

**Universidade Federal de São Carlos – UFSCar**

**Campus São Carlos**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Computação – DC/UFSCar

Trabalho de Conclusão de Curso

# **Solução de Comunicação de Baixo Custo Utilizando LoRa e ESP32**

Aluno: Rodrigo Nunes Dias

Orientador: Prof. Dr. Edilson Reis Rodrigues Kato

São Carlos/SP

Semestre 2023/1

**Universidade Federal de São Carlos – UFSCar**

**Campus São Carlos**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Computação – DC/UFSCar

# SOLUÇÃO DE COMUNICAÇÃO DE BAIXO CUSTO UTILIZANDO

## LoRa e ESP32

Rodrigo Nunes Dias

Trabalho de Graduação em Engenharia de Computação apresentado ao Departamento de Computação da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Computação.

Membros da Banca:

---

Prof. Dr. Edilson Reis Rodrigues Kato  
(Orientador – DC/UFSCar)

---

Prof. Dr. Roberto Santos Inoue  
(Banca de Avaliação – DC/UFSCar)

---

Prof. Dr. Ricardo Menotti  
(Banca de Avaliação – DC/UFSCar)

São Carlos/SP

Semestre 2023/1

## AGRADECIMENTO

Agradeço, primeiramente, aos meus pais e familiares próximos por oferecerem todo o apoio tão necessário desde o início da minha jornada acadêmica. Foram muito presentes apesar de toda a distância física.

Sou grato particularmente ao Prof. Edilson Kato, que tanto se dedica ao ensino completo dos seus alunos, preparando-os tanto para a vida acadêmica quanto profissional com muita maestria.

Faço um agradecimento especial à minha namorada Michelle, ao meu amigo e sócio Saraiva e ao meu primo Pedro, por me ajudarem nesta reta final da conclusão do curso.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus amigos e colegas de turma que tornaram a experiência em São Carlos muito mais acolhedora.

## RESUMO

Este trabalho trata da avaliação do raio de alcance médio de uma rede local de comunicação com o protocolo LoRa baseado em hardware genérico de baixo custo e do estabelecimento de suas possíveis aplicações. Um objetivo secundário seria o de mapear o campus universitário de São Carlos da UFSCar para o uso futuro da solução proposta em áreas de aplicação.

**Palavras-chave:** IoT, LoRa, Rede Local, Médio Alcance, Baixo Custo, Internet das Coisas, Conectividade, Indústria 4.0, Agricultura Familiar, Comunicação de Dados, Sensoriamento Remoto.

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	8
1.1	Objetivos.....	12
2	Revisão Bibliográfica .....	14
3	Metodologia.....	18
3.1	Materiais .....	18
3.2	Validação .....	20
4	Implementação .....	22
4.1	Código .....	23
4.2	Resultados.....	25
5	Conclusão .....	31
6	Referências .....	32

## LISTA DE SIGLAS

IoT – Internet of Things (Internet das coisas, em português)

LoRa – sigla que define a tecnologia estudada neste trabalho, vem de Long Range (Grande Alcance)

Wi-Fi – Wireless Fidelity

BLE – Bluetooth Low Energy

DC/UFSCar – Departamento de Computação do Campus São Carlos da UFSCar

LPWAN – Low Power Wide-Area Network

LoRaWAN – Long Range Wide-Area Network

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações (Brasil)

PCB – Printed Circuit Board

OLED – Organic Light-Emitting Diode

ESP32 – Microcontrolador de 32 bits com Wi-Fi e Bluetooth integrados, modelo SoC desenvolvido pela Espressif Systems

SoC – System on a Chip (Sistema em um chip)

RSSI – Received Signal Strength Indicator (Indicador de Potência de Sinal Recebido)

SNR – Signal-to-Noise Ratio (Relação Sinal-Ruído)

QoS – Quality of Service (Qualidade do Serviço)

I/O – In / Out (“Entrada / Saída”, geralmente referindo-se às características de interface de um sistema)

# 1 INTRODUÇÃO

---

O desenvolvimento tecnológico das últimas décadas permitiu o advento de várias tecnologias de comunicação e sensoriamento que têm como promessa a melhoria da vida dos seres humanos. Dentro deste contexto, a popularização destes dispositivos conectados e por vezes inteligentes – também conhecidos por “internet das coisas” ou IoT (*Internet of Things*) permite uma conectividade que até pouco tempo era relegada às obras de ficção científica.

