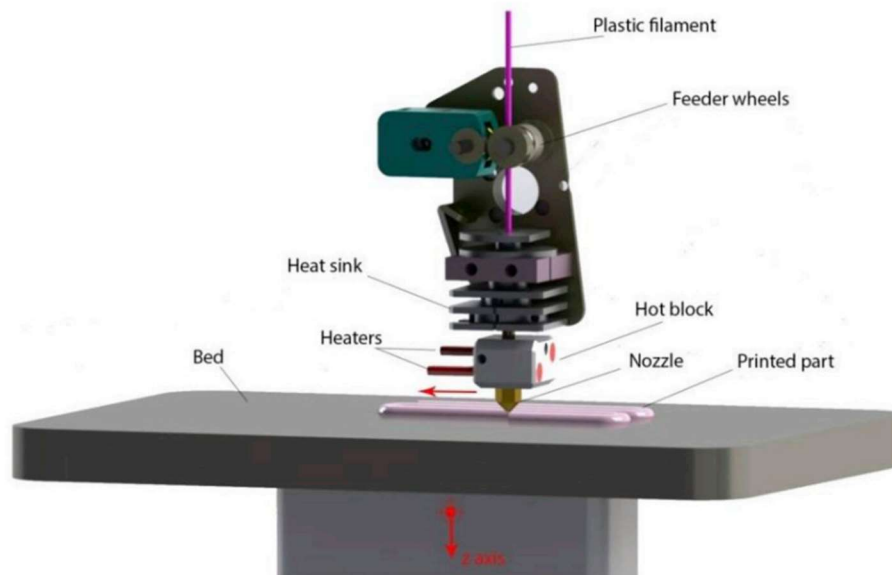
O ambiente de desenvolvimento do software é formado por duas janelas, uma para a criação do programa de forma gráfica em G (no lado esquerdo) e uma para a visualização da interface (no lado direito), conforme ilustrado na Figura 14. Além do mais, o software tem uma

biblioteca com funções para diversas aplicações, como ferramentas matemáticas, banco de dados, processamento de sinais e outras funcionalidades que agregam várias possibilidades no desenvolvimento do programa (DA SILVA, 2017).

## 2.8 MANUFATURA ADITIVA

A impressão 3D é uma técnica de manufatura aditiva para fabricar diversas estruturas e geometrias complexas a partir de modelos tridimensionais previamente dados. A impressão 3D envolve diversos métodos, materiais, equipamentos e tem a capacidade de transformar os processos e a logística de fabricação. A manufatura aditiva tem sido amplamente aplicada em diferentes indústrias, incluindo construção, prototipagem e biomecânica. Entre os fatores mais relevantes que impulsionaram o desenvolvimento de tecnologias de manufatura aditiva estão a prototipagem rápida, capacidade de imprimir grandes estruturas, reduzindo defeitos de impressão e propriedades mecânicas aprimoradas. Dentre os métodos de impressão 3D conhecidos, destacam-se: modelagem de deposição fundida, estereolitografia, sinterização seletiva a laser, fabricação de objetos laminados e impressão a jato de tinta (NGO et al., 2018).

Figura 15 - Representação de uma impressora 3D de FDM



Fonte: HEIDARI-RARANI; RAFIEE-AFARANI; ZAHEDI, 2019

A tecnologia de impressão 3D baseada em extrusão de material, como a de modelagem de deposição fundida (FDM), pode ser usada para imprimir diversos materiais e impressão multicolorida de plásticos, alimentos ou células vivas. Este processo tem sido amplamente



utilizado e os custos são muito baixos. A impressora de FDM constrói peças camada por camada, de baixo para cima, aquecendo e extrudando filamentos termoplásticos, conforme ilustrado na Figura 15. Além disso, a impressão 3D permite a produção de peças totalmente funcionais em uma ampla gama de materiais, incluindo cerâmica, metal, polímeros e suas combinações na forma de materiais híbridos, compósitos ou funcionalmente graduados (SHHRUBUDIN; LEE; RAMLAN, 2019).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A medição de variáveis ambientais na área rural possui aplicações de grande importância, como o monitoramento das condições climáticas em estufas. Esse tipo de estrutura requer medições das informações ambientais para haver um melhor controle sobre esse cenário. Sendo assim, necessita-se de um sistema para realizar as medições dos dados do ambiente, como temperatura, luminosidade, umidade do solo e do ar.

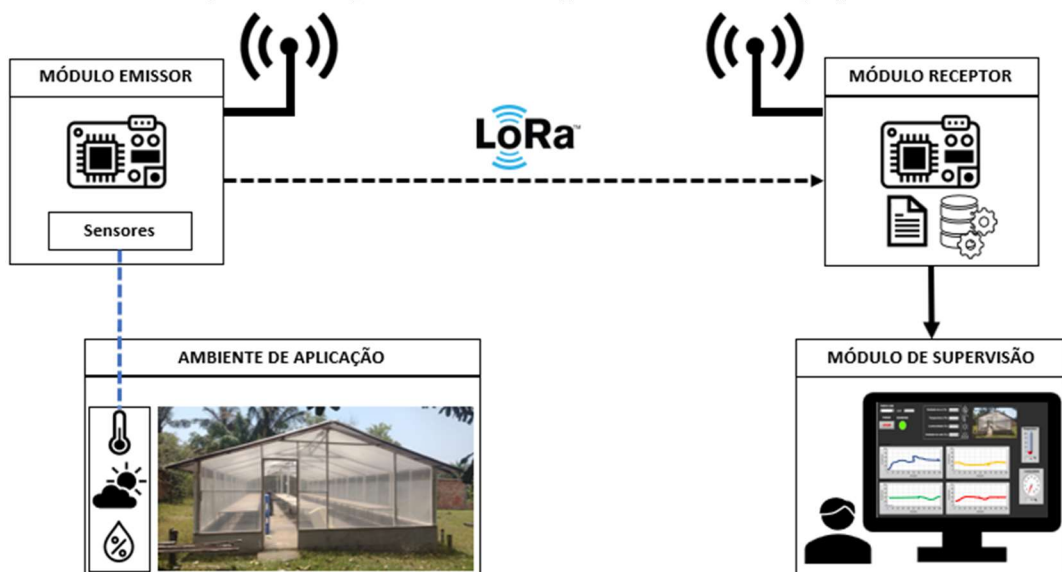
Uma proposta para ajudar a solucionar esse problema é o desenvolvimento de um protótipo microcontrolado com transmissão via LoRa para realizar a medição dessas variáveis de ambiente remotamente. O protótipo tem como base os módulos microcontrolados com suporte para transmissão LoRa, sensores para obtenção dos dados e um sistema de supervisão para acompanhar as informações do sistema.

#### 3.1 ARQUITETURA DO PROTÓTIPO

Para o desenvolvimento do trabalho proposto, foi necessário considerar o sistema dividido em três módulos principais e um cenário de aplicação, conforme a Figura 16:

- a) **Módulo emissor:** responsável em realizar a aquisição das informações dos sensores de umidade do solo e do ar, temperatura e luminosidade, e realizar a transmissão dos dados via LoRa para o módulo receptor;
- b) **Módulo receptor (*gateway*):** tem a função de receber os dados, obter os indicadores de qualidade da transmissão e enviar os dados para o módulo de supervisão via USB;

Figura 16 - Representação da arquitetura do sistema proposto



Fonte: Autor, 2022

- c) **Módulo de supervisão:** responsável em exibir as informações recebidas de forma gráfica para o usuário utilizando a plataforma LabVIEW.

Além disso, é importante citar o local de aplicação do protótipo, nesse caso, uma estufa. Após o desenvolvimento de cada módulo, eles devem ser testados individualmente para serem integrados conforme especificado pela arquitetura do sistema. Em seguida, o sistema completo deve ser submetido aos testes e finalmente, será validado na aplicação proposta.

### 3.2 CENÁRIO DE APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO

Para analisar o funcionamento do protótipo desenvolvido em um cenário real, foi escolhida uma estufa localizada no ramal do Januari, Iranduba, Amazonas. Atualmente a estufa possui estrutura para a secagem da fécula de mandioca, entretanto, com algumas adaptações na estrutura, é possível também realizar plantações de hortaliças, como alface, por exemplo. A estufa de aplicação do protótipo pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 - Estrutura da estufa utilizada no trabalho



Fonte: Autor, 2022

### 3.3 MÓDULO EMISSOR

O módulo emissor tem a função de realizar a coleta das informações de temperatura, umidade do ar, luminosidade e umidade do solo, pois essas são as variáveis mais relevantes quando se desejar monitorar as condições de uma estufa. Além de fazer a leitura dos dados, o módulo emissor deve enviar as informações para o módulo receptor via LoRa.

### 3.3.1 Materiais utilizados

Durante o desenvolvimento do módulo emissor do protótipo, foram utilizados os seguintes materiais: um módulo microcontrolado WiFi LoRa 32 (V2), sensor de temperatura e umidade do ar, luminosidade e umidade do solo. Além disso, foi realizada a aquisição de dois modelos de antenas de transmissão.

#### Módulo WiFi LoRa 32 (V2)

O módulo WiFi LoRa 32 (V2) é uma placa de desenvolvimento de IoT projetada e produzida pela Heltec Automation, é baseada no microcontrolador ESP32 e possui as funções de WiFi, BLE, LoRa integradas, além de um sistema de gerenciamento de bateria Li-Po, por isso justifica-se o uso do mesmo nesse projeto. A placa inclui também um *display* OLED (*Organic Light-Emitting Diode*, em português significa diodo orgânico que emite luz) de 0,96 polegadas, controlado pelo ESP32 (HELTEC AUTOMATION, 2018). A Figura 18 ilustra o modelo da placa utilizada no desenvolvimento do trabalho.

Figura 18 - Módulo WiFi LoRa 32 (V2) utilizado no projeto



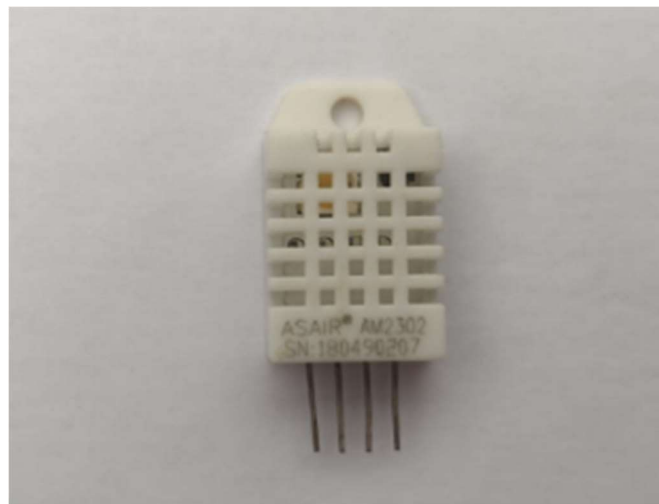
Fonte: Autor, 2022

Nesta parte do projeto, o módulo microcontrolado tem como função principal a aquisição das informações de todos os sensores utilizados, formatação e envio dos dados para o módulo receptor.

## Sensor DHT22

De acordo com o fabricante AOSONG, o DHT22 é um módulo sensor digital de temperatura e umidade. É formado por um sensor de umidade baseado no método capacitivo e um termistor, que é um dispositivo que varia a sua resistência em função da temperatura do ambiente. Possui um tamanho reduzido, baixo consumo de energia, alta precisão e com excelente custo benefício, tornando-o uma boa alternativa para as mais variadas aplicações, incluindo este projeto. A Figura 19 ilustra o modelo do módulo sensor DHT22 e seus componentes internos.

