

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Catia do Amaral Frederico

**Projeto de equipamento de monitoramento de umidade do solo com  
comunicação LoRa**

Florianópolis  
2022



Catia do Amaral Frederico

**Projeto de equipamento de monitoramento de umidade do solo com  
comunicação LoRa**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.  
Orientador: Prof. Richard Demo Souza, Dr.  
Coorientador: Prof. Antônio Augusto Alves Pereira, Dr.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Frederico, Catia do Amaral

Projeto de equipamento de monitoramento de umidade do solo com comunicação LoRa / Catia do Amaral Frederico ; orientador, Richard Demo Souza, coorientador, Antônio Augusto Alves Pereira, 2022.

47 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. LoRaWAN. 3. LoRa. 4. Agricultura Inteligente. I. Souza, Richard Demo . II. Pereira, Antônio Augusto Alves . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Catia do Amaral Frederico

**Projeto de equipamento de monitoramento de umidade do solo com  
comunicação LoRa**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 17 de março de 2022.

---

Prof. Jean Viane Leite, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Richard Demo Souza, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Antônio Augusto Alves Pereira, Dr.  
Coorientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Carlos Aurélio Faria da Rocha, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

*Carlos A. Dutra*

---

Eng. Carlos Alberto Dutra  
Avaliador  
iGera

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos os professores, servidores e colegas que fizeram parte da minha jornada na UFSC; à minha família e amigos por todo o apoio e compreensão nesses anos; ao professor orientador Richard Demo Souza pelo seu comprometimento em ensinar com paciência e excelência, despertando meu interesse na área de telecomunicações; ao professor coorientador Antônio Augusto Alves Pereira pela ideia inicial desse trabalho e contínuo interesse e disponibilidade em ajudar que me motivaram durante seu desenvolvimento. Por fim, agradeço ao apoio dos colegas Alexandro dos Santos, Gabriel Martins e Ygor Kupas que dedicaram uma parte do seu tempo para me auxiliar e aconselhar no progresso desse trabalho.





## RESUMO

Esse trabalho apresenta o desenvolvimento do protótipo de um dispositivo de IoT de baixo custo, que monitora a umidade do solo e usa comunicação LoRa. Esse equipamento conta com um conjunto de sensores capacitivos de umidade da terra, além de sensores de umidade do ar e temperatura atmosférica. Os dados coletados são enviados utilizando o protocolo LoRaWAN para um servidor de rede e ficam disponíveis para a leitura na nuvem, podendo auxiliar no processo de tomada de decisão de irrigação na agricultura. Estão contidos, nesse trabalho, uma revisão de fundamentos, o projeto e implementação desse dispositivo, além de um teste simulando seu funcionamento no campo e sugestões de trabalhos futuros.

**Palavras-chave:** LoRa, LoRaWAN, Agricultura Inteligente, Sensoriamento de Umidade do Solo.



## **ABSTRACT**

This work presents the development of a prototype of a low-cost IoT device, which monitors soil moisture and uses LoRa communication. This equipment has a set of capacitive soil moisture sensors, in addition to atmospheric humidity and temperature sensors. The collected data is sent using the LoRaWAN protocol to a Network Server and is available for reading in the cloud, assisting the irrigation decision-making process in agriculture. This work contains a review of fundamentals, the design and implementation of this device, as well as a test simulating its operation in the field and suggestions for future work.

**Keywords:** LoRa, LoRaWAN, Smart Farming, Soil Moisture Sensing.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de um sinal <i>chirp</i> . . . . .	24
Figura 2 – <i>Chirp Spread Spectrum</i> . . . . .	24
Figura 3 – Simulação de modulação LoRa com diferentes <i>Spreading Factor</i> (SF). . . . .	25
Figura 4 – Topologia estrela de estrelas LoRaWAN. . . . .	26
Figura 5 – Relação de classes LoRaWAN. . . . .	27
Figura 6 – Estrutura dos pacotes LoRaWAN. . . . .	27
Figura 7 – Sensor de umidade resistivo de baixo custo. . . . .	28
Figura 8 – Exemplo de sensor capacitivo de umidade do solo. . . . .	29
Figura 9 – Circuito detalhado. . . . .	31
Figura 10 – Kit de desenvolvimento B-L072ZLRWAN1. . . . .	32
Figura 11 – Sensor SHT10. . . . .	33
Figura 12 – Sensor capacitivo de umidade do solo. . . . .	34
Figura 13 – Multiplexador AD 16 Canais CD74HC4067. . . . .	34
Figura 14 – <i>Gateway ITG 200 Indoor</i> . . . . .	35
Figura 15 – Console <i>The Things Network</i> (TTN). . . . .	36
Figura 16 – Configuração do <i>payload</i> para envio. . . . .	36
Figura 17 – Formatação do <i>payload</i> . . . . .	37
Figura 18 – Console TTN com <i>payloads</i> formatados. . . . .	37
Figura 19 – Variáveis no TagoIO. . . . .	38
Figura 20 – Amostras de areia. . . . .	39
Figura 21 – Calibração dos sensores. . . . .	40
Figura 22 – Ajuste de curva no MATLAB. . . . .	41
Figura 23 – <i>Dashboard</i> do TagoIO durante os testes. . . . .	41



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Taxa de transmissão de dados para AU915-928 . . . . .	23
Tabela 2 – Características de SF para <i>uplinks</i> em canais de 125 kHz . . . . .	25
Tabela 3 – Valores iniciais e finais do teste. . . . .	42
Tabela 4 – Valores de umidade medidos em diferentes períodos. . . . .	42





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$I^2C$	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
ABP	Ativação por Personalização
ADC	Conversor Analógico-Digital
ADR	<i>Adaptive Data Rate</i>
BW	Largura de Banda
CRC	Verificação Cíclica de Redundância
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
IoT	Internet da Coisas
LPWAN	Rede de Longo Alcance e Baixa Potência
PCB	Placa de Circuito Impresso
SF	<i>Spreading Factor</i>
SSE	Soma dos Erros ao Quadrado
TTN	<i>The Things Network</i>



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b>	<b>20</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>20</b>
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>23</b>
2.1	LORA	23
2.2	LORAWAN	25
2.2.1	<i>Adaptive Data Rate</i>	26
2.2.2	<b>Classes de Dispositivos</b>	<b>26</b>
2.2.3	<b>Estrutura dos Pacotes</b>	<b>27</b>
2.3	SENSORIAMENTO DE UMIDADE DO SOLO	28
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO</b>	<b>31</b>
3.1	<i>HARDWARE</i>	32
3.1.1	<b>Kit de Desenvolvimento</b>	<b>32</b>
3.1.2	<b>Sensor de Temperatura e Umidade do Ar</b>	<b>32</b>
3.1.3	<b>Sensores Capacitivos de Umidade do Solo</b>	<b>33</b>
3.1.4	<b>Multiplexador</b>	<b>34</b>
3.1.5	<i>Gateway</i>	35
3.2	ENVIO DE DADOS	35
3.2.1	<b>Interface de leitura de dados</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>TESTES E ANÁLISES</b>	<b>39</b>
4.1	CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	39
4.2	SIMULAÇÃO DE FUNCIONAMENTO	40
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	42
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>43</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS	43
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>45</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Minimizar os impactos das ações do homem no ambiente tem sido um dos focos do desenvolvimento tecnológico frente ao atual cenário de mudanças climáticas. Na agricultura, em especial, busca-se equilibrar o uso consciente de recursos hídricos e energéticos com a crescente demanda pela produção de alimentos de uma população cada vez maior. Uma das formas de reduzir o consumo de água é através da constante coleta de dados atmosféricos e do solo, auxiliando no gerenciamento das lavouras pelos agricultores. Nesse cenário, a aplicação de dispositivos com sensores conectados à Internet das Coisas (IoT) tem se mostrado ideal para o monitoramento de plantações, economia de recursos e aumento da produtividade e qualidade de produtos do campo.

O protocolo LoRaWAN, desenvolvido especificamente para IoT, é comumente utilizado em *Smart Cities*, mas tem também grande potencial de utilização no campo. Sua baixa necessidade de manutenção e extensa área de cobertura permite sua aplicação em grandes terrenos com baixa necessidade de deslocamento para aquisição de dados. Além disso, os dispositivos com esse tipo de comunicação apresentam baixo consumo de energia, podendo ser alimentados através de baterias por longos períodos de tempo e possuem fácil implementação, além de permitirem o monitoramento simultâneo de múltiplos sensores [1].

Uma das possíveis aplicações do IoT com LoraWAN na agricultura é o controle inteligente da irrigação através de sensores inseridos no solo. A importância da obtenção de dados detalhados da umidade da terra se deve ao fato de que, em grandes áreas de cultivo, mesmo 1 milímetro de água adicionada em excesso por unidade de área pode representar um grande volume de desperdício. Além disso, há, ainda, um aumento dispensável no consumo de energia elétrica para alimentar as bombas de água e demais equipamentos de irrigação, o qual, em algumas regiões do Brasil, pode ser responsável por até 30% dos custos de produção [2].