Registram-se aplicações automotivas como os veículos da Tesla [1] e da BMW [2] que usam a tecnologia para comunicação e coordenação além de localização e navegação autônoma ou semiautônoma. Dispositivos de IoT também podem ser encontrados em aplicações domésticas como rastreadores de animais de estimação, eletrodomésticos, rastreadores como os “AirTags” da Apple [3] ou da Tile [4] &c.

Os dispositivos ditos inteligentes contam com anatomias variadas, mas topologias padronizadas ou análogas. Há um conjunto de sensores, fonte de energia, processador central, possivelmente memórias e sistemas de comunicação. Estes últimos são em grande parte responsáveis pela atual revolução, por vezes denominada 4ª revolução industrial.

O conceito de 4ª revolução industrial é caracterizado por novas tecnologias que unem o mundo físico, digital e biológico em um ritmo sem precedentes. Segundo Klaus Schwab [5], que popularizou o termo em 2016, conectividade e comunicação são centrais nesta revolução, já que, na imensa maioria das vezes, o processamento dos dados não é feito nos mesmos dispositivos que eles são coletados e posteriormente distribuídos. Segundo o mesmo autor [6], é responsabilidade de todos garantir que o futuro seja inclusivo e sustentável. Desta forma, é possível inferir que sistemas de comunicação de baixo custo são essenciais neste processo de inclusão e equidade social.

Vários protocolos e tecnologias podem ser usadas para a comunicação entre os dispositivos e seu controle central, ou supervisor – tais como Ethernet, Serial, Wi-Fi, Bluetooth, Bluetooth Low Energy (BLE), Thread, celular 4G/4G Cat-M1/5G, ZigBee, Sigfox, entre outras, sendo que podem utilizar meios físicos encapsulados (como cabos de cobre ou fibra-óptica) ou não-encapsulados (como as ondas de rádio) [7].

Particularmente, a utilização de redes **LoRa** (“Long Range” – Grande Alcance) é cada vez mais interessante, pois é um protocolo de comunicação via radiofrequência, isto é, um meio



não-encapsulado. Ela cobre grandes espaços e tem a capacidade de transmissão de pequenos pacotes de dados em uma pequena largura de banda [8].

Estas características, baixa energia e longas distâncias, tornam LoRa particularmente adequada para aplicações de IoT que não demandem uma comunicação constante ou intensa, como sensoriamento remoto, alertas/sirenes de ocorrências, controle de atuadores em áreas remotas [9] &c.

Na Figura 1, pode-se ver a comparação de banda (ou capacidade de dados) e distância de transmissão de formas de comunicação baseadas em espectro eletromagnético e o posicionamento da LoRa com os mais conhecidos Wi-Fi e rede celular (ou móvel).

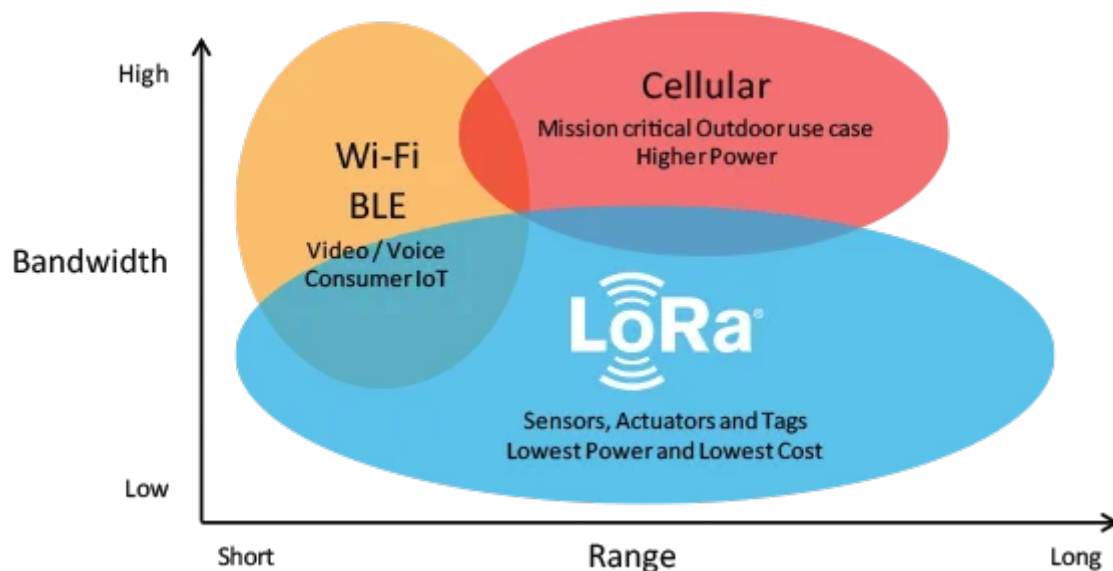


Figura 1: Comparação de largura de banda e alcance entre várias tecnologias de transmissão de dados via rádio [10]