Figura 19 - Módulo sensor DHT22 utilizado no projeto



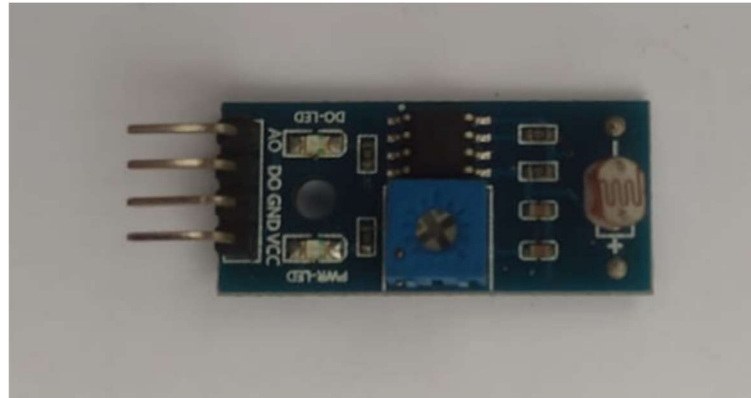
Fonte: Autor, 2022

Neste trabalho, o módulo sensor DHT22 tem a função de realizar a medição das informações de temperatura e umidade do ar no ambiente da estufa, sendo necessário realizar a conexão elétrica com o microcontrolador para a aquisição dos dados.

## Módulo sensor de luminosidade LDR

O módulo sensor de luminosidade LDR (*Light Dependent Resistor* ou Resistor Dependente de Luz) é um dispositivo baseado no fotoresistor, que é um componente eletrônico que varia a sua resistividade em função da quantidade de luz que incide sobre ele. O LDR funciona da seguinte forma: conforme a intensidade de luz aumenta sobre ele, diminui a sua resistência e quanto menor for a iluminação no ambiente, maior será a sua resistência (OLIVEIRA, 2018). A Figura 20 ilustra o modelo do sensor de luminosidade utilizado.

Figura 20 - Módulo sensor de luminosidade LDR utilizado no projeto



Fonte: Autor, 2022

O módulo sensor de luminosidade LDR tem a função de mensurar a intensidade de luz presente no ambiente da estufa, sendo essencial a conexão elétrica com o microcontrolador para obtenção dos dados.

### **Sensor capacitivo de umidade do solo - higrômetro**

O sensor utiliza o método capacitivo para detectar a variação da umidade do solo, ao contrário do método resistivo, usados em outros modelos de sensores. É feito de material resistente à corrosão que permite ter uma excelente vida útil, este módulo possui um regulador de tensão integrado para operar na faixa de tensão de 3,3 e 5 V (PROBOTS BLOG, 2021). Por esses motivos, esse sensor foi utilizado nesta aplicação. A Figura 21 ilustra o modelo de sensor de umidade do solo descrito.

Figura 21 - Sensor capacitivo de umidade do solo utilizado no projeto



Fonte: Autor, 2022

O sensor capacitivo de umidade do solo foi definido para se obter as informações da variação da umidade do solo em que ele estiver inserido. Sendo necessário a conexão com o microcontrolador para a aquisição dessa variável.

### **Antena modelo TX900-XPL23-100**

A antena TX900-XPL23-100 também é um modelo desenvolvido pela empresa ZIISOR (2019), que pode operar tanto nas frequências 868- 915 MHz, tem uma altura de 260 mm com base magnética para fixação em superfícies metálicas.

A antena TX900-XPL23-100, conforme ilustrada na Figura 22, possui as seguintes especificações que determinaram seu uso neste projeto:

- Frequência: 868/915 MHz;
- Ganho máximo: 6dBi;
- Direção de radiação: Omnidirecional;
- Tamanho: 260mmx30mm;

Figura 22 - Modelo da antena TX900-XPL23-100



Fonte: Autor, 2022

Para futuras referências, a antena TX900-XPL23-100 foi definida como Antena 2, pois a Antena 1 trata-se da antena que já acompanha o módulo WiFi LoRa 32 (V2).

### **Antena modelo TX900-XPL-100**

A antena TX900-XPL-100 é desenvolvida pela empresa ZIISOR (2019), que pode operar na frequência de 915 MHz, possui uma altura de 360 mm, base magnética para fácil adesão em superfícies metálicas. Além disso, pode ser aplicada junto com dispositivos compatíveis com a frequência de operação, como rádio de transmissão de dados.

A antena TX900-XPL-100, conforme ilustrada na Figura 23, possui as seguintes especificações, que justificaram o seu uso nesse trabalho:

- Frequência: 915 MHz;
- Ganho: 6dBi;
- Largura de banda: 860 – 960 MHz;
- Direção de radiação: Omnidirecional;
- Tamanho: 360mmx30mm;

Figura 23 - Modelo da antena TX900-XPL-100



Fonte: Autor, 2022.

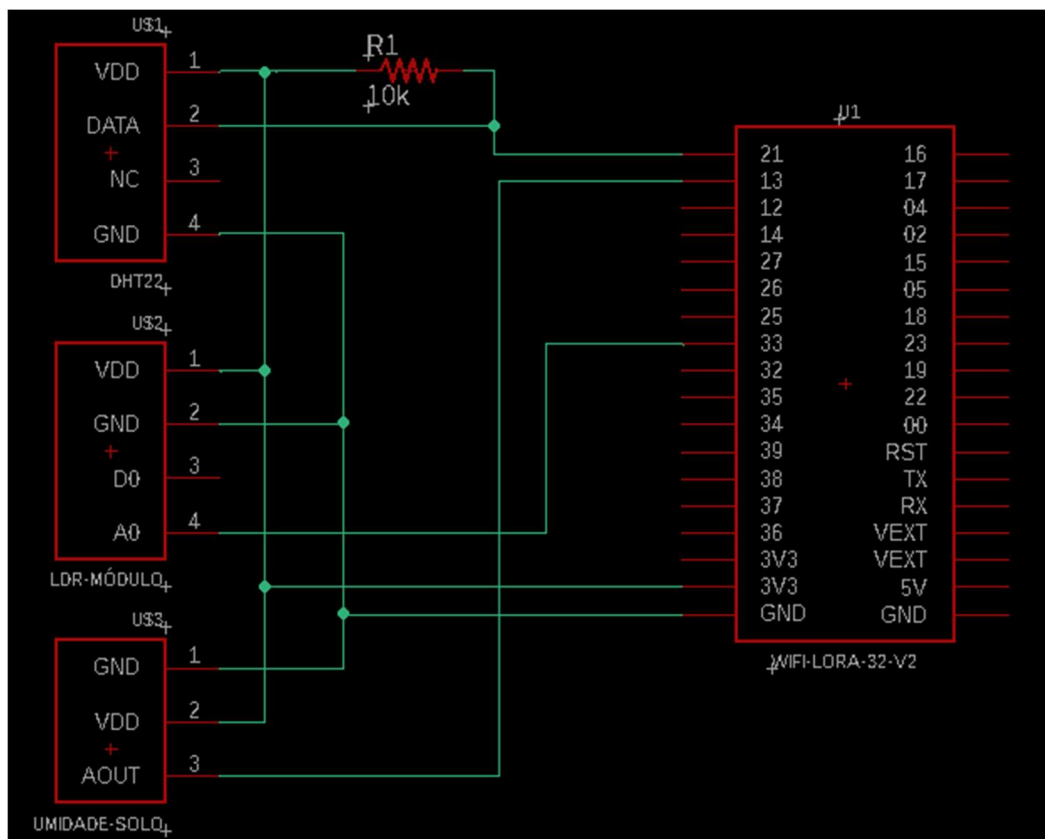
Para futuras referências, a antena TX900-XPL-100 foi denominada como Antena 3.



### 3.3.2 Esquema elétrico

O esquema elétrico é a representação das ligações existentes entre os itens utilizados no protótipo, a partir dele, pode-se realizar a conexão entre os componentes de forma mais precisa. Sendo assim, foi utilizado o software Autodesk Eagle para a elaboração do circuito elétrico do módulo emissor, composto pelos sensores e pelo módulo microcontrolado com antena para transmissão LoRa. A Figura 24 a seguir ilustra o circuito elétrico do módulo emissor que foi desenvolvido. É possível observar que cada componente utilizado possui os pinos de conexão de acordo com as informações disponibilizadas pelos fabricantes.

Figura 24 - Esquema elétrico do módulo sensor de transmissão

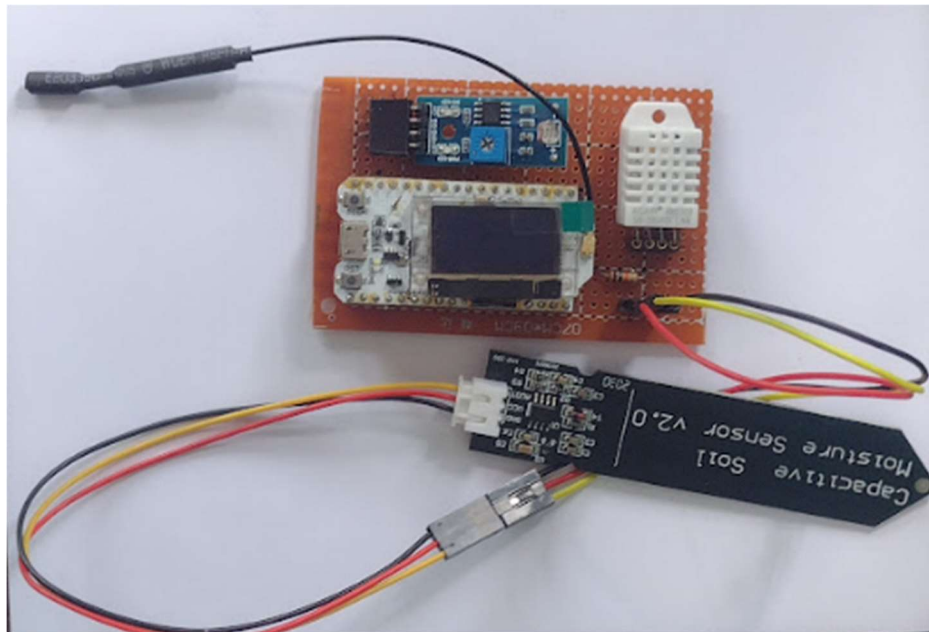


Fonte: Autor, 2022.

### 3.3.3 Montagem do protótipo

Após a elaboração do esquema elétrico, foi possível realizar a montagem do protótipo proposto. Para isso, além do microcontrolador com antena e dos sensores, foi utilizado uma placa universal perfurada de fenolite para fazer as conexões elétricas entre os componentes. A Figura 25 ilustra o circuito elétrico do módulo emissor que foi desenvolvido.

Figura 25 - Montagem do protótipo do módulo emissor

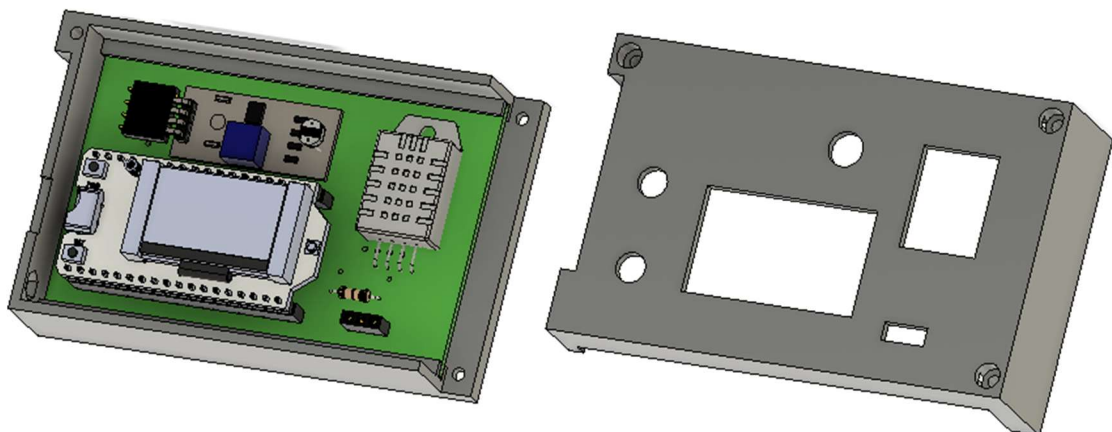


Fonte: Autor, 2022.

### 3.3.4 Caixa de proteção para o módulo

Após a soldagem dos componentes na placa, notou-se a necessidade do desenvolvimento de uma caixa de proteção para o módulo emissor. Dessa forma, a prototipagem por meio da manufatura aditiva, foi observada como uma solução satisfatória para esse problema. Sendo assim, foi realizada a modelagem 3D da placa com os componentes no software Autodesk Fusion 360 e em seguida foi elaborada uma caixa de proteção dividida em 2 partes conforme a Figura 26.