Já existem, no mercado, equipamentos com sensores de alta precisão que captam informações de umidade do solo e da atmosfera para fins de pesquisa. No entanto, esses dispositivos têm preço elevado, sendo acessíveis apenas aos grandes produtores. Além disso, o alto custo desses equipamentos inviabiliza sua utilização em múltiplos pontos do terreno, o que é necessário para um monitoramento mais detalhado, uma vez que, em grandes áreas, pode haver uma grande variação da composição do solo. É interessante, portanto, o desenvolvimento de dispositivos semelhantes que sacrifiquem a alta acurácia em favor de um baixo custo de produção.

## 1.1 OBJETIVOS

O tema desse trabalho surgiu de uma ideia do professor coorientador, do Centro de Ciências Agrárias da UFSC, de aplicar tecnologias de IoT no monitoramento de umidade do solo, desenvolvendo um dispositivo que possa ser utilizado em futuras pesquisas da universidade e, possivelmente, transformado em um produto final. A demanda levantada foi por um equipamento capaz de coletar diversos dados ambientais periodicamente, permitindo um gerenciamento mais inteligente da irrigação.

Entende-se que, no desenvolvimento de um equipamento com transdutores, a confiabilidade das medições é proporcional ao preço dos componentes e esse fator deve ser levado em consideração durante o projeto. A intenção, nesse trabalho, é desenvolver um dispositivo que possua baixo custo, mesmo que isso represente uma precisão menor do que a dos equipamentos disponíveis hoje no mercado. A ideia é que ele possa ser replicado com facilidade e utilizado em diferentes pontos de um terreno, conforme a variação do solo.

Foram identificados o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho, apresentados nas subseções seguintes.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver o protótipo de um equipamento de baixo custo que coleta dados de umidade do solo em diferentes níveis de profundidade, umidade relativa do ar e temperatura e transmite-os pelo protocolo LoRaWAN para que sejam visualizados e descarregados no computador.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos identificados que guiam a elaboração deste trabalho são:

- a) Montar um circuito integrando sensores de umidade da terra, do ar e temperatura com um kit de desenvolvimento com tecnologia LoRaWAN;
- b) Calibrar sensores e testar o funcionamento do dispositivo no solo;
- c) Conectar o dispositivo ao servidor de rede e decodificar os dados;
- d) Criar uma interface simples e de fácil uso para que os dados possam ser visualizados e descarregados em forma de arquivo CSV.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 2: fundamentação teórica da tecnologia LoRaWAN e dos sensores capacitivos de umidade do solo.

Capítulo 3: desenvolvimento do dispositivo, com o diagrama esquemático do circuito, detalhamento dos componentes e configuração do envio e recebimento dos dados.

Capítulo 4: calibração dos sensores, testes de funcionamento e análise dos resultados alcançados.

Capítulo 5: conclusões e propostas de trabalhos futuros.





## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O conceito de Rede de Longo Alcance e Baixa Potência (LPWAN) se destaca entre as redes de comunicação sem fio por proporcionar um longo alcance com baixo consumo energético e baixo custo, acompanhados, porém, de uma baixa taxa de transmissão de dados e maior latência [3]. Uma das várias tecnologias concorrentes de LPWAN é a modulação LoRa com o protocolo LoRaWAN, que serão descritos a seguir. Também será discutido nas próximas seções as características do funcionamento dos sensores capacitivos de umidade do solo, utilizados nesse projeto.

### 2.1 LORA

LoRa (abreviatura para *Long Range*) é uma tecnologia de modulação para LPWANs criada pela Semtech que possui um alcance de até 5 km em áreas urbanas, podendo atingir até 15 km em áreas rurais [4]. Ela apresenta um baixo consumo de energia, permitindo o desenvolvimento de dispositivos alimentados por baterias com vida útil superior a 10 anos, característica ideal para diversas aplicações de IoT. A modulação LoRa opera em diferentes faixas de frequência abaixo de 1 GHz conforme a região na qual é aplicada e suporta uma taxa de dados de até 50 kbps [5]. No Brasil, utiliza-se o intervalo de 915 MHz a 928 MHz (AU915-928), cujas características para *uplink* são detalhadas na Tabela 1.

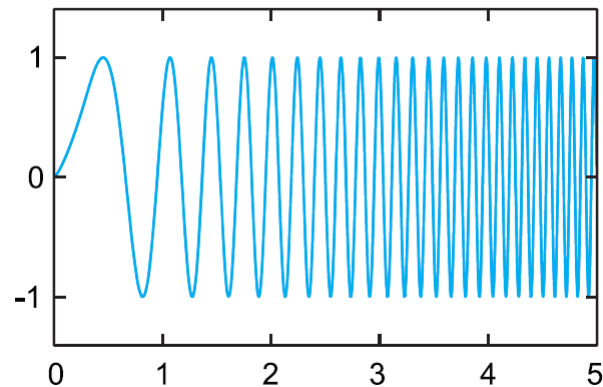
Tabela 1 – Taxa de transmissão de dados para AU915-928

Taxa de transmissão de dados	<i>Spreading Factor</i>	Frequência do Canal	<i>Bitrate</i>	Número máximo de bytes no <i>payload</i>
0	SF12	125 kHz	250 bps	59
1	SF11	125 kHz	440 bps	59
2	SF10	125 kHz	980 bps	59
3	SF9	125 kHz	1760 bps	123
4	SF8	125 kHz	3125 bps	230
5	SF7	125 kHz	5470 bps	230

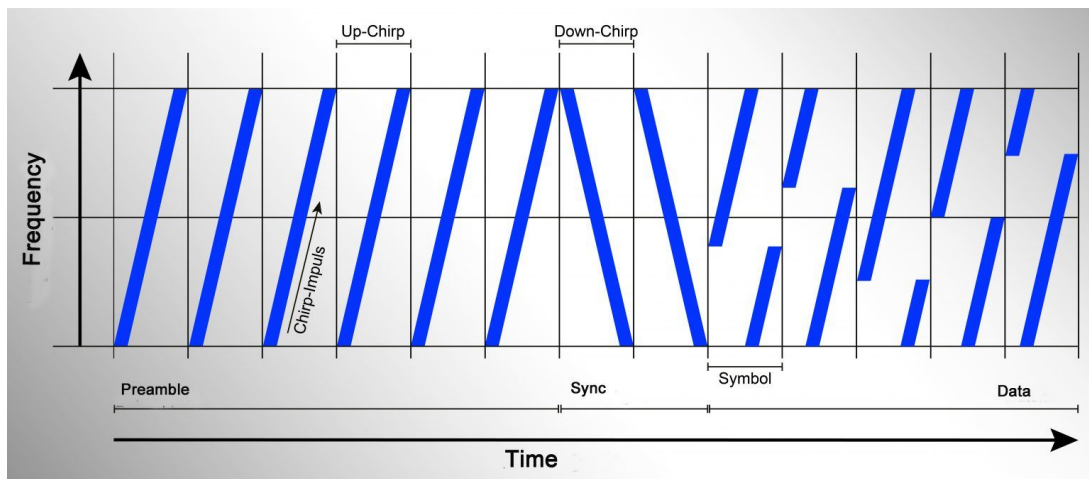
Fonte: *RP002-1.0.3 LoRaWAN® Regional Parameters* [6]

Para atingir esses parâmetros, a modulação LoRa utiliza *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Nela, cada símbolo é convertido em um *chirp*, ou seja, um sinal que varia continuamente na frequência, como ilustrado na Figura 1, que varre toda a Largura de Banda (BW). A diferença entre os símbolos é dada pela frequência em que cada um deles começa, de forma que o número disponível de símbolos depende do número possível de frequências iniciais. Um exemplo dessa modulação pode ser observado na Figura 2.

O parâmetro SF (*Spreading Factor*) representa a quantidade de bits por símbolo e determina a ordem da modulação  $M = 2^{SF}$ , além da duração do *chirp*,  $T_{simb} = M/BW$ . Com esse valor determina-se, também, a taxa com a qual a frequência do *chirp* varia, chamada de *Chirp Rate*, dada por  $\mu = BW/T_{simb}$  [7].

Figura 1 – Ilustração de um sinal *chirp*.