A técnica de modulação LoRa faz parte do paradigma de modulação LPWAN [11]. Dentro desta tecnologia, também pode ser utilizado o protocolo LoRaWAN, que já está em uso por diversas operadoras no Brasil e no mundo, que colocam gateways nas atuais antenas de celular (como a KORE Wireless, do grupo American Tower [12]), aproveitando assim uma infraestrutura existente, ou por operadoras que dependem de *crowdsourcing* (como a Helium Network [13] ou a The Things Network [14]), que dependem de usuários comuns instalarem antenas em locais nem sempre tão adequados, ou seja, nem sempre são colocados em locais

altos e com boa linha de visada para a área a ser coberta. No LoRaWAN, vários usuários com dispositivos distintos podem ser autenticados e utilizar a rede. Desta forma, é possível compartilhar a rede com outras aplicações na mesma área de cobertura.

Na Figura 2 é possível observar um tipo comum de gateway LoRa compatível com o sistema Helium Network. Este dispositivo realiza a interface entre a rede LoRaWAN da Helium e a internet, conectando-o pela porta Ethernet ou através de Wi-Fi à rede local do proprietário do equipamento. O conceito da Helium Network é interessante, pois retribui com criptomoedas o proprietário do gateway (neste caso, o equipamento é comumente chamado de “*miner*” (minerador)) em troca do uso da conexão de internet do mesmo para transporte dos dados da rede LoRaWAN que trafegarem por este gateway.



Figura 2: gateway MNTD. Goldspot Miner, da RAKwireless, compatível com a rede da Helium Network [15]

Um desafio para algumas aplicações de IoT são os custos do hardware e da plataforma de comunicação. Aplicações como estações meteorológicas rurais, por exemplo, podem demandar um custo adicional de serviços de internet para a sua execução. Outras aplicações podem demandar hardware especializado e sistemas de segurança adicionais e, em alguns casos, estes serviços ou infraestrutura podem não estar disponíveis, encarecendo o hardware necessário para sua aplicação. Algumas importantes aplicações podem inclusive serem

inviabilizadas em áreas importantes para a realidade brasileira de diversas situações, tais como a agricultura familiar ou saúde de populações remotas.

A comunicação LoRa pode ser uma alternativa para vencer estes desafios e tornar aplicações possíveis e acessíveis, além de ter baixo custo e de ser de relativa fácil implementação.

Um possível caso de uso seria o monitoramento meteorológico remoto para alerta de deslocamento de terra, níveis de corpos d'água, sirenes de emergência, estacionamento inteligente, sistema de capacidade de lixeiras &c. Algumas destas soluções já estão sendo utilizadas ao redor do mundo e estão principalmente ligadas ao conceito de *Smart Cities* (em português, Cidades Inteligentes). Nestes sistemas, a rede LoRa faria o papel de uma rede integrada de sensores que poderia atuar isoladamente ou conectada a um serviço web através de um ponto da rede (gateway).

A Figura 3 é o logo da tecnologia LoRa mantido pela LoRa Alliance.



Figura 3: logo reconhecido mundialmente para a tecnologia LoRa [16]

Uma das vantagens de se utilizar essa solução de baixo custo é possibilitar o uso em áreas rurais, sítios de agricultura familiar, campi universitários e demais áreas relativamente grandes e isoladas que necessitam de uma rede local para coletar e processar informações, podendo possuir a própria rede LoRa, sem depender de operadoras de serviço móvel – o que geraria custos adicionais, ou em caso da falta de cobertura da rede Wi-Fi ou celular na região.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi avaliar o raio de alcance médio de uma rede local de comunicação com o protocolo LoRa baseado em hardware genérico de baixo custo e estabelecer suas possíveis aplicações.

Um objetivo secundário: mapear o campus universitário de São Carlos da UFSCar para o uso futuro da solução proposta em áreas de aplicação.

A Figura 4 é uma imagem aérea do campus da UFSCar em São Carlos, SP.