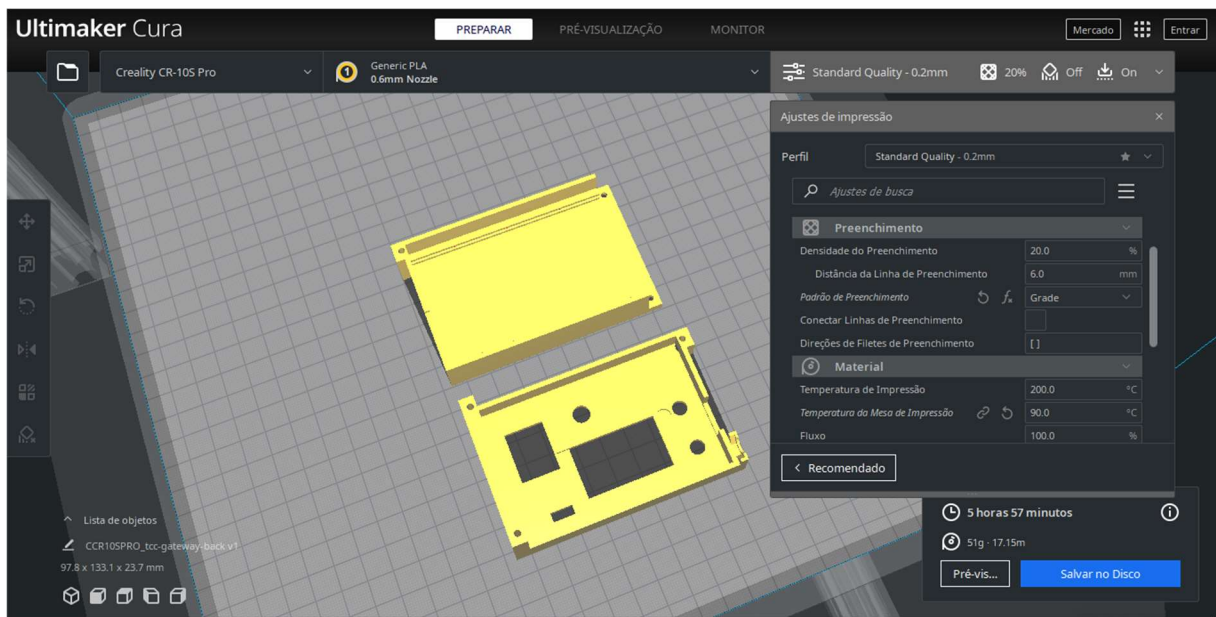
Figura 26 - Modelagem 3D do módulo emissor com a caixa de proteção



Fonte: Autor, 2022.

Em seguida, com os arquivos do modelo 3D da caixa de proteção, deu-se início ao processo de impressão 3D. Para essa etapa do desenvolvimento, foi utilizado o software Ultimaker Cura para fazer o fatiamento do modelo e obter o G-Code, linguagem utilizada nas impressoras 3D. A Figura 27 mostra as peças do modelo 3D da caixa no software de fatiamento, onde é possível verificar a estimativa de tempo de impressão e material utilizado de acordo com os parâmetros inseridos.

Figura 27 - Peças da caixa do módulo emissor no software Ultimaker Cura



Fonte: Autor, 2022.

Antes de realizar o fatiamento das peças, foi necessário configurar alguns parâmetros de impressão no software Ultimaker Cura, dessa forma, foram utilizadas as seguintes configurações de impressão:

- Altura de camada: 0.2 mm
- Espessura da parede: 2.4 mm
- Camadas da superfície superior: 2
- Densidade do preenchimento: 20 %
- Padrão de preenchimento: Grade
- Temperatura de impressão: 200 °C
- Temperatura da mesa de impressão: 90 °C
- Velocidade de impressão: 40 mm/s
- Velocidade da parede: 20 mm/s
- Tipo de aderência da mesa de impressão: Brim

Com esses parâmetros definidos, foi possível dar continuidade no processo de impressão, para isso, a impressora 3D utilizada a CR-10S Pro (Figura 28), modelo de impressora da fabricante Creality e o material do filamento utilizado foi PLA.

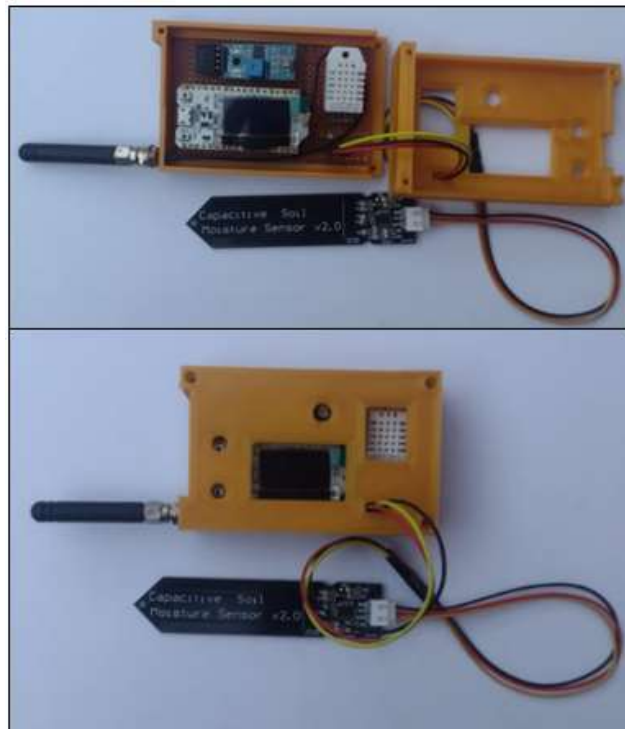
Figura 28 - Modelo da Impressora 3D CR-10S Pro



Fonte: CREALITY 3D EU, 2022.

Ao final do processo de impressão da caixa de proteção, foi possível concluir a montagem física do protótipo do módulo emissor, conforme representada na Figura 29.

Figura 29 - Montagem do protótipo do módulo emissor

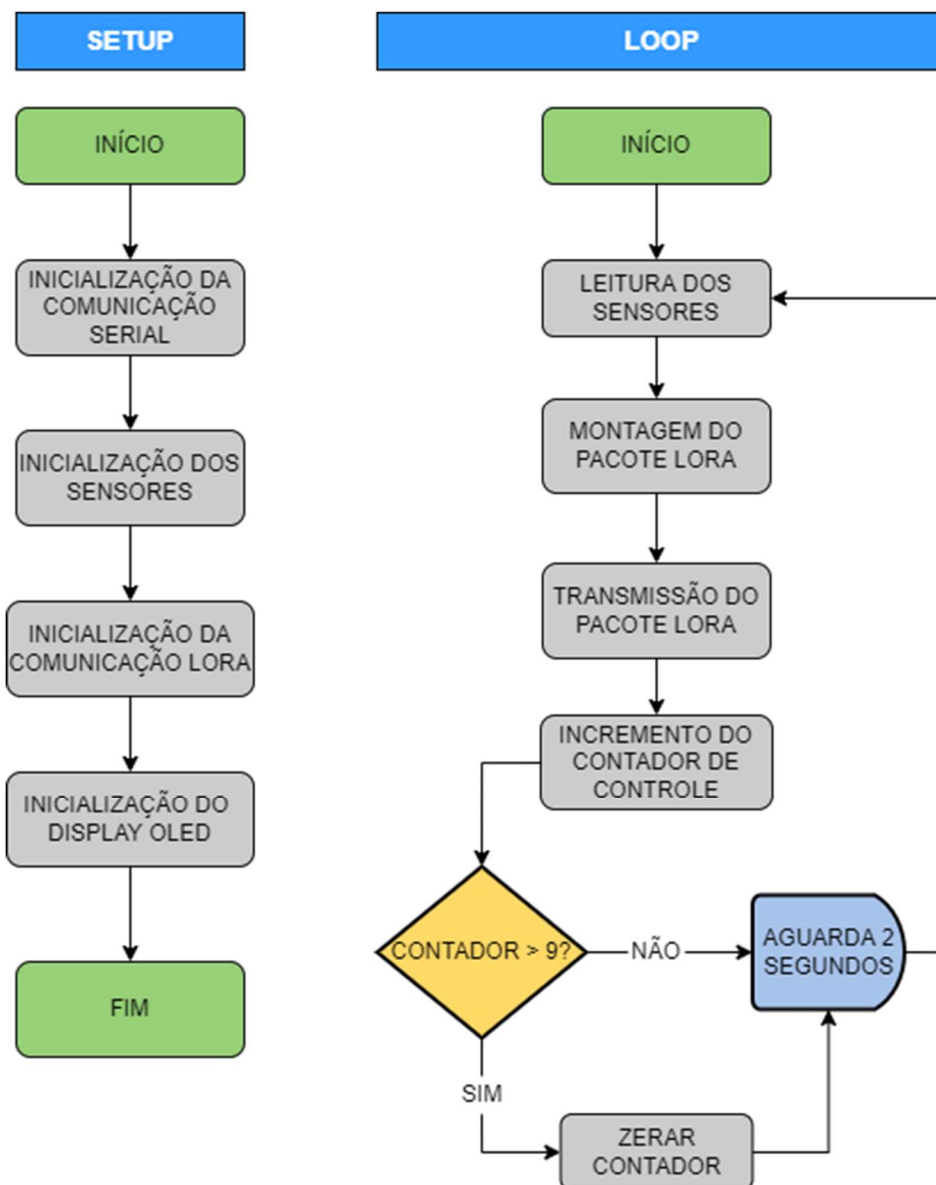


Fonte: Autor, 2022.

### 3.3.5 Firmware do módulo emissor

Após a montagem física do módulo, foi necessário realizar o desenvolvimento do *firmware* do módulo emissor, com o objetivo de o programar para realizar a aquisição das informações dos sensores e enviar os dados para o módulo receptor. Para isso, foi utilizado a IDE Arduino para programar o microcontrolador WiFi LoRa 32 (V2). O fluxograma da Figura 30 representa o funcionamento do código elaborado para o módulo emissor.

Figura 30 - Fluxograma do código do módulo emissor



Fonte: Autor, 2022

Pode-se observar a divisão do código em duas partes principais, o *setup* e o *loop*. No *setup* do código temos as seguintes funcionalidades:

- Inicialização da comunicação serial: para configurar a taxa de transferência em bits por segundo para a transmissão serial.
- Inicialização dos sensores: para definir os pinos de entrada dos sensores de umidade do solo, de luminosidade e para inicializar o sensor de temperatura e umidade.
- Inicialização da comunicação LoRa: para inicializar a comunicação LoRa e definir os parâmetros utilizados, como frequência de operação e fator de espalhamento.
- Inicialização do *display* OLED: para configurar a tela para exibição das informações dos sensores.

Já no *loop*, tem-se a seguinte sequência de funcionamento a cada 2 segundos:

- Leitura dos sensores: para realizar a aquisição das medições dos sensores utilizados.
- Montagem do pacote LoRa: para formatar os dados dos sensores e os organiza para exibir no display e para a transmissão.
- Transmissão do pacote LoRa: para enviar o pacote de dados formatados para o módulo receptor via LoRa.
- Incremento do contador de controle: para incrementar a variável do contador cada ciclo executado, caso o contador seja maior que 9, a contagem de pacotes enviados é reiniciada.

Na Figura 31 encontra-se a parte do código que realiza o envio do pacote de dados, essa é uma das funções chamadas no *loop* do código.

Figura 31 – Trecho do código para envio do pacote LoRa de dados

```

142 void sendReadings(int cont, float UA, float TEMP, float L, float US) {
143     //montagem do pacote de dados
144     String LoRaMessage = String(cont)+" "+ //contador
145                          String(UA)+" "+ //umidade do ar
146                          String(TEMP)+" "+ //temperatura
147                          String(L)+" "+ //luminosidade
148                          String(US); //umidade do solo
149     //envio do pacote LoRa
150     LoRa.beginPacket();
151     LoRa.print(LoRaMessage);
152     LoRa.endPacket();
153     //exibição do pacote enviado no monitor serial da IDE Arduino
154     Serial.print("Enviando pacotes: ");
155     Serial.println(LoRaMessage);
156     //exibição das informações no display
157     display.clear();
158     display.drawString(0, 12, LoRaMessage);
159     display.display();
160 }

```

A função tem como parâmetros de entrada as seguintes variáveis: índice do contador de pacotes, umidade do ar, temperatura, luminosidade e umidade do solo. A partir disso, o pacote é formado adicionando um caractere de separação entre os dados. Em seguida, o pacote é enviado e as informações são exibidas no display e enviadas para a porta serial.