Fonte: Semtech. Extraído de [4]

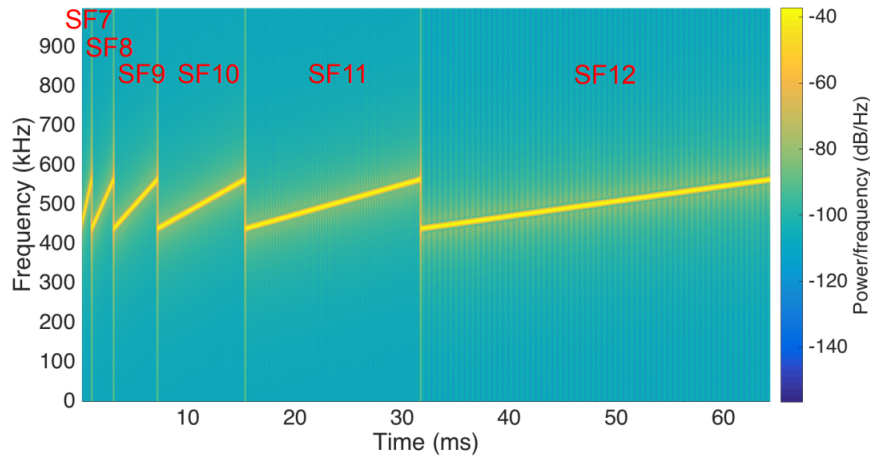
Figura 2 – *Chirp Spread Spectrum*.

Fonte: Moko Smart. Extraído de [8]

A modulação LoRa possui seis fatores de espalhamento (SF7 a SF12, ilustrados na Figura 3). Quanto maior for o SF utilizado, maior o tempo no ar e mais longe o sinal pode viajar e ser recebido sem erros pelo *gateway*, o que pode ser observado na Tabela 2, para os SF7 - SF10. Além disso, diferentes fatores de espalhamento são praticamente ortogonais entre si, o que permite que sinais no mesmo canal de frequência, mas com SF diferente, sejam transmitidos simultaneamente praticamente sem interferir uns aos outros [4].

O processo de *dechirping* é realizado em cada símbolo ao multiplicá-lo pelo complexo conjugado do *chirp* base, o qual pode ter tanto um aumento contínuo de frequência (*Upchirp*) quanto uma diminuição (*Downchirp*). O sinal resultante dessa multiplicação é

Figura 3 – Simulação de modulação LoRa com diferentes SF.



Fonte: Extraído de [9]

Tabela 2 – Características de SF para *uplinks* em canais de 125 kHz

<i>Spreading Factor</i>	Taxa de Bits	Alcance (depende do terreno)	Tempo no Ar (para um <i>payload</i> de 11bits)
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	103 ms
SF7	5470 bps	2 km	61 ms

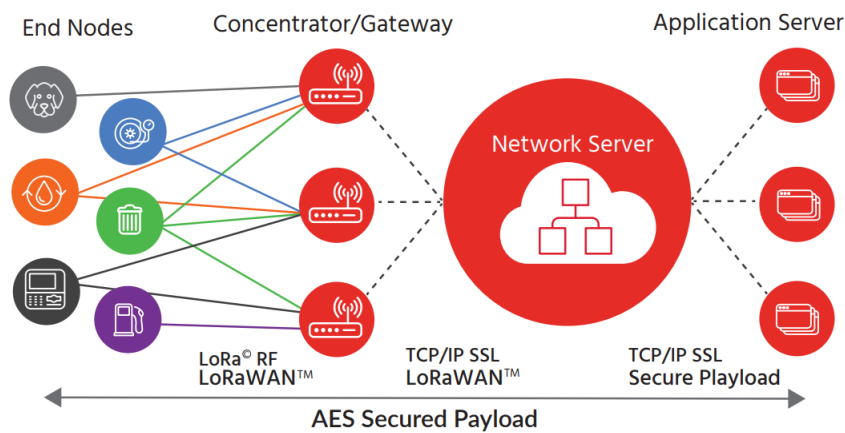
Fonte: Semtech [4]

uma senoide, cuja frequência, obtida através de uma DFT, indica o símbolo transmitido [7].

## 2.2 LORAWAN

O LoRaWAN é um protocolo aberto de rede baseado em LoRa, criado pela LoRa Alliance, e que busca regular a comunicação entre dispositivos, servidores e componentes de *software* de forma eficiente e segura. Nele, faz-se uso de um protocolo de acesso ao meio chamado Aloha, em que os dispositivos são assíncronos e comunicam quando possuem dados prontos para transmitir [10]. Ele apresenta uma topologia estrela de estrelas, ilustrada na Figura 4, na qual os *gateways* atuam encaminhando mensagens dos dispositivos (*End Nodes*) para um servidor de rede (*Network Server*) através de uma comunicação IP padrão. Esse servidor é responsável por organizar a rede, por exemplo, filtrando *uplinks* redundantes e executando verificações de segurança [5].

Figura 4 – Topologia estrela de estrelas LoRaWAN.



Fonte: RIOT e Bridgera. Extraído de [5]

### 2.2.1 Adaptive Data Rate

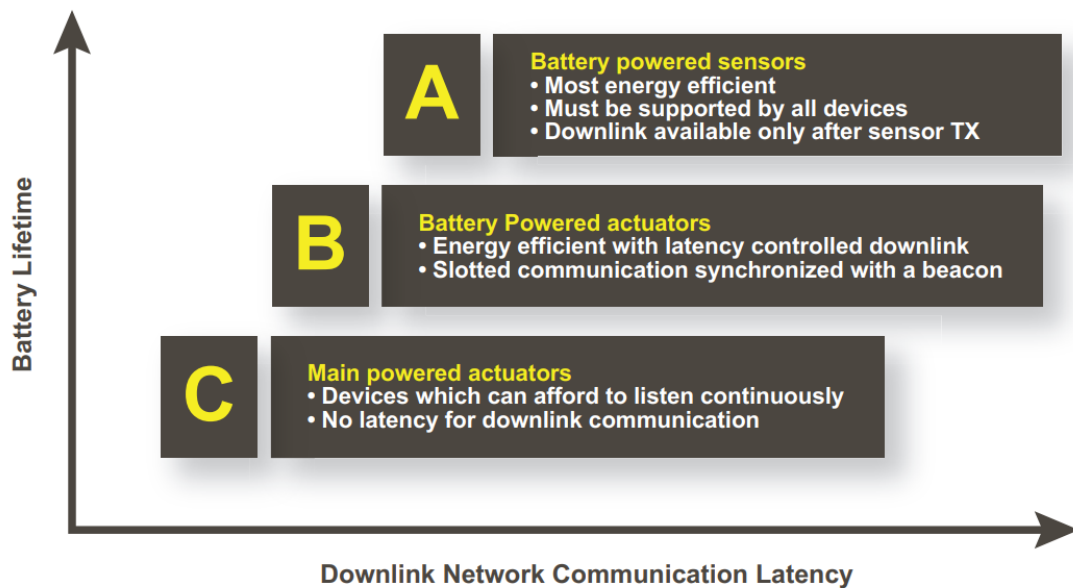
A comunicação entre dispositivos e *gateway* se dá em diferentes frequências e taxas de transmissão de dados. Para que seja possível receber várias mensagens simultaneamente, o LoRaWAN utiliza o algoritmo *Adaptive Data Rate* (ADR), que gerencia o SF dos *end nodes* de acordo com a necessidade. Nesse caso, um dispositivo que tenha uma boa conexão e esteja próximo do *gateway*, por exemplo, utilizará uma taxa de transmissão mais alta, reduzindo o tempo no ar e permitindo que mais mensagens sejam transmitidas pelos outros *nodes*. Como consequência, o LoRaWAN possui uma alta capacidade de receber mensagens, otimiza o tempo de vida das baterias e apresenta alta escalabilidade entre as alternativas de protocolos de rede LPWAN [10].

### 2.2.2 Classes de Dispositivos

O protocolo LoRaWAN possui três diferentes classes de dispositivos, chamadas A, B e C, que se adaptam a diferentes necessidades de projeto. Na classe A, ideal para sensores alimentados por baterias, os dispositivos podem receber *downlinks* do servidor apenas em um curto período após a transmissão de um *uplink*. Na classe B, além dos períodos disponíveis para *downlink* na classe A, existem, ainda, períodos agendados nos quais os dispositivos podem receber mensagens do *gateway*. Já na classe C, os dispositivos estão sempre disponíveis para receber *downlinks*, exceto quando estão transmitindo [10].

Essas três classes tem um fator decrescente de eficiência energética, de forma que dispositivos de Classe A são mais indicados para maximizar a vida útil das baterias. Essa economia de energia vem acompanhada, no entanto, de uma maior latência no recebimento de *downlinks*, inexistente nos dispositivos de classe C. Essa relação pode ser melhor entendida na Figura 5.

Figura 5 – Relação de classes LoRaWAN.