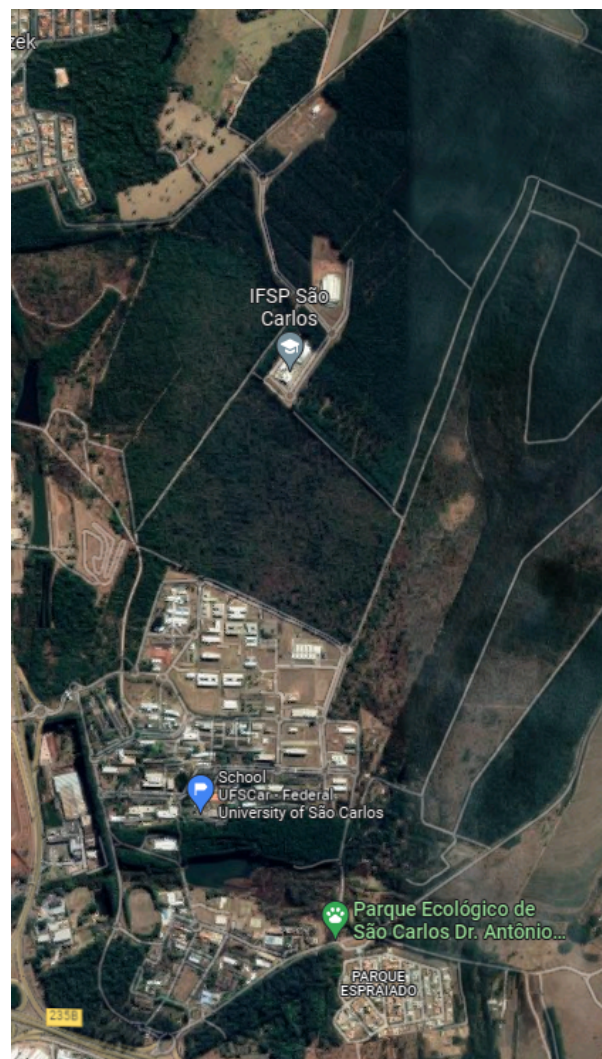


Figura 4: fotografia aérea do campus de São Carlos da UFSCar, englobando o seu cerrado

[17]

Além dos sensores, é necessário também uma inteligência central, como um supervisor, onde toda a informação agregada é processada e distribuída e eventualmente atuada. Contudo, isto está fora do escopo deste trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Em abril de 2020 o recorde mundial de distância de um pacote de dados para a tecnologia LoRa foi quebrado, exemplificando o longo alcance da tecnologia [18].

Um pacote de dados na rede LoRaWAN The Things Network, que trafegou um total de 832km, utilizando apenas 25mW de potência. O recorde foi conseguido utilizando um balão de alta altitude preenchido com gás hélio, no qual sensores LoRaWAN foram acoplados e conseguiram transmitir um pacote de dados à uma torre de transmissão. Balões de alta altitude acabam sendo a melhor opção neste cenário pela possibilidade de conseguir linha de visada desobstruída mesmo em longas distâncias e por se aproveitarem do fenômeno conhecido como “*ducting*” [19].

*Atmospheric duct* (“duto atmosférico”, em tradução livre) é uma camada horizontal na baixa atmosfera em que a taxa de refração vertical “guia” as ondas eletromagnéticas, como sinais de rádio, em uma forma de duto que segue a curvatura da Terra, fazendo com que o sinal sofra menos atenuação e alcance uma distância maior horizontalmente [20]. Este efeito é muito utilizado em radares militares e de aeronavegação [21].

A Figura 5 mostra a distância percorrida pelo pacote de dados na obtenção do recorde mundial.



Figura 5: distância percorrida pelo pacote de dados durante a quebra do recorde mundial [22]

Dada a distância que a tecnologia LoRa consegue cobrir com boa visada, já existem empresas estudando [23] e implantando [24] redes LoRaWAN via satélite na qual o globo todo poderia ser coberto sem a necessidade infraestruturas terrestres densas, isto é, apenas com algumas antenas específicas para interfacear com a estrutura terrestre. Isso é importante em casos em que dispositivos LoRa sejam instalados em áreas remotas, como o ártico ou em florestas densas (considerando que a comunicação não é tão afetada por copas de árvores, no caso de uma comunicação “vertical” com os satélites).