### 3.4 MÓDULO RECEPTOR

O módulo receptor tem a função de receber os dados transmitidos pelo módulo emissor por meio da rede LoRa. Além de obter os indicadores da qualidade da transmissão, também é responsável em encaminhar os dados recebidos para o módulo do sistema supervisor.

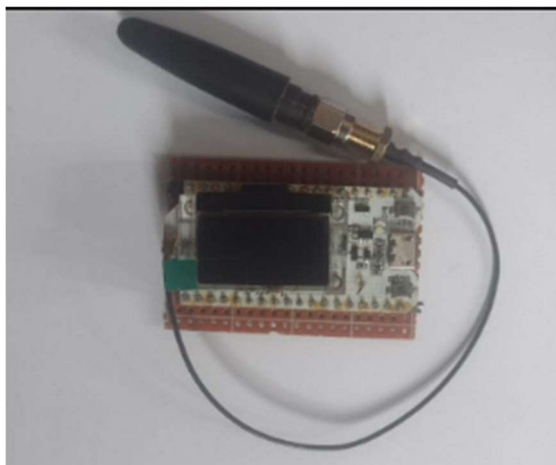
#### 3.4.1 Materiais utilizados

O desenvolvimento do módulo receptor ocorreu de forma mais simples, uma vez que esse módulo é formado apenas pela placa microcontrolada conectada via USB com o computador. Dessa forma, utilizou-se o mesmo modelo da placa WiFi LoRa 32 (V2) ilustrada na Figura 18. Além disso, também foram utilizadas as antenas TX900-XPL23-100 e TX900-XPL-100 (antena 2 e 3, respectivamente) mencionadas no módulo emissor, representadas nas figuras 22 e 23.

#### 3.4.2 Montagem do protótipo

Como o módulo receptor não possui outros componentes auxiliares, foi necessário apenas a soldagem do módulo microcontrolador em uma placa universal de fenolite perfurada. A Figura 32 mostra o resultado da montagem desse módulo receptor.

Figura 32 - Montagem do protótipo do módulo receptor

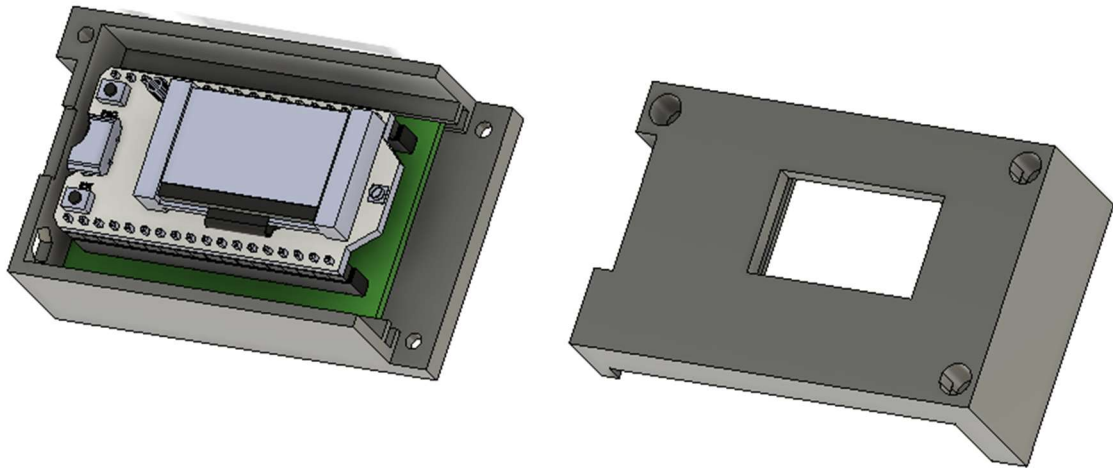


Fonte: Autor, 2022.

### 3.4.3 Caixa de proteção para o módulo

De forma semelhante ao procedimento realizado no desenvolvimento do módulo emissor, foi projetada uma caixa de proteção para o módulo receptor. Utilizou-se o software Autodesk Fusion 360 para fazer o projeto da caixa, conforme mostra a Figura 33.

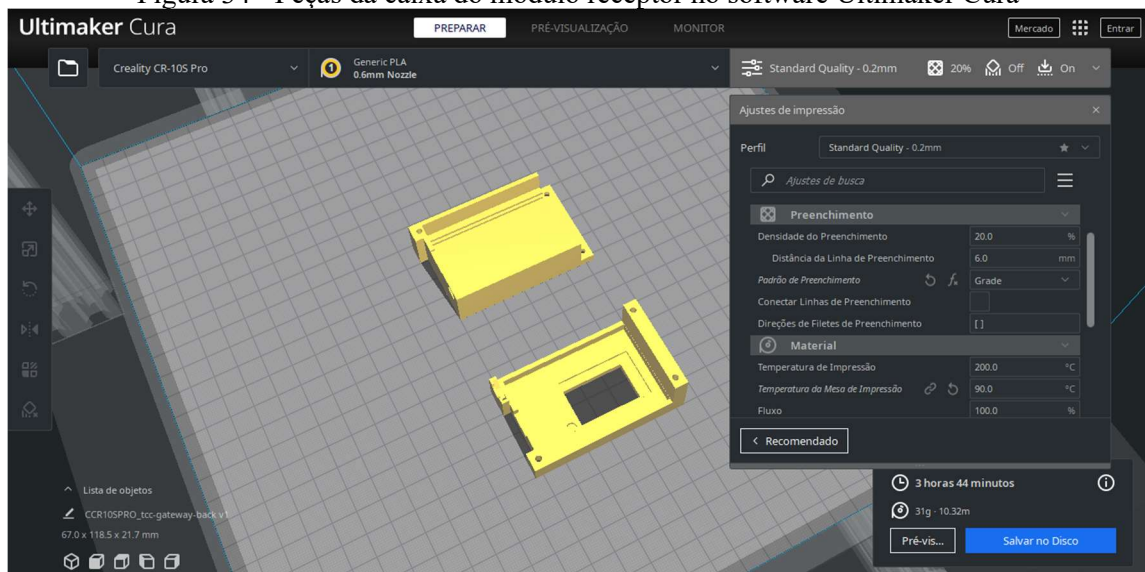
Figura 33 - Modelagem 3D do módulo receptor com a caixa de proteção



Fonte: Autor, 2022.

Para esse módulo, também foram utilizadas as mesmas configurações de impressão apresentadas no desenvolvimento do módulo emissor. E de igual modo, foi utilizada a impressora 3D do modelo CR-10S Pro e o filamento de PLA para realizar a impressão das peças. A Figura 34 ilustra as peças no software Ultimaker Cura com a definição dos parâmetros já mencionados.

Figura 34 - Peças da caixa do módulo receptor no software Ultimaker Cura



Fonte: Autor, 2022.



Por fim, após a impressão das peças da caixa de proteção, foi possível realizar a montagem física do protótipo do módulo receptor, conforme apresentada na Figura 35.

Figura 35 - Montagem do protótipo do módulo receptor



Fonte: Autor, 2022.

#### 3.4.4 Firmware do módulo receptor

Após a montagem física do módulo receptor, foi realizado o desenvolvimento do *firmware* para controlar o funcionamento da placa. Resumidamente, o módulo receptor foi programado para realizar o recebimento dos pacotes de dados, realizar a formatação dos dados e os enviar para o módulo de supervisão pela comunicação serial. A Figura 36 representa um fluxograma do funcionamento do código desenvolvido.

De forma análoga ao desenvolvimento do *firmware* do módulo emissor, o código é dividido em duas partes principais. No *setup* tem-se as seguintes funcionalidades:

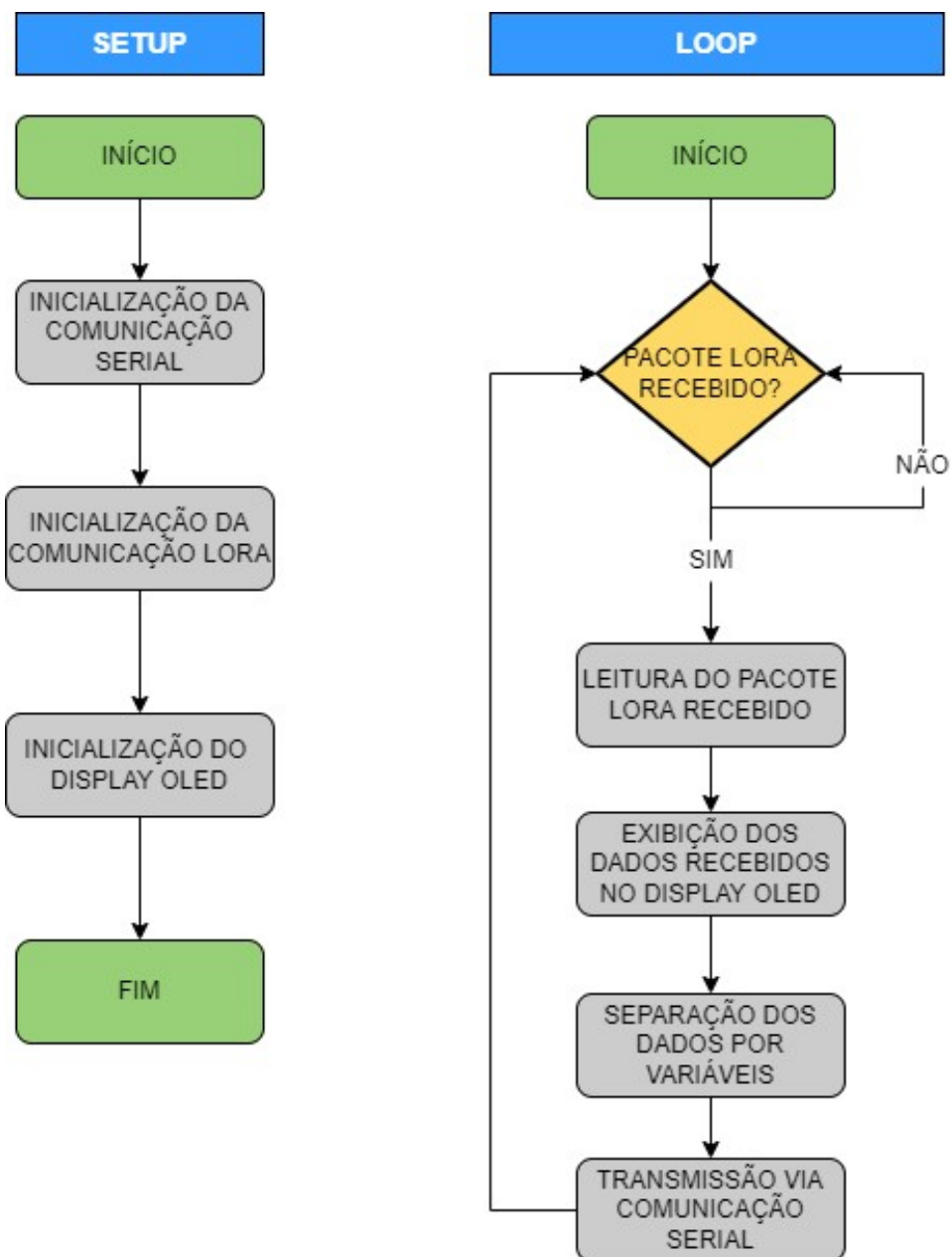
- Inicialização da comunicação serial: para configurar a taxa de transferência em bits por segundo para a transmissão serial.
- Inicialização da comunicação LoRa: para inicializar a comunicação LoRa e definir os parâmetros utilizados, como frequência de operação e fator de espalhamento.
- Inicialização do display OLED: para configurar a tela para exibição das informações recebidas do módulo emissor

No *loop*, o código foi organizado para ficar aguardando o recebimento do pacote de dados, ao identificar a chegada das informações, tem-se a seguinte sequência de funções:

- Leitura do pacote LoRa recebido: para receber o pacote LoRa e obter os indicadores de transmissão do pacote de dados.