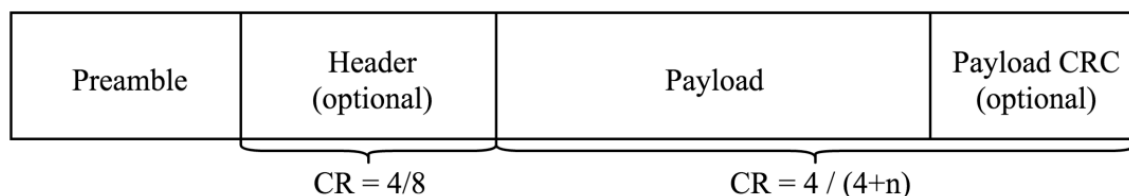


Fonte: Lora Alliance. Extraído de [10]

### 2.2.3 Estrutura dos Pacotes

Os pacotes LoRa começam com um preâmbulo contendo de 6 a 65535 símbolos, seguidos de 4.25 símbolos adicionados pelo rádio. Há, então, um *header*, opcional, no qual é possível descrever o tamanho do *payload*, taxa de transmissão e uso de Verificação Cíclica de Redundância (CRC). Em seguida, apresenta-se o *payload*, contendo os dados transmitidos na mensagem em 1 a 255 bytes. Caso desejado, adiciona-se o CRC de 16 bits ao final do pacote [11]. Essa estrutura pode ser melhor observada na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura dos pacotes LoRaWAN.



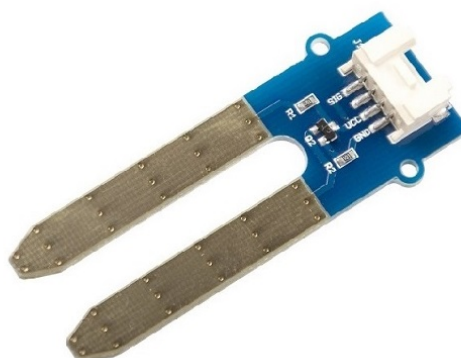
Fonte: Extraído de [12]

## 2.3 SENSORIAMENTO DE UMIDADE DO SOLO

Uma forma não destrutiva de se estimar a concentração de umidade em um solo é por meio da utilização de sensores que realizam medidas de forma indireta, ou seja, através de propriedades químicas e físicas relacionadas a esse parâmetro. Podemos classificar em duas categorias distintas os sensores que recorrem às propriedades elétricas da água, para obter essa concentração, sendo eles os sensores resistivos e capacitivos. [13].

Sensores resistivos, como o exemplo da Figura 7, são compostos de duas hastes nas quais se aplica uma diferença de potencial e operam monitorando a resistividade do solo através da corrente resultante entre elas. Uma vez que as hastes possuem material metálico em contato direto com o solo, esse tipo de sensor sofre facilmente corrosão, podendo fornecer resultados imprecisos em pouco tempo de uso [14].

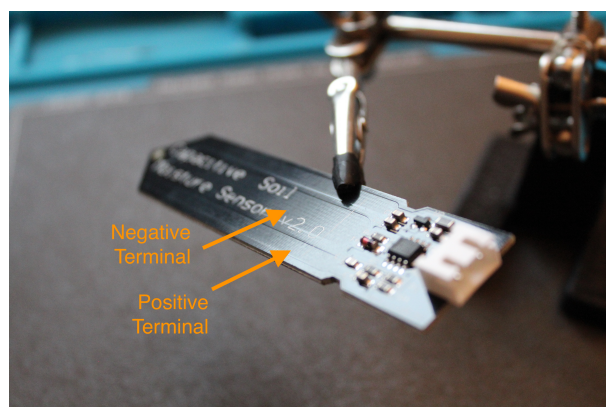
Figura 7 – Sensor de umidade resistivo de baixo custo.



Fonte: FilipeFlop. Extraído de [15]

Sensores capacitivos, por outro lado, são formados por duas placas espaçadas, como mostrado na Figura 8 inseridas no solo, atuando como um capacitor. Com esse método, as amostras de solo contidas dentro dessas placas atuam como um material dielétrico e é possível prever a umidade do solo através da capacitância observada [13]. Esses sensores possuem um tempo de vida maior, visto que não há nenhum componente metálico do circuito em contato direto com umidade.

Figura 8 – Exemplo de sensor capacitivo de umidade do solo.



Fonte: Extraído de [16]

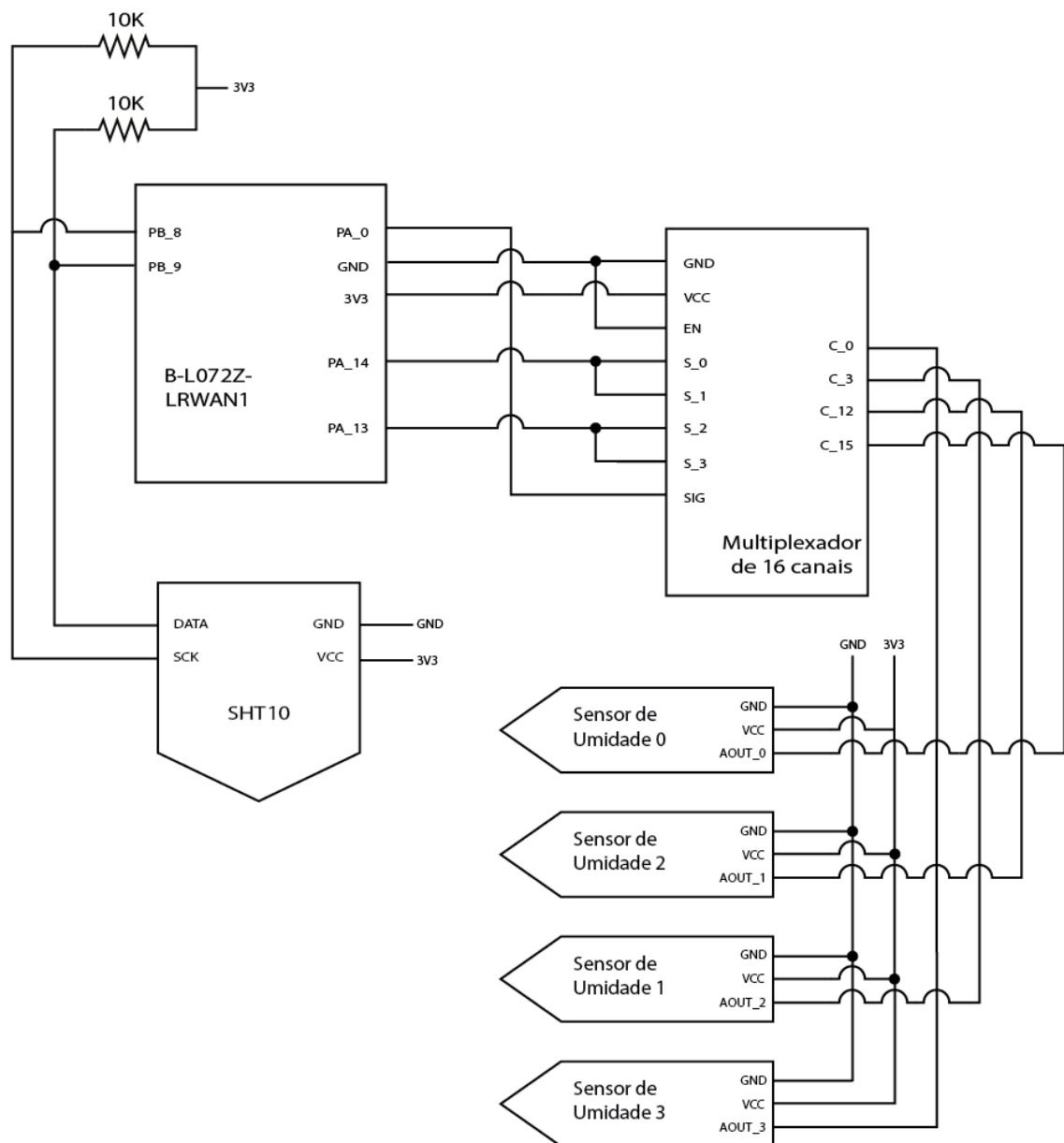




### 3 DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO

O dispositivo montado consiste em um kit de desenvolvimento com LoRaWAN conectado a 5 sensores diferentes, coletando dados de 6 variáveis distintas. Um esquemático detalhado das conexões pode ser observado na Figura 9. A seguir, serão vistos com mais detalhes cada um dos elementos que compõem o dispositivo, além do equipamento e procedimentos tomados para transmitir os dados coletados para a nuvem utilizando LoRaWAN.

Figura 9 – Circuito detalhado.



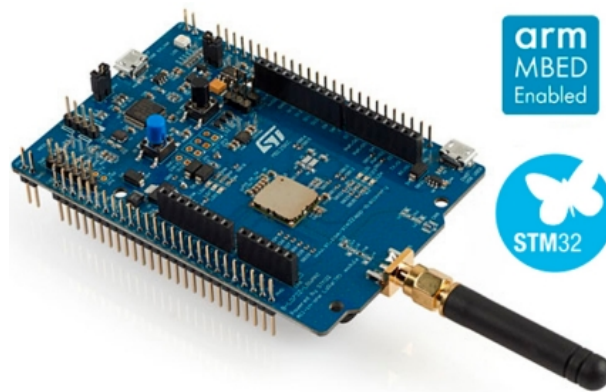
Fonte: do autor.