Atualmente, a comunicação satelital vem se popularizando pela diminuição do custo de investimento e alto número de satélites de baixa órbita em atividade, o que aumenta a disponibilidade e reduz o tamanho dos equipamentos e antenas necessárias para tal comunicação, já que a distância entre a superfície terrestre e o satélite é bem menor do que em relação a um satélite geo-estacionário, por exemplo. Para citar um caso, a operadora Starlink [25] disponibilizou seus serviços de internet banda-larga satelital no Brasil em 2022 [26]. Apesar disto, LoRa ainda tem espaço no mercado, pois apresenta uma solução com custo financeiro e energético menores e tamanho dos equipamentos reduzido, permitindo soluções mais práticas quando não há necessidade de banda-larga e baixa latência.

No mesmo ano de 2022, a Apple disponibilizou um serviço de comunicação de emergência via satélite em aparelhos celulares mais recentes [27], utilizando a rede de satélites da Globalstar e frequências do espectro nas bandas L e S [28]. Estas, sim, semelhantes ao LoRa, são dedicadas apenas a mensagens curtas e rápidas, visando, neste caso, comunicar a localização de uma emergência onde não há sinal celular nem Wi-Fi.

Aplicações de transmissão de dados via rádio podem ter a condição de linha de visada prejudicada devido à fatores ambientais como edificações, terreno, indivíduos, vegetais &c. Segundo Wang et al. [29], dentre os fatores comuns que causam perda de pacotes em uma rede LoRa são a distância entre o dispositivo emissor e o receptor, a potência de transmissão, o tamanho do pacote de dados, o ângulo da antena, o horário e o clima no local. O problema de linha de visada num campus universitário é relevante, e este trabalho não pretende solucioná-lo. Contudo em aplicações em que edificações são esparsas os problemas são minorados, como em áreas rurais, a despeito que pode haver interferência da flora local.

Há registros de aplicação da tecnologia LoRa no campo no Brasil onde a tecnologia celular não está disponível e o paradigma da indústria 4.0 é mais difícil de ser implementado [30]. A relevante importância da agricultura na economia nacional e a dificuldade de implementar soluções tecnológicas em áreas rurais de baixa renda demonstram como LoRa aparece como uma solução para a comunicação de sensoriamento remoto.

No mundo operando na faixa sub-1GHz e no Brasil e nas Americas regulamentado em 915MHz, LoRa opera em faixas de frequência não licenciadas [31], o que significa que a implementação e adoção da tecnologia é muito mais barata e simplificada, já que não há necessidade de pagamento de taxas de licenciamento à agências reguladoras, que no Brasil poderia ser a ANATEL. Isto é primordial, dada a proposta de utilização em soluções de baixo custo.

Redes LPWAN (Low Power Wide-Area Networks), da qual LoRa é um exemplo, podem tornar cidades mais inteligentes e o planeta mais saudável para todos. Um exemplo disto é o monitoramento de níveis de água, crescimento vegetal e risco de incêndio florestal [32]. Através de sensoriamento e atuação remotos e análise inteligente dos dados, pode-se construir sistemas que melhorem o funcionamento da sociedade como um todo, facilitando a detecção de problemas e a fiscalização de crimes ambientais.

Montevideo, capital do Uruguai, está criando uma rede LoRaWAN para controle de iluminação pública inteligente. Luminárias com módulos LoRa estão sendo instaladas por toda



a cidade, cada uma com sensores de luminosidade, de lâmpada queimada e até mesmo acelerômetros para detecção de acidentes derrubando postes [33]. Esta solução, mesmo já sendo ótima para a sociedade, é apenas o primeiro uso da rede LoRa implantada na região. Com a evolução da implementação da infraestrutura de rede espera-se que novas aplicações possam ser desenvolvidas.

### 3 METODOLOGIA

A proposta deste trabalho foi a implementação de uma solução de baixo custo para comunicação de médio alcance utilizando o microcontrolador ESP32 e a interface de comunicação LoRa. Para isto, foram descritos nas próximas seções os materiais e métodos necessários, assim como o meio de validação e avaliação desta proposta. A Figura 6 ilustra o sistema, onde a distância (setas pontilhadas) é aferida entre o emissor com posição fixa (amarelo) e o receptor com posição variante (verde), assim como o RSSI da transmissão.