- Exibição dos dados recebidos no display: para exibir no display as informações recebidas.
- Separação dos dados por variáveis: para formatar os dados e separar o valor de cada variável (temperatura, umidade do ar, luminosidade e umidade do solo).
- Transmissão via comunicação serial: para fazer o envio dos dados para o módulo de supervisão pela comunicação serial.

Figura 36 - Fluxograma do código do módulo receptor



Fonte: Autor, 2022

Na Figura 37 encontra-se o *loop* do código do módulo receptor, essa parte do código faz uma verificação constante para recebimento dos dados. Ao identificar a chegada de um pacote de dados LoRa, o módulo faz a leitura do mesmo, em seguida, faz a separação das variáveis e as exibe no display. Além disso, o módulo envia os dados pela porta serial a cada 500 milissegundos.

Figura 37 - Trecho do código do *loop* do módulo receptor

```

172 void loop() {
173
174     unsigned long tempoAtual = millis();    //Tempo atual em ms
175
176     // verifica se há pacote LoRa disponível
177     int packetSize = LoRa.parsePacket();
178
179     if (packetSize) {
180         //leitura do pacote, separação das variáveis e exibição no display
181         receberDadosLora();
182     }
183
184     //para tempoIntervalo de 500 ms
185     if (tempoAtual - tempoAnterior >= tempoIntervalo) {
186
187         tempoAnterior = tempoAtual;    // Salva o tempo atual
188         //envia o pacote de dados
189         Serial.println(contadorID);
190         Serial.println(umidadeAR);
191         Serial.println(temperatura);
192         Serial.println(luminosidade);
193         Serial.println(umidadeSolo);
194     }
195 }

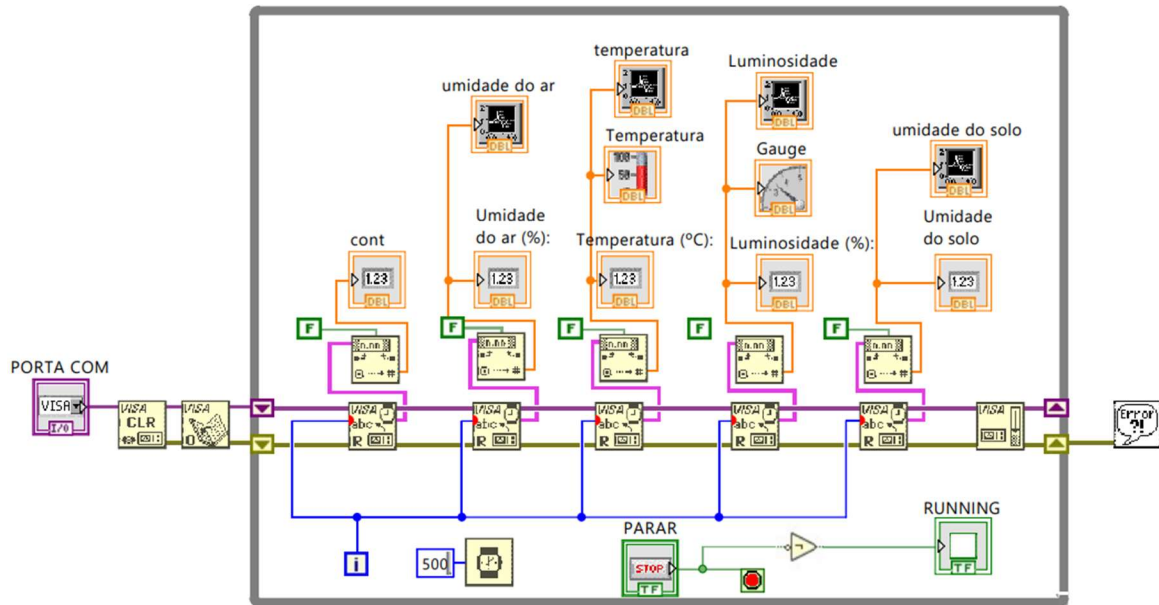
```

Fonte: Autor, 2022

### 3.5 MÓDULO DE SUPERVISÃO

Para o desenvolvimento do sistema de supervisão dos dados, foi utilizado o software LabVIEW. Os requisitos de funcionamento da *dashboard* são: realizar a comunicação serial com o microcontrolador, monitorar o recebimento dos dados e apresentá-los de forma intuitiva para o usuário. É importante lembrar que as variáveis monitoradas pelo supervisor são: temperatura, umidade do solo e do ar e a luminosidade do ambiente. Sendo assim, foi elaborado o diagrama em blocos representado da Figura 38.

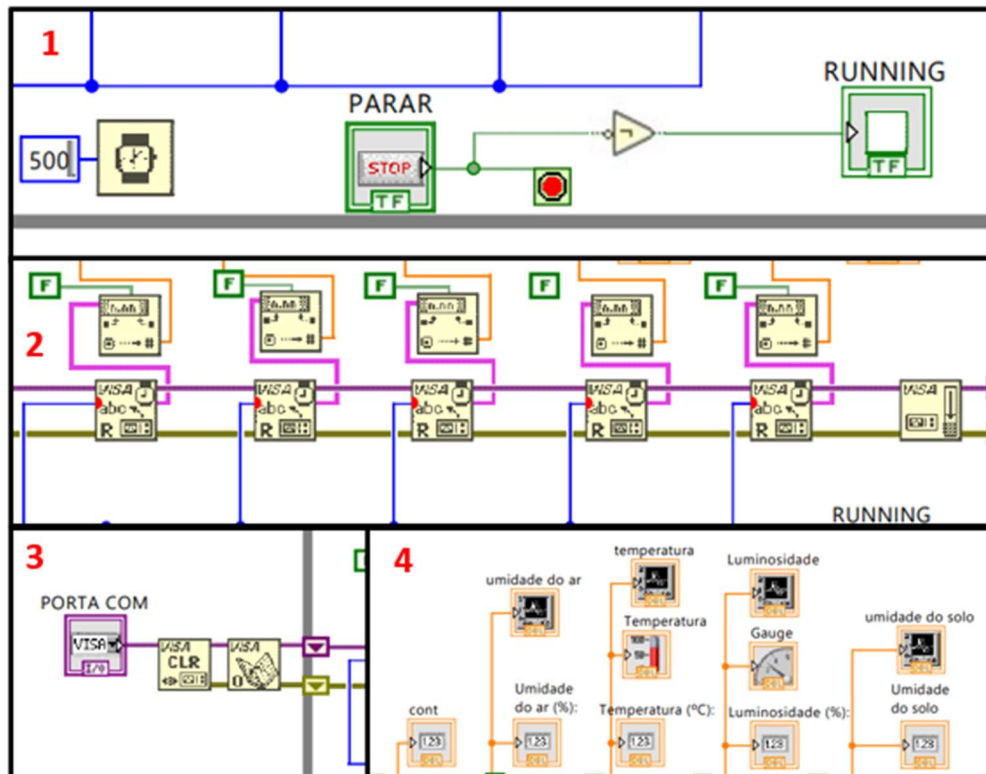
Figura 38 - Diagrama em blocos no LabVIEW do sistema de supervisão



Fonte: Autor, 2022.

O diagrama em bloco do sistema supervisorio pode ser dividido em quatro partes principais, conforme a Figura 39: comunicação serial, controle do *loop* de execução, leitura dos dados e exibição das informações.

Figura 39 - Partes principais do diagrama em blocos do módulo supervisorio



Fonte: Autor, 2022

A parte 1 do diagrama é responsável por definir o intervalo de execução do *loop* para 500 milissegundos, além de possuir um botão para interrupção do laço e um elemento booleano para indicar a execução do programa. Já a parte 2 faz a leitura dos dados recebidos via comunicação serial e realiza a formatação das informações. Na parte 3 acontece a seleção da porta de comunicação serial utilizada com o microcontrolador, também é realizada a inicialização da comunicação. Por fim, na parte 4, as informações dos sensores são exibidas de forma numérica e gráfica na tela do sistema supervisor.

## 4 RESULTADOS

Após os módulos estarem montados, programados e integrados entre si, foi possível realizar os testes com o protótipo desenvolvido. Para isso, foram escolhidas regiões próximas ao cenário de aplicação do sistema. O primeiro teste tem o objetivo de analisar o desempenho de cada antena ao variar a distância entre o módulo receptor e o módulo emissor, variando também o fator de espalhamento. Já o segundo teste visa obter o maior alcance de transmissão em uma região especificada.

Para o início dos testes de transmissão, foi necessário realizar o teste de funcionamento dos sensores integrados ao microcontrolador do módulo emissor. Sendo assim, com o módulo emissor conectado ao computador, foi possível observar os sensores responderem aos estímulos externos do ambiente, como temperatura, umidade do ar e luminosidade. A Figura 40 ilustra o módulo emissor conectado ao computador e apresenta a exibição dos dados coletados na IDE Arduino.

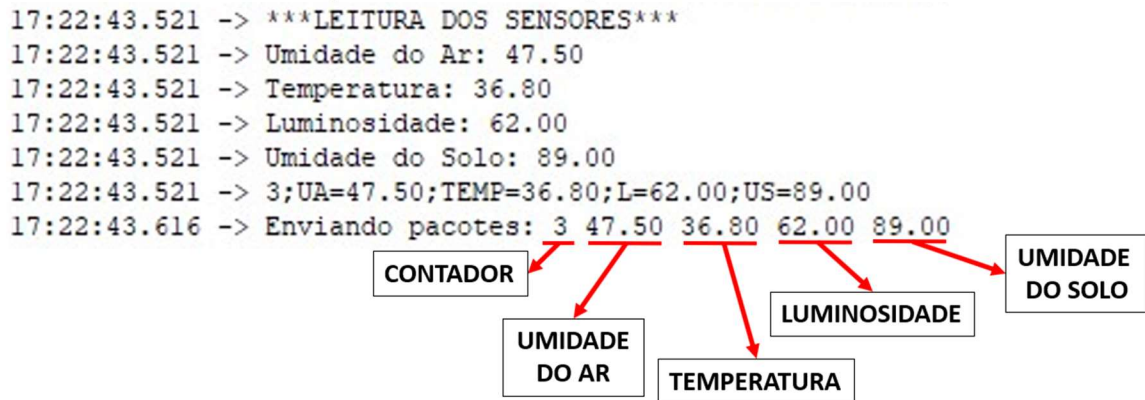
Figura 40 - Teste de funcionamento dos sensores com o microcontrolador



Fonte: Autor, 2022

O pacote de dados usado para os testes de transmissão foi uma *string* com cerca de 26 caracteres, com as seguintes informações: índice do contador de pacotes e as medidas de temperatura, luminosidade, umidade do solo e do ar, conforme ilustrado na Figura 41.

Figura 41 - Formato do pacote de dados enviado



Fonte: Autor, 2022

Foram utilizados os seguintes valores para os principais parâmetros da transmissão LoRa: frequência de operação de 915 MHz, largura de banda de sinal de 125 kHz, denominador da taxa de codificação de 5 e fator de espalhamento com o valor padrão de 7.

Conforme já mencionado, denominou-se a antena que acompanha a placa microcontroladora Heltec WiFi LoRa 32 (V2) de Antena 1. As antenas modelos TX900-XPL23-100 e TX900-XPL-100, foram denominadas de Antenas 2 e 3, respectivamente.

#### 4.1 TESTES DE DESEMPENHO DAS ANTENAS

Inicialmente, foram realizados testes de desempenho das antenas para diferentes distâncias pré-definidas, utilizando diferentes valores de fator de espalhamento na transmissão, que representa o número de bits da modulação, influenciando na sensibilidade da transmissão e no tempo de propagação no ar. A Figura 42 ilustra a área utilizada no teste do protótipo, onde foram definidos 4 pontos na região estabelecida, localizada no Iranduba - AM.