### 3.1 HARDWARE

#### 3.1.1 Kit de Desenvolvimento

Utilizou-se, nesse projeto o kit de desenvolvimento B-L072ZLRWAN1, da STMicroelectronics, mostrado na Figura 10. Esse kit conta com um módulo CMWX1ZZABZ-091, que inclui as portas Conversor Analógico-Digital (ADC) e *Inter-Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C)* utilizadas pelos sensores e tem suporte para LoRaWAN de classe A, B e C. O microcontrolador é do modelo STM32L072CZ e o transceptor de longo alcance SX1276. Sua alimentação pode ser feita por cabo USB ou utilizando três baterias AAA [17]. A programação do kit de desenvolvimento foi feita utilizando um *software* do sistema operacional Linux, disponível no Github como "CL - Configurador LoraWan"[18], e usando como base um código de implementação de dispositivo LoRaMac classe A [19], desenvolvido pela Semtech e encontrado, em uma versão adaptada, em [20].

Figura 10 – Kit de desenvolvimento B-L072ZLRWAN1.



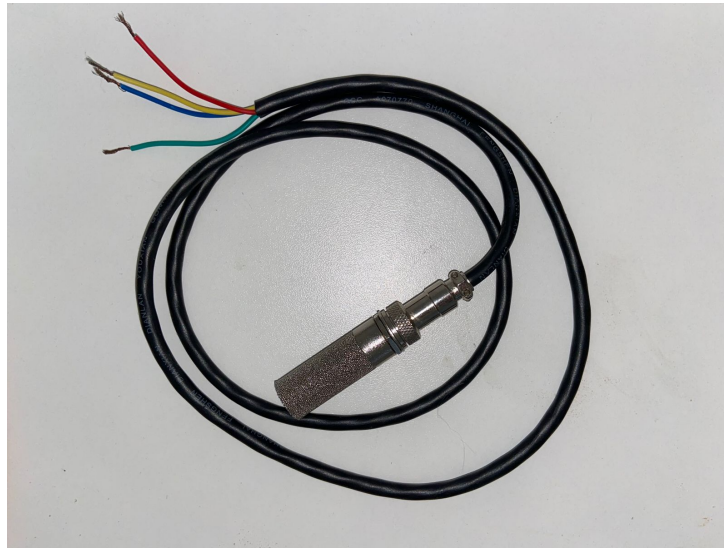
Fonte: STMicroelectronics. Extraído de [17]

#### 3.1.2 Sensor de Temperatura e Umidade do Ar

A observação de temperatura e umidade do ar ajudam a correlacionar o movimento ascendente da água no solo com as condições climáticas. Dado que o dispositivo projetado nesse trabalho tem como finalidade a sua aplicação de forma contínua no campo, fez-se necessário o uso de sensores capazes de suportar as ações do tempo, como vento, chuva e poeira, por longos períodos sem causar prejuízos ao seu funcionamento.

Para medir a temperatura e umidade do ar, optou-se pelo sensor modelo SHT10 (Figura 11), soldado a uma estrutura de proteção metálica a prova d'água, e que garante alta circulação de ar com alta resistência a temperatura e corrosão. Esse sensor integra sensoriamento com processamento de sinal e possui auto-calibração interna. Características mais detalhadas podem ser encontradas no manual técnico, disponível em [21].

Figura 11 – Sensor SHT10.



Fonte: do autor.

A seleção e leitura dos dados desse sensor foram feitas pelas portas reservadas para  $I^2C$ , PB8 e PB9 [22]. O acréscimo de um circuito *pull up* com resistores de 10 k $\Omega$  é necessário para que o mesmo funcione corretamente.

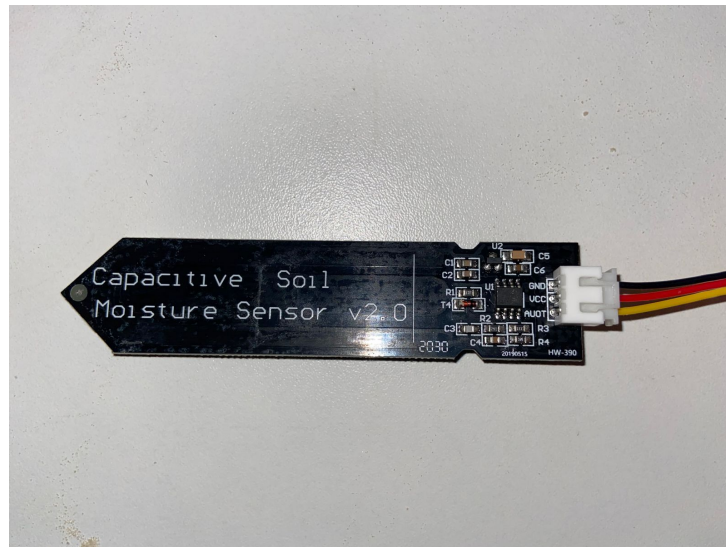
### 3.1.3 Sensores Capacitivos de Umidade do Solo

Os sensores capacitivos de umidade do solo utilizados nesse projeto, exemplificados na Figura 12, têm como indicação de modelo "*Capacitive Soil Moisture Sensor V2.0*". Esses são os sensores capacitivos de baixo custo mais comuns no mercado e foram adquiridos pelo site Eletrogate [23] por aproximadamente R\$20,00 a unidade.

A escolha de utilizar quatro sensores dessa categoria no projeto se deu visando acompanhar como a frente de molhamento se desloca durante a percolação da água no perfil do solo. Considerou-se, para isso, a profundidade de crescimento das raízes das espécies vegetais mais comumente cultivadas no Brasil e estabeleceu-se uma profundidade de observação de 50 cm. Logo, com quatro sensores, seria possível desenvolver uma estrutura física em que os sensores são fixos na terra em intervalos de cerca de 12 cm, permitindo o monitoramento da umidade do solo ao longo da raiz.

Esse sensor, apesar de ter componentes eletrônicos expostos, possui uma separação entre a região inserida no solo e o circuito, o que garante que ele possa ser eventualmente fixado em uma estrutura e utilizado sem prejuízos ao seu funcionamento por conta de corrosão.

Figura 12 – Sensor capacitivo de umidade do solo.

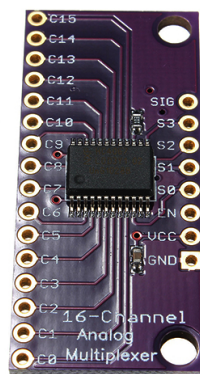


Fonte: do autor.

### 3.1.4 Multiplexador

Apesar do módulo do kit de desenvolvimento apresentar quatro portas ADC, algumas já estão sendo utilizadas pelo sistema, o que tornou necessária a aquisição de um multiplexador de modo a conectar todos os sensores capacitivos de umidade. O componente escolhido foi o módulo multiplexador AD 16 Canais CD74HC4067 [24], representado na Figura 13. Ele foi testado, inicialmente, com tensões já conhecidas para garantir um funcionamento correto.

Figura 13 – Multiplexador AD 16 Canais CD74HC4067.



Fonte: FilipeFloP. Extraído de [25]

A cada preparação de pacote, as portas PA13 e PA14 do kit de desenvolvimento enviam uma combinação de dois bits de sinal para o multiplexador, que seleciona o sensor correspondente e retorna o valor de tensão para o ADC. Isso é feito quatro vezes, sequencialmente, em cada ciclo, realizando a leitura de todos os sensores. Em seguida, esses valores de tensão são convertidos em valores de umidade pela equação descrita na Seção 4.1 e adicionados ao pacote.

### 3.1.5 Gateway

O *gateway* utilizado foi o modelo *ITG 200 Indoor*, da empresa Khomp, com suporte para protocolos LoRa ou IEEE 802.15.4 [26]. A Figura 14 mostra o *gateway* utilizado. A conexão com a internet foi feita utilizando um cabo *ethernet* e o *gateway* foi instalado no mesmo apartamento em que os testes foram realizados. Para monitorar o recebimento de pacotes, foi feito o cadastro do *gateway* no servidor de rede da TTN (*The Things Network*)[27], cujo console pode ser observado na Figura 15.

Figura 14 – *Gateway ITG 200 Indoor*.