O ponto O (marcado em branco) é o ponto fixo do módulo receptor, os pontos A, B e C (marcados em vermelho) são os pontos de variação da localização do módulo emissor. Os indicadores observados no teste são: a porcentagem dos pacotes recebidos, indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI) e da relação sinal-ruído (SNR). Em todas as etapas desse teste, o módulo receptor foi posicionado a uma altura de aproximadamente 1,90 metros em relação ao solo, já o módulo emissor, foi posicionado a cerca de 1,60 metros de altura do solo.

Figura 42 - Local da realização dos testes de desempenho das antenas



Fonte: Google Maps, 2022

Inicialmente, foram realizados os testes para o Ponto A, localizado a cerca de 53 m de distância do ponto O. Sendo assim, o módulo emissor foi instalado no ponto A, enquanto o módulo receptor estava no ponto O, para esses pontos, os módulos estavam com visada direta entre eles, sem a presença de obstáculos. A figura 43 representa a localização dos módulos para essa etapa do teste.

Figura 43 - Distância entre o ponto O e A



Fonte: Google Maps, 2022

Com os módulos devidamente posicionados, foi possível realizar o teste da transmissão dos dados. Para cada uma das três antenas utilizadas, foi variado o parâmetro de fator de espalhamento (SF) da transmissão em três valores distintos: SF=7, SF=9 e SF=11. Para os outros parâmetros foram utilizados os valores já mencionados.



Tabela 1 - Resultados do teste das antenas para o ponto A

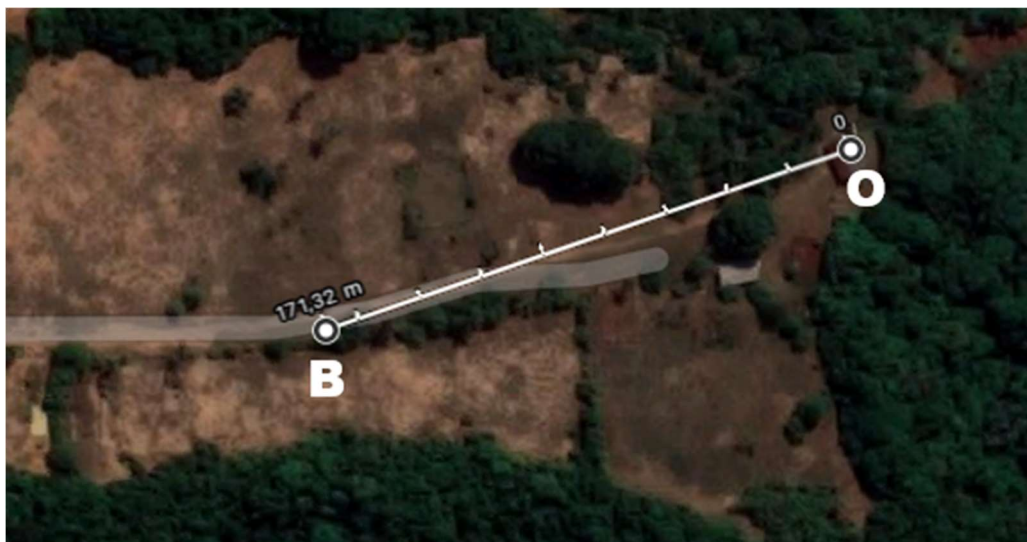
	Antena	Pacotes recebidos (%)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
<b>SF 7</b>	Antena 1	99	-77,5	10,1
	Antena 2	100	-69,5	10,13
	Antena 3	100	-58,6	10,2
<b>SF 9</b>	Antena 1	100	-79	12,6
	Antena 2	100	-71,7	12,27
	Antena 3	100	-63,7	13,5
<b>SF 11</b>	Antena 1	100	-83,4	10,3
	Antena 2	100	-75,6	9,6
	Antena 3	100	-68,7	10,8

Fonte: Autor, 2022

A tabela 1 relaciona os resultados obtidos para cada uma das antenas utilizadas nos testes, indicando a porcentagem dos pacotes recebidos e as médias obtidas da RSSI e SNR. Esses indicadores mostram o comportamento da transmissão quando ocorre uma variação das antenas e do fator de espalhamento.

De igual modo, para o ponto B, foram repetidos os mesmos procedimentos realizados no teste para o ponto A, para esses pontos, os módulos não estavam com visada totalmente direta entre eles, pois já havia a presença de algumas árvores no percurso. Os módulos do protótipo foram posicionados com uma distância de cerca de 170 metros entre eles, conforme ilustra a Figura 44.

Figura 44 - Distância entre o ponto O e B



Fonte: Google Maps, 2022

Para essa etapa do teste também foram utilizados três valores diferentes para o fator de espalhamento e três antenas diferentes para observar o comportamento da transmissão com essas variações. Na tabela 2 encontram-se os resultados obtidos nos testes de transmissão entre os pontos O e B na região especificada.

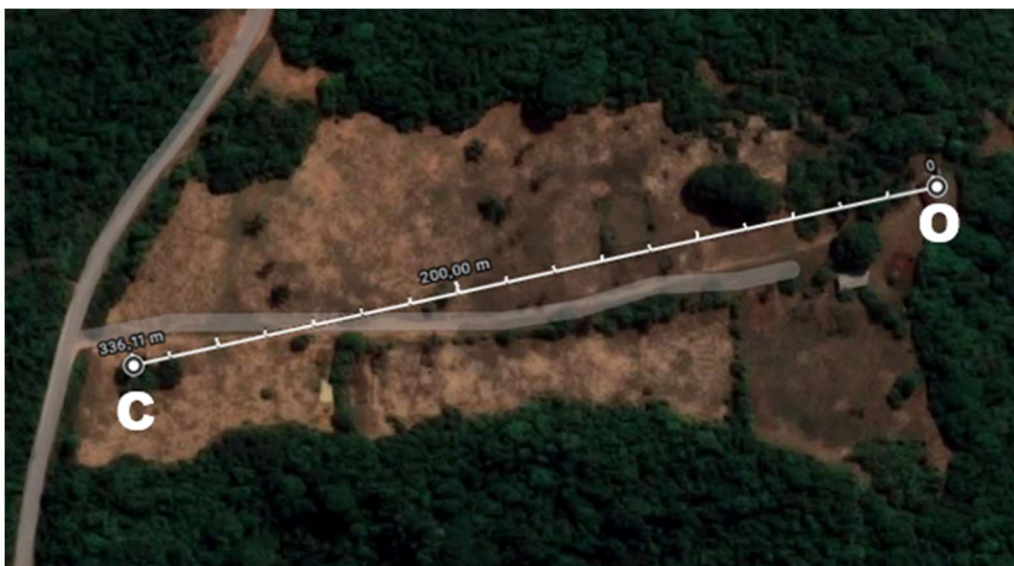
Tabela 2 - Resultados do teste das antenas para o ponto B

	Antena	Pacotes recebidos (%)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
<b>SF 7</b>	Antena 1	97,1	-98,7	5,8
	Antena 2	99	-94,9	8,1
	Antena 3	99	-96,2	9,1
<b>SF 9</b>	Antena 1	98	-101,8	7,6
	Antena 2	99	-90,2	12,9
	Antena 3	100	-90,1	12,6
<b>SF 11</b>	Antena 1	100	-105,7	3,4
	Antena 2	100	-97,5	8,7
	Antena 3	100	-92,3	9,8

Fonte: Autor, 2022

Em seguida, com uma distância ainda maior, os módulos foram posicionados no ponto O e C, com cerca de 336 metros de distância entre eles. Para esses pontos mencionados, os módulos não apresetaram visada direta entre eles, devido à presença de árvores na região. A Figura 45 representa a localização dos módulos para execução dessa etapa do teste.

Figura 45 - Distância entre o ponto O e C



Fonte: Google Maps, 2022

Assim como foi nas etapas anteriores do teste, foram usados três valores de fator de espalhamento da transmissão para as antenas já mencionadas. Na tabela 3 estão organizados os resultados obtidos para o teste realizado entre os pontos O e C.

Tabela 3 - Resultados do teste das antenas para o ponto C

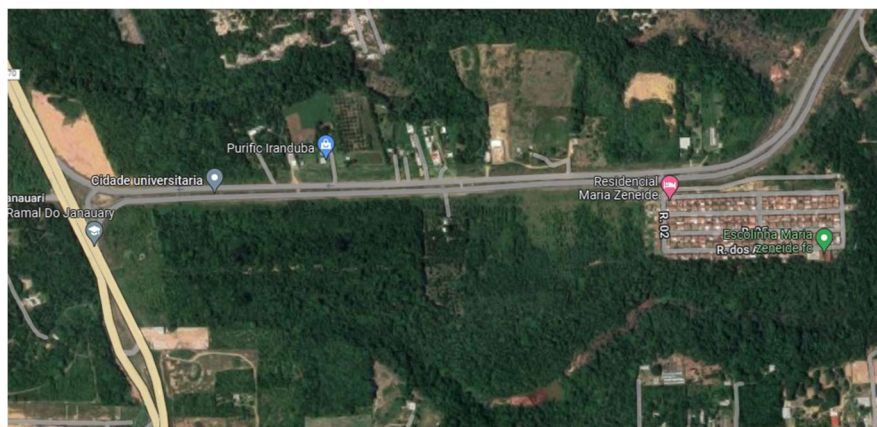
	Antena	Pacotes recebidos (%)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
SF 7	Antena 1	99	-108,4	-6,81
	Antena 2	99	-106,3	5,81
	Antena 3	99	-109,8	3
SF 9	Antena 1	93,60	-109,9	-6,62
	Antena 2	100	-107,8	6,7
	Antena 3	97,10	-105,6	9,9
SF 11	Antena 1	97,70	-110,7	-9,5
	Antena 2	100	-112,8	0,81
	Antena 3	100	-100,4	10,7

Fonte: Autor, 2022

#### 4.2 TESTES DE ALCANCE DAS ANTENAS

O segundo teste teve o objetivo de encontrar a distância máxima de transmissão com qualidade aceitável em uma determinada região. Sendo assim, foi escolhida uma área localizada no Iranduba – AM para execução dos testes de alcance da transmissão do protótipo, conforme representada na figura 46. Para a realização desse teste, foi utilizada a mesma formatação do pacote de dados do teste anterior, uma *string* com cerca de 26 caracteres. Para essa etapa de teste, o módulo receptor foi posicionado a uma altura de 3,50 metros em relação ao solo, já o módulo emissor, foi posicionado a cerca de 1,60 metros de altura do solo.

Figura 46 - Local da realização dos testes de alcance das antenas



Fonte: Google Maps, 2022

A antena 1 foi a primeira a ser utilizada no teste, sendo assim, o módulo emissor foi posicionado no ponto O (marcado em branco) o módulo receptor foi deslocado a partir do ponto O até o ponto A1 (marcado em vermelho), resultando em uma distância de 350,4 metros de alcance, conforme a Figura 47. Durante o deslocamento houve pontos onde o sinal foi perdido devido às barreiras existentes na região, como casas e poucas árvores.

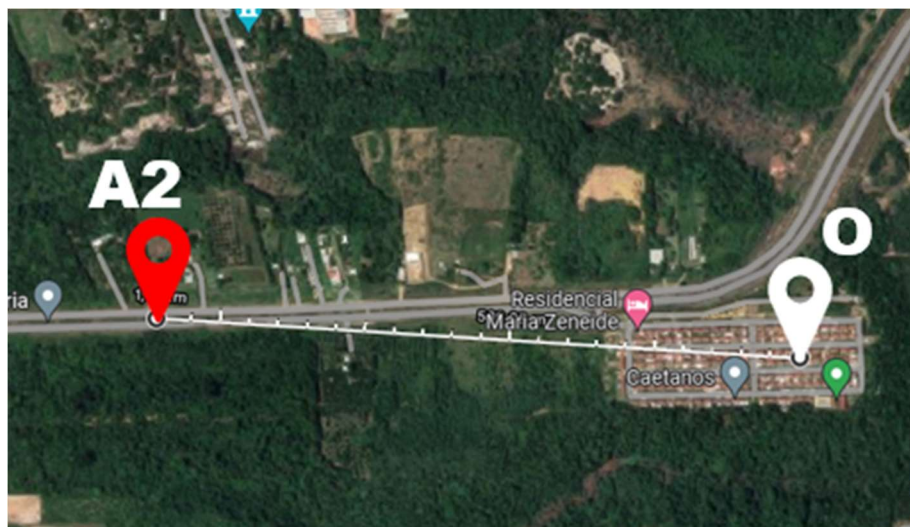
Figura 47 - Alcance da antena 1 para a região definida



Fonte: Google Maps, 2022

Em seguida, com os mesmos procedimentos, foi testada a antena 2. O deslocamento máximo obtido para transmissão dos dados foi de aproximadamente 1112,6 metros (entre os pontos O e A2) para a região definida na Figura 48. Para esses pontos também houve a presença de obstáculos no trajeto, como casas e várias árvores.

Figura 48 - Alcance da antena 2 para a região definida



Fonte: Google Maps, 2022

Por fim, foram repetidos os mesmos procedimentos para o teste da antena 3. Durante a execução do teste foi encontrada uma distância máxima entre os pontos O e A3 foi de cerca de 1204,7 metros, conforme ilustrado na Figura 49. Para esses pontos, a região foi caracterizada pela presença de casas e diversas árvores, impedindo a visada direta dos módulos.

Figura 49 - Alcance da antena 3 para a região definida



Fonte: Google Maps, 2022

A tabela 4 relaciona os indicadores de RSSI e SNR para os testes de alcance da transmissão com cada uma das antenas utilizadas. A porcentagem de pacotes recebidos estabelecido como aceitável foi de 65% para as três antenas testadas. O sistema desenvolvido funcionou de forma satisfatória para essa taxa de pacotes recebidos.

Tabela 4 - Resultados do teste de alcance das antenas

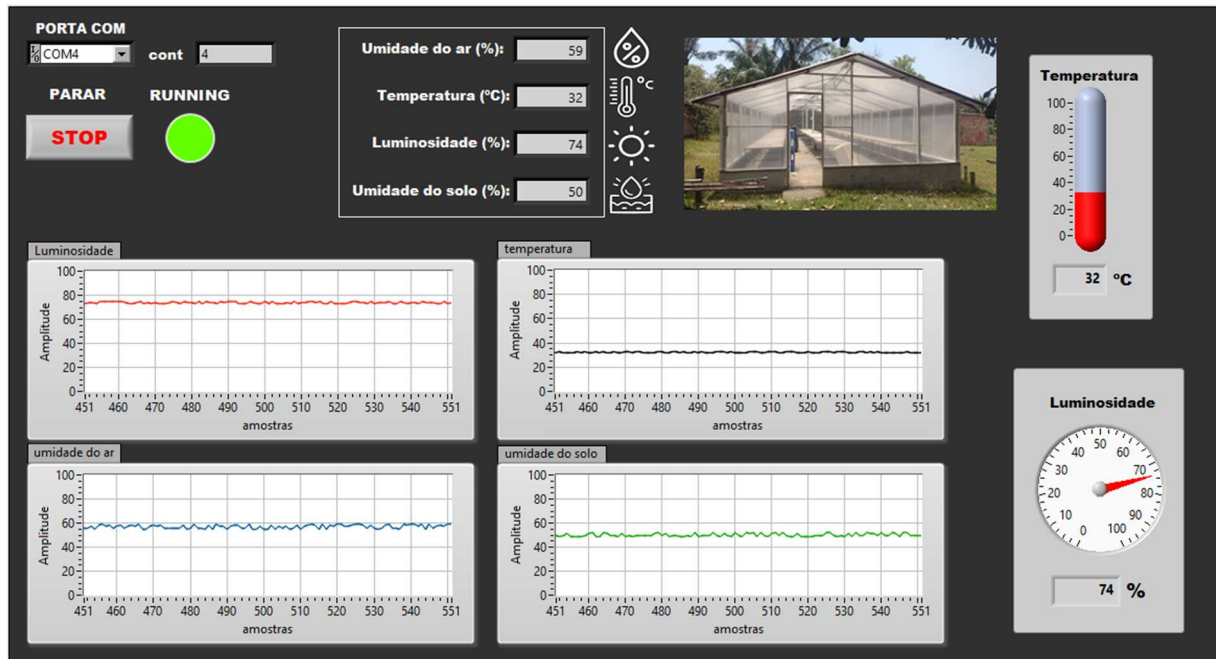
Antena	Distância (m)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
Antena 1	350,4	-110,3	-7,75
Antena 2	1112,6	-116,5	-9,2
Antena 3	1204,7	-118,1	-9,43

Fonte: Autor, 2022

### 4.3 DASHBOARD DO SISTEMA SUPERVISÓRIO

Para monitorar as condições ambientais da estufa, foi desenvolvido um sistema de supervisão para acompanhamento remoto das informações obtidas pelos sensores no ambiente de aplicação. Para isso, foi utilizado o software LabVIEW para desenvolver uma *dashboard* capaz de exibir os dados dos sensores de forma gráfica e de fácil entendimento para o usuário, conforme ilustrado na Figura 50.

Figura 50 - Tela do sistema de supervisão desenvolvido no LabVIEW



Fonte: Autor, 2022.

A *dashboard* desenvolvida foi organizada da seguinte forma: No canto superior esquerdo é possível escolher a porta serial na qual o módulo receptor está conectado, a contagem dos pacotes recebidos, um botão para encerrar a comunicação serial e um sinalizador de funcionamento do sistema. Além desses itens, tem-se a exibição das medições dos sensores na forma numérica e gráfica. Dessa forma, foi possível acompanhar as informações dos sensores de temperatura, umidade do ar e do solo e luminosidade, com atualização das informações a cada 500 milissegundos.

#### 4.4 APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO NA ESTUFA

Após a execução dos testes, optou-se por utilizar a antena 3 para a aplicação do protótipo no ambiente proposto, pois apresentou os melhores resultados nos testes executados. Dessa forma, os módulos foram posicionados conforme a Figura 51, o módulo emissor foi posicionado na estufa (ponto O, marcado em branco) para aquisição dos dados, já o módulo receptor foi posicionado na residência (ponto A, marcado em vermelho) para monitoramento das informações, apresentando uma distância de aproximadamente 70,43 metros entre eles. Apesar da relativa proximidade, a região apresenta grandes árvores no trajeto entre os pontos. Durante a aplicação do protótipo, os módulos foram posicionados a uma altura do solo de aproximadamente 2,20 metros.

Figura 51 - Localização dos módulos na aplicação do protótipo



Fonte: Google Maps, 2022

Os resultados obtidos durante a aplicação do protótipo no ambiente proposto foi bem satisfatório, pois apresentou 100% dos pacotes recebidos, com RSSI de -83,4 dBm e SNR de 7,9 dB.

Por fim, é importante relacionar os custos envolvidos para o desenvolvimento do projeto. A tabela 5 apresenta uma estimativa dos principais custos para a elaboração do protótipo do módulo emissor e receptor desenvolvido nesse trabalho. Alguns valores podem apresentar variação devido ao item ser importado e seu preço estar vinculado ao dólar.

Tabela 5 - Relação de custos estimados para desenvolvimento do protótipo

Item	Valor unitário (R\$)	Quantidade	Valor (R\$)
Módulo WiFi LoRa 32 (V2)	101,34	2	202,68
Sensor DHT22	33,24	1	33,24
Módulo sensor LDR	8,50	1	8,50
Sensor capacitivo de umidade do solo	12,00	1	12,00
Resistor 10K	1,90	1	1,9
Caixa de proteção do módulo emissor	28,10	1	28,1
Caixa de proteção do módulo receptor	25,80	1	25,80
Antena TX900-XPL23-100	24,03	2	48,06
Antena TX900-XPL-100	42,66	2	85,32
<b>Valor total (R\$)</b>			<b>445,60</b>

Fonte: Autor, 2022

## 5 CONCLUSÃO

Ao observar os resultados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho, pode-se dizer que o módulo emissor foi capaz de atingir o seu objetivo, realizando corretamente as informações dos sensores de temperatura, umidade do solo e do ar, além dos dados de luminosidade do ambiente. O módulo emissor foi capaz de transmitir os dados por meio da rede LoRa para o módulo receptor, que esteve apto para o recebimento dos pacotes de dados e disponibilizá-los para o módulo de supervisão.

Com base nos resultados dos testes de desempenho das antenas, organizados nas tabelas 1, 2 e 3, é possível observar que, no geral, a antena 3 obteve um melhor desempenho entre as antenas testadas. Isso é percebido ao analisar os valores de RSSI, onde as transmissões com a antena 3 apresentaram valores mais próximos de zero para a maioria das situações testadas. Uma vez que o RSSI próximo de zero indica uma intensidade de sinal recebido forte, a antena 3 apresentou um desempenho superior às demais nesse indicador.

Ao comparar os valores obtidos de SNR, relação sinal-ruído, a antena 3 também apresentou resultados superiores às outras antenas, pois obteve os maiores valores na maioria dos casos, indicando uma melhor qualidade do sinal recebido.

Já no teste de alcance, os resultados obtidos na tabela 4 mostram que a antena 1 apresentou um desempenho inferior às demais antenas, com uma distância menor de alcance para a região de teste, com aproximadamente 350,4 metros. As antenas 2 e 3 mostraram um desempenho semelhante para esse teste, entretanto, a antena 3 obteve uma distância maior de transmissão. Os indicadores de RSSI e SNR na tabela 4, descrevem que o sinal recebido estava fraco e com muitos ruídos, influenciado principalmente pelas perdas no caminho do sinal.

O sistema supervisor desenvolvido cumpriu os objetivos definidos, já que foi capaz de se comunicar com o módulo receptor e conseguiu exibir as informações dos sensores utilizados de forma gráfica e de fácil entendimento para o usuário, permitindo o monitoramento das condições ambientais da estufa.

Considerando todos os resultados obtidos no desenvolvimento do protótipo, pode-se concluir que o trabalho atingiu os objetivos definidos inicialmente, pois mostrou que o sistema de telemetria utilizando rede LoRa pode ser aplicado em áreas rurais para monitoramento das variáveis ambientais da estufa analisada no trabalho.



## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, há a possibilidade de realizar mais testes com outros tipos de antenas para obter distâncias de transmissão ainda maiores ou para melhorar a qualidade da transmissão dos dados.

Também pode-se realizar uma variação de maior dos parâmetros da comunicação LoRa para observar ainda mais o comportamento da transmissão com diferentes valores de largura de banda de frequência, fator de espalhamento, diferentes distâncias e em regiões diferentes das utilizadas neste trabalho.

Por fim, é possível implementar um sistema de atuação automático para o controle das variáveis do ambiente da estufa, incluindo um módulo com dispositivos para realizar as ações de controle, como ventoinhas e sistema de irrigação automático, etc.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, Zahid. **Introduction to DHT22: A complete step by step tutorial on Introduction to DHT22**. 2019. The Engineering Projects - Tutorials & Projects for Engineers. Disponível em: <<https://www.theengineeringprojects.com/2019/02/introduction-to-dht22.html>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

ALLIANCE, L. **LoRaWAN What is it?** 2015. Disponível em: <[https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a\\_ed71ea1cd969417493c74e4a13c55685.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_ed71ea1cd969417493c74e4a13c55685.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2021.

AOSONG. **Temperature and humidity module AM2302 - Product Manual**. Disponível em: <<https://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/AM2302.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

CIRCUIT SCHOOLS. **Interface Capacitive Soil moisture sensor v1.2 with Arduino, LCD and OLED**. 2021. CircuitSchools Staff. Disponível em: <<https://www.circuitschools.com/interface-capacitive-soil-moisture-sensor-v1-2-with-arduino-lcd-and-oled/>>. Acesso em: 03 abr. 2022.

CREALITY 3D EU. **Creality3D CR-10S Pro 3D Printer**. 2022. Disponível em: <<https://www.creality3dshop.eu/products/creality3d-cr-10s-pro-300-300-400-3d-printer>>. Acesso em: 12 set. 2022

DA COSTA, Vinícius M.; NERY, Marcello Matheus E.; PAES, Guilherme P. R.; DE SOUZA, Pedro R. F.; ALMENTERO, Eduardo K.; BRANCO, Luiz M. C.. **Monitoramento e Suporte a Controle de Estufas Climatizadas Utilizando Nuvem e MQTT**. In: ESCOLA REGIONAL DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO DO RIO DE JANEIRO (ERSI-RJ), 7., 2021, Evento Online. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2021. p. 80-87. DOI: <https://doi.org/10.5753/ersirj.2021.16982>. Acesso em: 20 nov. 2021.