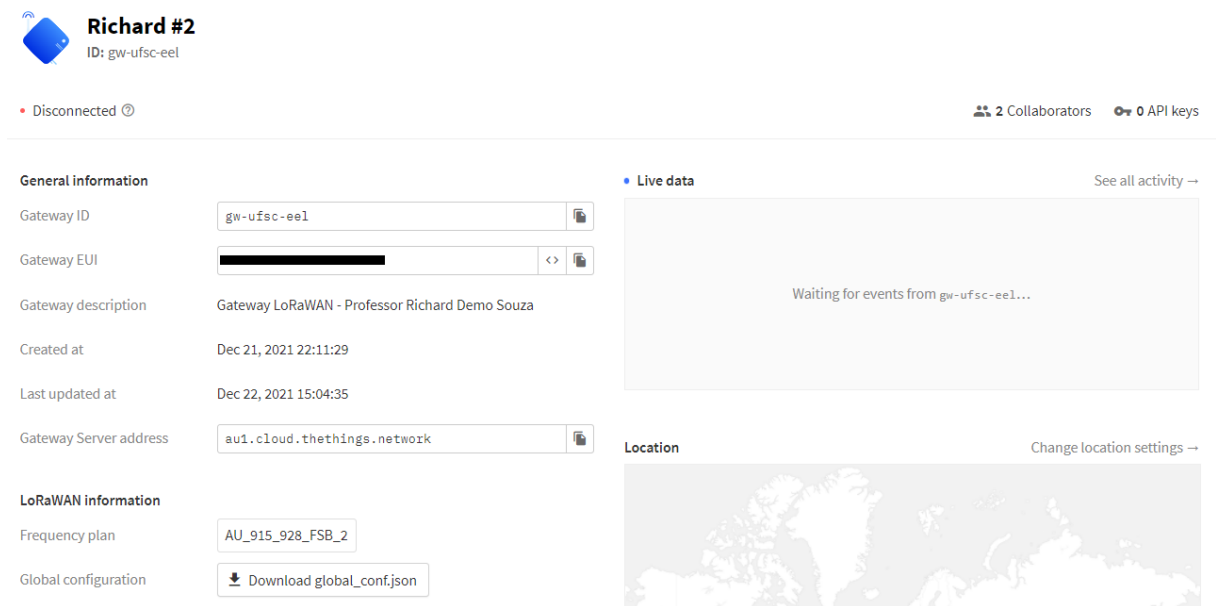


Fonte: Khomp. Extraído de [26]

## 3.2 ENVIO DE DADOS

Depois da leitura de todos os sensores, os dados são inseridos no *payload*, caracterizado pelo código da Figura 16. O dispositivo foi configurado para a região AU915-928, com a função ADR ligada, LoRaWAN versão MAC V1.0.3 e utilizando o método de Ativação por Personalização (ABP). Após seu cadastro no console da TTN, os *uplinks* desse dispositivo passaram a ser encaminhados, com os *payloads* decodificados, para a página da aplicação.

Figura 15 – Console TTN.



Fonte: do autor.

Figura 16 – Configuração do *payload* para envio.

```

AppDataSizeBackup = AppDataSize = 11;

AppDataBuffer[0] = (int)umidade0;
AppDataBuffer[1] = (int)((umidade0-AppDataBuffer[0])*10);

AppDataBuffer[2] = (int)umidade1;
AppDataBuffer[3] = (int)((umidade1-AppDataBuffer[2])*10);

AppDataBuffer[4] = (int)umidade2;
AppDataBuffer[5] = (int)((umidade2-AppDataBuffer[4])*10);

AppDataBuffer[6] = (int)umidade3;
AppDataBuffer[7] = (int)((umidade3-AppDataBuffer[6])*10);

AppDataBuffer[8] = (int)temperaturaAr;
AppDataBuffer[9] = (int)((temperaturaAr-AppDataBuffer[8])*10);

AppDataBuffer[10] = (int)umidadeAr;

```

Fonte: do autor.

### 3.2.1 Interface de leitura de dados

Para facilitar o entendimento dos pacotes recebidos, um pequeno código em *javascript* foi utilizado para formatar o *payload* e separar os dados em variáveis, como observado nas Figuras 17 e 18. Em seguida, essas variáveis foram encaminhados, utilizando um *webhook*, para o TagoIO [28], uma ferramenta *cloud* desenvolvida para gerenciar soluções

de IoT. Nele é possível armazenar os dados por até um mês de forma gratuita e, entre suas funcionalidades, está a criação de uma *dashboard* com tabelas e gráficos das variáveis desejadas. Além disso, é possível realizar o *download* dos dados em formato .csv para que o arquivo seja utilizado em *softwares* mais especializados. Uma tela com as variáveis no TagoIO pode ser visualizada na Figura 19.

Figura 17 – Formatação do *payload*.

### Default uplink payload formatter

**Setup**

Formatter type\*  
Javascript

Formatter parameter\*

```

1 function signed(bits, value) { return value & (1 << (bits - 1)) ? value - (1 << bits) : value; }
2
3 function decodeUplink(input) {
4   return {
5     data: {
6       umidade0: (input.bytes[0]+(input.bytes[1]/10)),
7       umidade1: (input.bytes[2]+(input.bytes[3]/10)),
8       umidade2: (input.bytes[4]+(input.bytes[5]/10)),
9       umidade3: (input.bytes[6]+(input.bytes[7]/10)),
10      temperatura: (input.bytes[8] + (input.bytes[9]/10)),
11      umidadeAr: (input.bytes[10])
12    }
13  };
14 }
15

```

Fonte: do autor.

Figura 18 – Console TTN com *payloads* formatados.

Time	Type	Data preview
19:02:50	Forward uplink data message	Payload: { temperatura: 26.3, umidade0: 3.1, umidade1: 7.9, umidade2: 12.6, umidade3: 17.6, umidadeAr: 72 } 03 01 07 09 0C 06 11 06 ...
19:02:50	Successfully processed data mess...	DevAddr: 26 80 C7 06 FCnt: 119 FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: -1 RSSI: -102
19:01:33	Successfully processed data mess...	DevAddr: 26 80 C7 06 FCnt: 118 FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: -0.5 RSSI: -102
19:01:27	Forward uplink data message	Payload: { temperatura: 26.3, umidade0: 3.1, umidade1: 7.8, umidade2: 12.6, umidade3: 17.7, umidadeAr: 72 } 03 01 07 09 0C 06 11 07 ...
19:01:27	Successfully processed data mess...	DevAddr: 26 80 C7 06 FCnt: 118 FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: 0.8 RSSI: -100
19:00:03	Successfully processed data mess...	DevAddr: 26 80 C7 06 FCnt: 117 FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: -1.2 RSSI: -101
18:59:56	Forward uplink data message	Payload: { temperatura: 26.3, umidade0: 3.1, umidade1: 7.9, umidade2: 12.6, umidade3: 17.6, umidadeAr: 72 } 03 01 07 09 0C 06 11 06 ...
18:59:56	Successfully processed data mess...	DevAddr: 26 80 C7 06 FCnt: 117 FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: -0.5 RSSI: -103
18:58:27	Forward uplink data message	Payload: { temperatura: 26.3, umidade0: 3.1, umidade1: 7.8, umidade2: 12.6, umidade3: 17.6, umidadeAr: 73 } 03 01 07 09 0C 06 11 06 ...
18:58:27	Successfully processed data mess...	DevAddr: 26 80 C7 06 FCnt: 116 FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: -1.8 RSSI: -105
18:57:03	Successfully processed data mess...	DevAddr: 26 80 C7 06 FCnt: 115 FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: -0.5 RSSI: -103
18:56:56	Forward uplink data message	Payload: { temperatura: 26.3, umidade0: 3.1, umidade1: 7.9, umidade2: 12.6, umidade3: 17.6, umidadeAr: 72 } 03 01 07 09 0C 06 11 06 ...
18:56:56	Successfully processed data mess...	DevAddr: 26 80 C7 06 FCnt: 115 FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: -1 RSSI: -103
18:52:27	Forward uplink data message	Payload: { temperatura: 26.3, umidade0: 3.2, umidade1: 7.9, umidade2: 12.6, umidade3: 17.6, umidadeAr: 72 } 03 02 07 09 0C 06 11 06 ...

Fonte: do autor.

Figura 19 – Variáveis no TagoIO.

Device #5  
Data retention 1 Month | Amount of data records 21

Visible

General Information Variables Tags More

Variables  
Manage the variables of all the devices in this bucket.

Refresh variables Delete selected Empty Bucket

Variable	Device	Number of registers	Apply data retention rule
<input type="checkbox"/> rssi	620a90fc936cfe00130ef9da	1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> snr	620a90fc936cfe00130ef9da	1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> temperatura	620a90fc936cfe00130ef9da	1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> timestamp	620a90fc936cfe00130ef9da	1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> umidade0	620a90fc936cfe00130ef9da	1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> umidade1	620a90fc936cfe00130ef9da	1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> umidade2	620a90fc936cfe00130ef9da	1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> umidade3	620a90fc936cfe00130ef9da	1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> umidade4	620a90fc936cfe00130ef9da	1	<input checked="" type="checkbox"/>

< 1 2 > 21 rows

Save

Fonte: do autor.



## 4 TESTES E ANÁLISES

O dispositivo foi montado em uma caixa, com o auxílio de *jumpers* e uma *protoboard*, e a alimentação do kit de desenvolvimento se deu através de um cabo USB conectado ao computador. Uma vez que não foi desenvolvida nenhuma estrutura física que permitisse proteger os componentes eletrônicos das ações do tempo como vento, sol e chuva, optou-se por realizar os testes do dispositivo em casa. Para isso, o professor coorientador preparou sete amostras de areia com diferentes concentrações de umidade separadas em potes plásticos, como observado na Figura 20. A umidade do solo das amostras foi medida em laboratório e variou entre 2% e 20%, com uma diferença de 3 pontos percentuais entre cada amostra consecutiva.

Figura 20 – Amostras de areia.

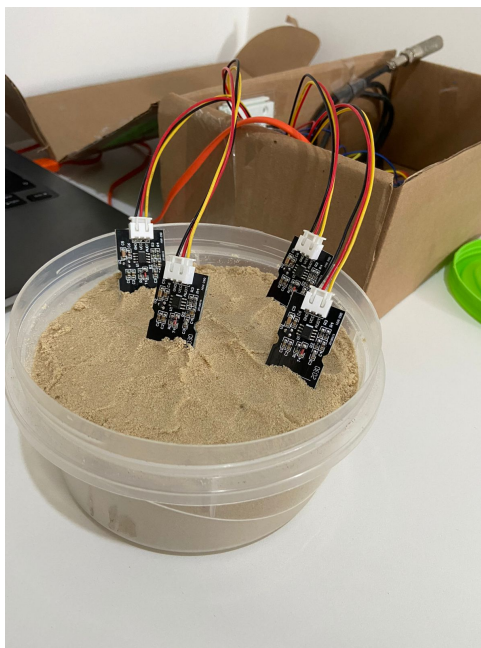


Fonte: do autor.

### 4.1 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

Segundo as especificações do produto, os sensores capacitivos de umidade da terra apresentam entrada de 3,3 - 5 V e tensões de saída entre 0 e 3 V, no entanto, o fabricante não oferece nenhum documento relacionando essa tensão com a umidade do solo. Para garantir precisão nas medições, foram necessários testes com as amostras de areia. Cada sensor foi posicionado em um mesmo pote, espaçados, durante cerca de cinco minutos, até os valores de tensão medidos se estabilizarem (Figura 21). Após esse intervalo de tempo, foram anotados os valores de tensão instantâneos para cada sensor e o procedimento se repetiu para as demais amostras com diferentes níveis de umidade da terra.

Figura 21 – Calibração dos sensores.



Fonte: do autor.

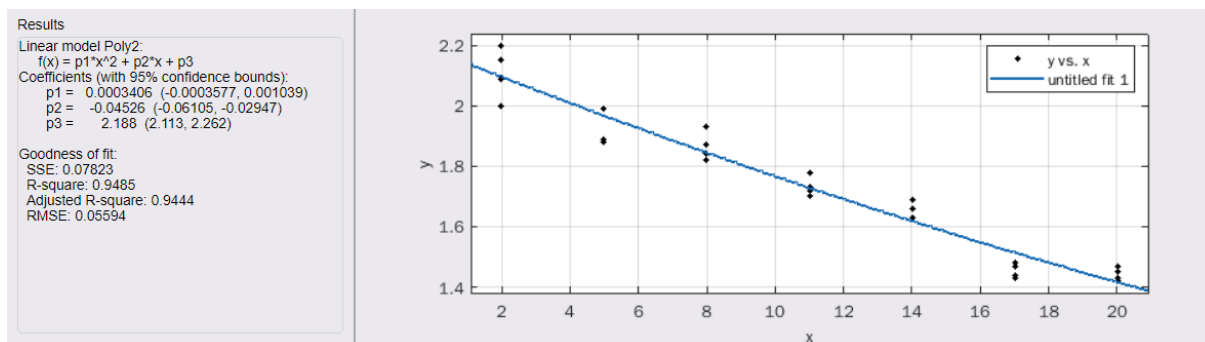
Para complementar as medidas, foram observadas, também, as tensões de saída dos sensores totalmente submersos em água, no entanto, os valores encontrados foram muito próximos dos valores medidos na areia com 20% de umidade (cerca de 1,35 V). Isso se deve, provavelmente, a limitações dos sensores e ao fato de que, em porcentagens maiores de umidade, a água tende a se separar da areia. Por esse motivo, optou-se por considerar apenas os resultados das medições feitas utilizando as amostras na calibração.

Com o uso do *software* MATLAB, foi possível, então, caracterizar o funcionamento dos sensores de umidade capacitivos. A curva que melhor se encaixou nos valores coletados foi uma equação polinomial de segundo grau, com uma Soma dos Erros ao Quadrado (SSE) de 0,07829, e pode ser observada na Figura 22. Após inserir a resolução dessa equação no código do dispositivo foi possível detectar a porcentagem de umidade da terra de forma mais precisa para amostras de 2% a 20%, o que já é satisfatório para grande parte das aplicações.

## 4.2 SIMULAÇÃO DE FUNCIONAMENTO

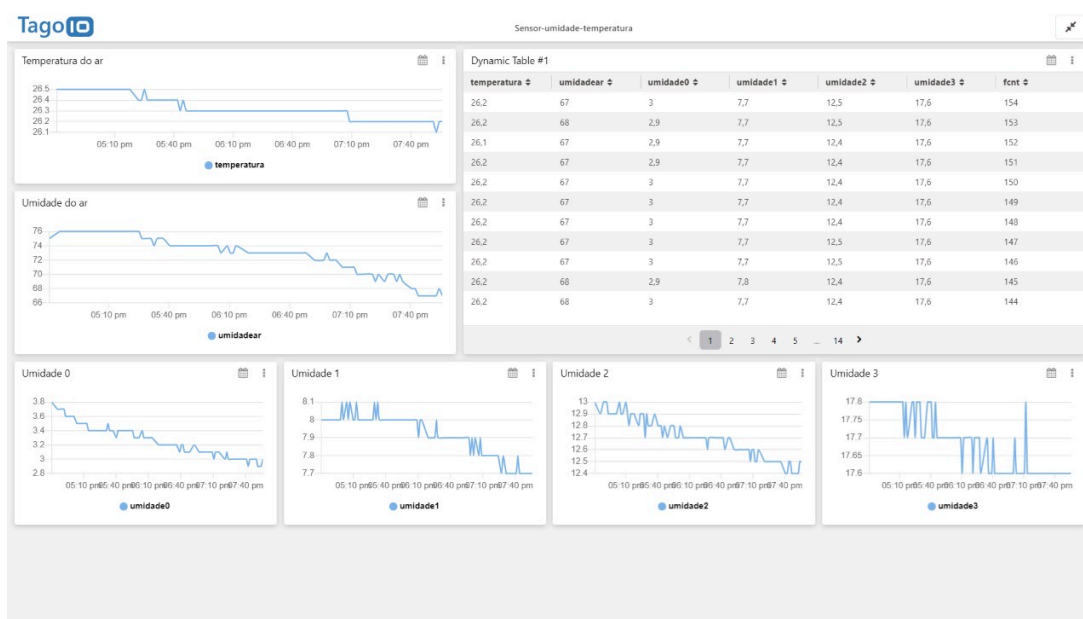
Para simular o funcionamento em campo do equipamento, alguns dias após sua calibração, cada um dos sensores de umidade do solo foi posicionado em uma amostra diferente de areia. Foram utilizadas os recipientes com 5%, 8%, 14% e 20% de umidade e o sistema ficou conectado e enviando os dados para a TTN por cerca de quatro horas. Como esse teste foi curto e a amostra de solo utilizada pequena, optou-se um intervalo

Figura 22 – Ajuste de curva no MATLAB.



Fonte: do autor.

de 90 segundos entre cada envio de pacote, a fim de acompanhar a variação de umidade nesse período. Uma imagem da *dashboard* montada no TagoIO durante os testes pode ser observada na Figura 23. Nela, percebemos a redução gradual da umidade do solo ao longo do tempo, detalhada na Tabela 3.

Figura 23 – *Dashboard* do TagoIO durante os testes.

Fonte: do autor.

Nota-se que, nos dias anteriores ao teste, os recipientes já haviam sido abertos algumas vezes, logo, um valor de umidade menor do que o inicial de cada amostra já era esperado. Para descobrir a real porcentagem de umidade de cada recipiente após a conclusão desse experimento, os mesmos foram pesados em laboratório e tiveram os resultados comparados com o peso inicial de cada amostra. A Tabela 4 apresenta uma

Tabela 3 – Valores iniciais e finais do teste.