DA SILVA, Darlan Ferreira Amaral. **Implementação de um sistema supervisório para uma planta piloto didática de controle de nível, vazão e temperatura**. 2017. 53p. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação - Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Engenharia de Controle e Automação de Processos, Salvador, 2017. Acesso em: 29 nov. 2021.

DA SILVEIRA, Samir Michel Emanuel. **SISTEMA DE SENSORES COM TRANSMISSÃO DE DADOS UTILIZANDO TECNOLOGIA DE RADIOFREQUÊNCIA LORA**. 2018. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação - Bacharelado em Engenharia Elétrica, Curso de Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018. Acesso em: 30 nov. 2021.

DANTAS, Mario. **Redes de comunicação e computadores: abordagem quantitativa**. / Mario Dantas – Florianópolis: Visual Books, 2010. 448p. ISBN: 978-85-7502-255-9.

DE OLIVEIRA, Lucas R.; DA CONCEIÇÃO, Arlindo F.; S. NETO, Lauro P.. **Revisão sistemática da literatura sobre aplicações das tecnologias LoRa e LoRaWAN**. In: ARTIGOS COMPLETOS - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS COMPUTACIONAIS (SBESC), 8. , 2018, Salvador. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade

Brasileira de Computação, 2018 . ISSN 2763-9002. Acesso em: 18 nov. 2021.

DE SOUZA, Claudeir Coelho; DRIESSEN, João Vithor; COELHO, Romário de Souza. **Desenvolvimento de protótipo didático de linha de produção de bolos**. 2017. 86p. Monografia (graduação) – Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, Joinville, 2017. Acesso em: 30 nov. 2021.

DELLALIBERA, L. A. **Técnicas de Múltiplo Acesso para Redes LORAWAN**. Setembro, 2018. 48 f. Monografia (TCC (Graduação)) — Curso de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Estadual Paulista, São João da Boa Vista, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/156791>>. Acesso em: 14 nov. 2021.

DINIZ, Eduardo Rosso; ZORTEA, Thiago Bisetto. **Sistema supervisório para monitoramento de consumo energia elétrica**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Acesso em: 14 nov. 2021

ELECTRODUINO. **LDR sensor module | How LDR Sensor Works**. 2020. ElectroDuino. Disponível em: <<https://www.electroduino.com/ldr-sensor-module-how-ldr-sensor-works/>>. Acesso em: 03 abr. 2022.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Series Datasheet, 2021**. Disponível em: <[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)>. Acesso em: 18 nov. 2021

FARIA, Ezequiel P; CAVAZOTI, Renan M. **Monitoramento de índices de umidade de solos utilizando rede LoRa**. 2019. 69 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019. Acesso em: 01 nov. 2021.

GOOGLE MAPS. **Área do teste de desempenho**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-3.2493231,-60.0797528,434a,35y,90h/data=!3m1!1e3!4m2!1m1!3e2>>. Acesso em: 12 set. 2022.

GOOGLE MAPS. **Área do teste de alcance**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-3.1828545,-60.1396853,1981a,35y,270h/data=!3m1!1e3>>. Acesso em: 12 set. 2022.

GOOGLE MAPS. **Localização da estufa**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-3.2287351,-60.0927916,96m/data=!3m1!1e3>>. Acesso em: 12 set. 2022.

HEIDARI-RARANI, M.; RAFIEE-AFARANI, M.; ZAHEDI, A. M. **Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites**. Composites Part B: Engineering, v. 175, p. 107147, 2019. Acesso em: 20 ago. 2022.

HELTEC AUTOMATION. **WiFi LoRa 32 (V2)**. 2018. Disponível em: <<https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017 -**

**Resultados Definitivos.** Censo agropec., Rio de Janeiro, v. 8, p.1-105, 2019. ISSN 0103-6157. Disponível em: <[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3096/agro\\_2017\\_resultados\\_definitivos.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3096/agro_2017_resultados_definitivos.pdf)>. Acesso em: 02 nov. 2021.

JÚNIOR, José Jair Alves Mendes; JUNIOR, Sérgio Luiz Stevan. **LDR e sensores de luz ambiente: funcionamento e aplicações.** Semana de Eletrônica e Automação, Paraná, 2013. Acesso em: 20 nov. 2021.

MAESTRELLI, Giovani Andrey; NAPOLEAO, Guilherme Szemczak. **SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA MONITORAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL.** 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018. Acesso em: 18 nov. 2021

MAIER, A.; SHARP, A.; VAGAPOV, Y. **Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things.** 2017 Internet Technologies and Applications (ITA). **Anais...** In: 2017 INTERNET TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS (ITA). Wrexham: IEEE, set. 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8101926/>>. Acesso em: 18 nov. 2021

MARTINAZZO, C. A.; ORLANDO, T. **COMPARAÇÃO ENTRE TRÊS TIPOS DE SENSORES DE TEMPERATURA EM ASSOCIAÇÃO COM ARDUÍNO.** v. 40, p. 12, 2016. Disponível: <[https://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/151\\_587.pdf](https://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/151_587.pdf)>. Acesso em: 21 nov. 2021.

MOTA, V. L. G. **Desenvolvimento de um sistema de medição para o levantamento do digrama de irradiação de antenas impressas na faixa de onda milimétricas.** p. 138, 2017. Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia Curso de Graduação em Engenharia de Telecomunicações, Niterói, 2017. Disponível em: <[https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/5474/TCC%20Vitor\\_Mota\\_versao\\_corrigida\\_O\\_K.pdf?sequence=1](https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/5474/TCC%20Vitor_Mota_versao_corrigida_O_K.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 20 nov. 2021.

NGO, T. D. et al. Additive manufacturing (3D printing): **A review of materials, methods, applications and challenges.** Composites Part B: Engineering, v. 143, p. 172–196, 2018. Acesso em: 20 ago. 2022.

OLIVEIRA, Euler. **Como usar com Arduino – Módulo Fotoresistor (Sensor) LDR.** 2018. Blog MasterWalker Shop. Disponível em: <<https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-modulo-fotoresistor-sensor-ldr>>. Acesso em: 01 abr. 2022.

PROBOTS BLOG. **How to Use Soil Moisture Sensor Capacitive V2.0 Module With Arduino.** 2021. Probots Blog - The Latest Electronics Tutorials & Projects. Disponível em: <<https://tutorials.probots.co.in/using-soil-moisture-sensor-capacitive-v2-0-module-for-arduino/>>. Acesso em: 03 abr. 2022.

QUARTZ COMPONENTS. **Capacitive Soil Moisture Sensor V2.0.** Quartz Components. Disponível em: <<https://quartzcomponents.com/products/capacitive-soil-moisture-sensor-v2-0/>>. Acesso em: 03 abr. 2022.

RIOS, A. DE A. et al. **COMPARATIVO ENTRE PLATAFORMAS DE DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS MICROCONTROLADOS PARA APLICAÇÕES EM INTERNET DAS COISAS**. In: XVIII CEEL – CONFERÊNCIA DE ESTUDOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA. 16 nov. 2020. Disponível em: <[https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/artigos/artigo\\_567.pdf](https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/artigos/artigo_567.pdf)>. Acesso em: 16 nov. 2021.

RONCHI, Eduardo Lessmann. **Análise de redes de comunicação sem fio para aplicações industriais**, 2020. 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Eletrônica, Florianópolis, 2020. Acesso em: 19 nov. 2021.

ROSSATO, Jonas. **Implantação e Avaliação de uma Rede LoRaWAN na UTFPR - Campus Toledo**. 2019. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso – COTSI - Curso de Tecnologia em Sistemas para Internet, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2019. Acesso em: 15 nov. 2021.

SAMPAIO, H. V. **Projeto e Implementação de um Sistema de Monitoramento de uma Estufa Agrícola Utilizando Rede Hierárquica de Sensores Sem Fio**. p. 112, 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Faculdade Campo Limpo Paulista – FACCAMP, Campo Limpo Paulista, 2016. Disponível em: <<http://www.cc.faccamp.br/Dissertacoes/HugoVazSampaio.pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2021.

SANT'ANA, J. M. de S. **Redes LoRaWAN: implantação e desenvolvimento de aplicações**. Março 2017. 67 f. Monografia (TCC (Graduação)) — Curso de Engenharia de Telecomunicações, Instituto Federal de Santa Catarina, São José, 2017. Disponível em: <[https://docente.ifsc.edu.br/noronha/documentos/TCC\\_Jean\\_Michel.pdf](https://docente.ifsc.edu.br/noronha/documentos/TCC_Jean_Michel.pdf)>. Acesso em: 19 nov. 2021.

SANTOS, Jean Willian; LARA JUNIOR, Renato Capelin de. **Sistema de automatização residencial de baixo custo controlado pelo microcontrolador ESP32 e monitorado via Smartphone**. 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Automação Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019. Acesso em: 16 nov. 2021

SCHWAB, A. LUIS. **CRIAÇÃO DE UMA REDE LORA PARA PROJETOS DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO**. p. 78, 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) - Universidade Feevale. Novo Hamburgo, 2020. Acesso em: 15 nov. 2021.

SHAHRUBUDIN, N.; LEE, T. C.; RAMLAN, R. **An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications**. Procedia Manufacturing, v. 35, p. 1286–1296, 2019. Acesso em: 20 ago. 2022.

SILVA, I. F.; MOURA, P. H. D. DE. **ESTUDO DAS ANTENAS E DA PROPAGAÇÃO DO SINAL DA RÁDIO NACIONAL DA AMAZÔNIA**, p. 82, 2013. Trabalho de Graduação – Engenharia Elétrica, UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, FACULDADE DE TECNOLOGIA, Brasília, 2013. Disponível em: <[https://bdm.unb.br/bitstream/10483/13285/1/2013\\_IsraelFrankeSilva\\_PauloHenriqueDuar](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/13285/1/2013_IsraelFrankeSilva_PauloHenriqueDuar)>

tedeMoura.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2021.

SOUZA, J. C. D. **PLANEJAMENTO DE REDES DE COMUNICAÇÃO SEM FIO EM UM AMBIENTE INDOOR: UM ESTUDO DE CASO NA ESCOLA PROF. PAULO FREIRE (MARABÁ-PA)**. p. 45, 2016. TCC - Bacharelado em Sistema de Informação, Universidade Federal do sul e Sudeste do Pará. Marabá, 2016. Acesso em: 19 nov. 2021.

SUNROM ELECTRONICS. **Light Sensing Module - LDR**. Sunrom Electronics & Sunrom Technologies. Disponível em: < <https://www.sunrom.com/p/light-sensing-module-ldr>>. Acesso em: 01 abr. 2022.

TEIXEIRA, Grazielle B.; ALMEIDA, João Víctor P. **Rede Lora® E Protocolo Lorawan® Aplicados Na Agricultura De Precisão No Brasil**. 2017. 77 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017. Acesso em: 15 nov. 2021.

The Things Network. **RSSI and SNR**. 2022. Disponível em: < <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/rssi-and-snr/>>. Acesso em: 03 out. 2022.

WERNER, T. **Uso da tecnologia LoRaWAN para o monitoramento de dados ambientais**. Julho 2018. 62 f. Monografia (TCC (Graduação)) — Curso de Engenharia de Telecomunicações, Instituto Federal de Santa Catarina, São José, 2018. Disponível em: <[https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/7/77/TCC290\\_Thiago\\_Werner.pdf](https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/7/77/TCC290_Thiago_Werner.pdf)>. Acesso em: 19 nov. 2021.

ZIISOR. **TX900-XPL-100(33) Product DataSheet**. 2019. Disponível em: < <http://106.14.211.220:8086/upload/files/20200105114655LunzvVsf.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2022

ZIISOR. **TX900-XPL-100(23) Product DataSheet**. 2019. Disponível em: < <http://106.14.211.220:8086/upload/files/20200105114754Trn4pHri.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2022