Horário	Sensores de umidade do solo				SHT10	
	Amostra 5%	Amostra 8%	Amostra 14%	Amostra 20%	Temperatura	Umidade do Ar
16:45h	3,7%	8%	12,9%	17,8%	26,5°C	76%
20:44h	2,8%	7,6%	12,4%	17,5%	26,2°C	68%

Fonte: do autor.

comparação dos valores de umidade iniciais medidos em laboratório de cada amostra, os resultados da simulação após quatro horas e os valores de umidade medidos novamente em laboratório ao final dos testes.

Tabela 4 – Valores de umidade medidos em diferentes períodos.

Tipo de medida	Sensores de umidade do solo			
	Amostra 5%	Amostra 8%	Amostra 14%	Amostra 20%
Valor inicial medido em laboratório	5,01%	8,01%	14,02%	20,01%
Valor dos sensores após teste de 4h	2,8%	7,6%	12,4%	17,5%
Valor final medido em laboratório	4,48%	7,14%	13,2%	18,09%

Fonte: do autor.

### 4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No que diz respeito ao envio de mensagens o sistema funcionou como esperado. De forma geral, foi possível fazer o acompanhamento da umidade do solo e recuperar os dados utilizando a interface do TagoIO.

O sensor SHT10, de umidade e temperatura do ar apresentou sempre resultados coerentes com as condições meteorológicas do dia. Já, os sensores capacitivos de umidade do solo apresentaram resultados, por vezes, imprecisos. Nas amostras com 8%, 14% e 20% houve uma variação de 6,4%, 6,1% e 3,2%, respectivamente, entre o valor medido pelo sensor e em laboratório ao final das quatro horas de teste. Já a amostra de 5% de umidade apresentou uma variação muito maior, de 37,5%.

Algumas possíveis causas para os erros nos valores de umidade do solo são, em primeiro lugar, o baixo custo do componente e a falta de um manual técnico do fabricante com informações mais detalhadas sobre calibração e precisão. Notou-se, também, durante a calibração, uma influência grande da compactação do solo ao redor dos componentes nas tensões de saída, principalmente em umidades mais baixas, além dos recipientes usados serem relativamente pequenos para o tamanho dos sensores. Há, também, a possibilidade de que areia tenha se acumulado nos componentes entre a calibração e o teste de funcionamento e interferido nas leituras.

## 5 CONCLUSÃO

O trabalho atingiu seu objetivo geral de desenvolver um protótipo de baixo custo para o monitoramento de umidade do solo com comunicação LoRaWAN. O dispositivo projetado conseguiu ler os sensores e enviar os dados para o servidor de rede, onde os mesmos foram formatados e direcionados para uma interface na nuvem, satisfazendo, também, os objetivos específicos.

Como comentado no início do trabalho, uma das motivações para o desenvolvimento desse projeto foi a de utilizá-lo para testes na universidade e, possivelmente, transformá-lo em um produto final. Para que isso seja possível, foram detectados pontos de melhora no que diz respeito, principalmente, aos sensores de umidade do solo. Algumas propostas de trabalhos futuros são expostas na seção a seguir.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

- Realização de mais testes envolvendo os sensores capacitivos de umidade, em condições mais fiéis à aplicação final e considerando uma diversidade maior de umidades e tipos de solo. Recalibrar os sensores com base nos novos resultados e decidir se esse modelo de sensor é adequado para as necessidades do projeto ou se é necessário procurar alternativas mais caras;
- Confecção de uma Placa de Circuito Impresso (PCB) contendo apenas os componentes essenciais para o funcionamento do projeto, reduzindo os custos do dispositivo e eliminando a necessidade do kit de desenvolvimento;
- Design de uma estrutura física que permita a fixação dos sensores e circuito no solo e uma *case* que garanta que os componentes eletrônicos tenham um bom isolamento das ações do tempo, sem comprometer a qualidade do envio de sinais;
- Testar o desempenho do dispositivo em áreas rurais.



## REFERÊNCIAS

- [1] D. Davcev, K. Mitreski, S. Trajkovic, V. Nikolovski e N. Koteli, “IoT agriculture system based on LoRaWAN”, *14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, pp. 1–4, jun. de 2018. DOI: 10.1109/WFCS.2018.8402368.
- [2] R. Togneri, C. Kamienski, R. Dantas, R. Prati, A. Toscano, J.-P. Soininen e T. S. Cinnotti, “Advancing IoT-Based Smart Irrigation”, *IEEE Internet of Things Magazine*, v. 2, n. 4, pp. 20–25, 2019. DOI: 10.1109/IOTM.0001.1900046.
- [3] U. Raza, P. Kulkarni e M. Sooriyabandara, “Low Power Wide Area Networks: An Overview”, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 19, n. 2, pp. 855–873, 2017. DOI: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [4] Semtech, “LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview”, Semtech Corporation, rel. técn., 2019.
- [5] G. Dunko, J. Misra, J. Robertson e T. Snyder, *A Reference Guide to the Internet of Things*. Raleigh, NC: Bridgera LLC, 2017.
- [6] *RP002-1.0.3 LoRaWAN® Regional Parameters*, LoRa Alliance, 2021. disp. em: [https://lora-alliance.org/resource\\_hub/rp2-1-0-3-lorawan-regional-parameters/](https://lora-alliance.org/resource_hub/rp2-1-0-3-lorawan-regional-parameters/).
- [7] T. T. Nguyen, H. H. Nguyen, R. Barton e P. Grossetete, “Efficient Design of Chirp Spread Spectrum Modulation for Low-Power Wide-Area Networks”, *IEEE Internet of Things Journal*, v. 6, n. 6, pp. 9503–9515, 2019. DOI: 10.1109/JIOT.2019.2929496.
- [8] *Moko Smart*, <https://www.mokosmart.com/lora-frequency/lora-frequency/>, Acesso: 21-02-2022, 2020.
- [9] J. Courjault, B. Vrigneau, O. Berder e M. R. Bhatnagar, “How robust is a LoRa communication against impulsive noise?”, em *PIMRC 2020*, ago. de 2020.
- [10] LoRa Alliance, “What is LoRaWAN®, A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™”, LoRa Alliance, rel. técn., 2015.

- [11] M. Bor, U. Roedig, T. Voigt e J. Alonso, “Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?”, nov. de 2016. DOI: 10.1145/2988287.2989163.
- [12] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen e W. M. Townsley, “A Study of LoRa: Long Range amp; Low Power Networks for the Internet of Things”, *Sensors*, v. 16, 2016.
- [13] Radi, Murtiningrum, Ngadisih, F. S. Muzdrikah, M. S. Nuha e F. A. Rizqi, “Calibration of Capacitive Soil Moisture Sensor (SKU:SEN0193)”, em *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICSTC.2018.8528624.
- [14] Y. J. Jeong, K. E. An, S. W. Lee e D. Seo, “Improved durability of soil humidity sensor for agricultural IoT environments”, em *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2018, pp. 1–2. DOI: 10.1109/ICCE.2018.8326223.
- [15] FilipeFlop, *Sensor de Umidade do Solo Grove*. disp. em: <https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-umidade-do-solo-grove/>.
- [16] Rbaron, *How Capacitive Soil Moisture Sensors Work*. disp. em: <https://rbaron.net/blog/2021/04/05/How-capacitive-soil-moisture-sensors-work.html>.
- [17] *STM B-L072Z-LRWAN1*, <https://www.st.com/en/evaluation-tools/b-l072z-lrwan1.html>, Acesso: 21-02-2022.
- [18] A. V. dos Santos, *Software CL - Configurador Lora Wan*. disp. em: <https://github.com/AlexandroSantos/CL-ConfLoraMac>.
- [19] Semtech, *LoRaMac*. disp. em: <https://github.com/Lora-net/LoRaMac-node>.
- [20] A. V. dos Santos, *LoraMac-IKS01A2*. disp. em: <https://github.com/AlexandroSantos/LoraMac-IKS01A2>.
- [21] *Humidity and Temperature Sensor IC, SHT10*, Sensirion, dez. de 2011. disp. em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/897973/ETC2/SHT10.html>.
- [22] *UM2115 User manual Discovery kit for LoRaWAN™, Sigfox™, and LPWAN protocols with STM32L0, B-L072Z-LRWAN1*, STMicroelectronics, 2018.



- 
- [23] Eletrogate, *Sensor Capacitivo de Umidade do solo*. disp. em: <https://www.eletrogate.com/sensor-capacitivo-de-umidade-do-solo>.
- [24] *High-Speed CMOS Logic 16-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer*, CD74HC4067, Texas Instruments. disp. em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc4067.pdf>.
- [25] FilipeFlop, *Módulo Multiplexador AD 16 Canais CD74HC4067*. disp. em: <https://www.filipeflop.com/produto/modulo-multiplexador-ad-16-canais-cd74hc4067/>.
- [26] Khomp, *ITG 200 Indoor*. disp. em: <https://www.khomp.com/pt/produto/itg-200/>.
- [27] *The Things Network*. disp. em: <https://www.thethingsnetwork.org/>.
- [28] *TagoIO*. disp. em: <https://tago.io/>.