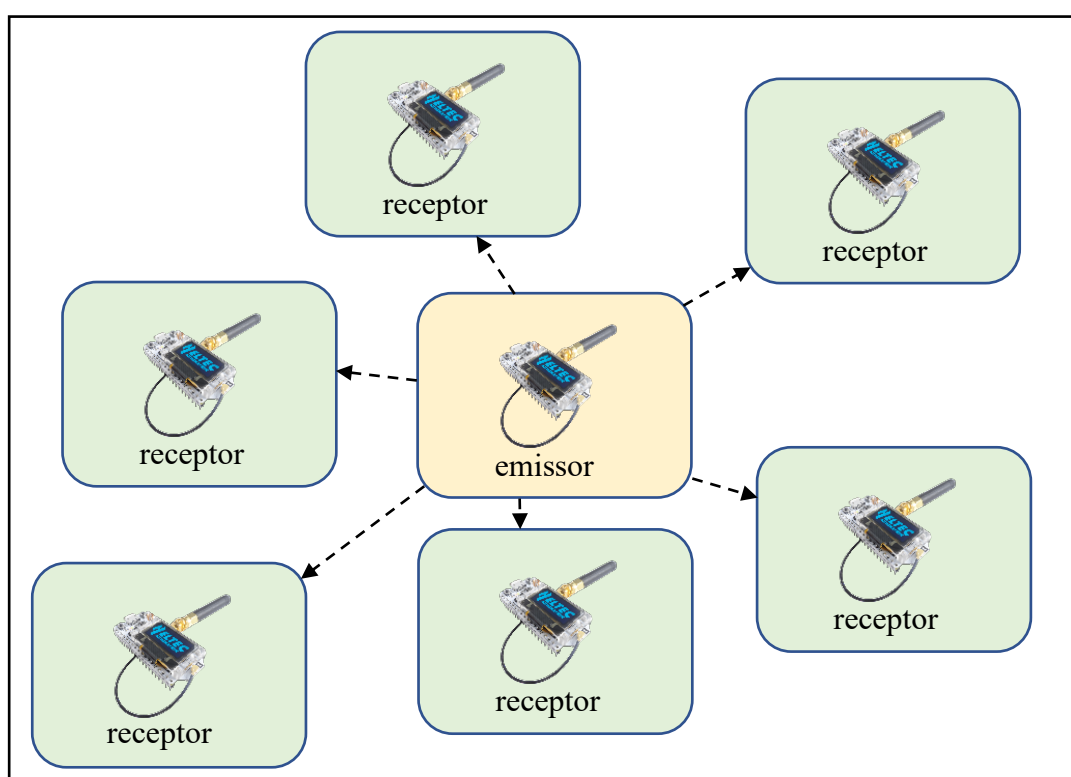


Figura 6: ilustração da implementação da solução, evidenciando a Topologia Estrela da rede LoRa implementada [do próprio autor]

#### 3.1 MATERIAIS

Para os testes, foram utilizadas duas placas da marca Heltec com o SoC ESP32, modelo “WiFi LoRa 32 (V2)”, especificação 902-928MHz (já que o padrão LoRa é regulamentado em 915MHz no Brasil), cada uma com uma antena de 45mm para o rádio LoRa.

Na Figura 7 podemos ver uma imagem da placa com a antena dedicada a LoRa acoplada (a antena para Wi-Fi e BLE é soldada na PCB).

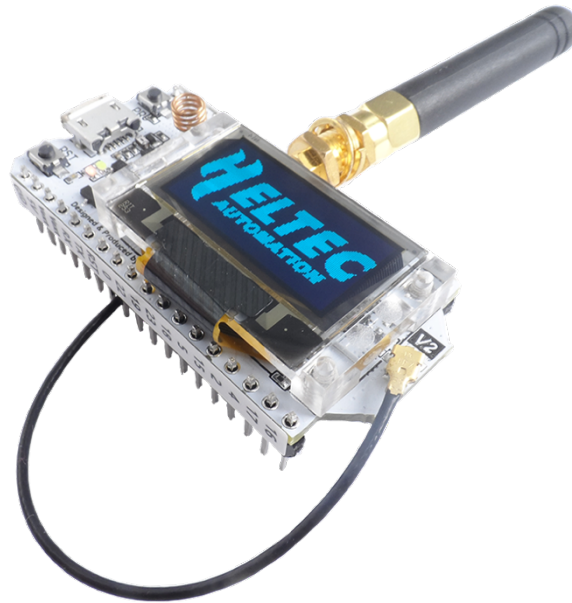


Figura 7: imagem da placa Heltec WiFi LoRa 32 (V2) com a antena dedicada LoRa acoplada no conector IPEX (conector coaxial miniaturizado semelhante ao U.FL) [34]

Estas placas podiam ser adquiridas por US\$ 18.80 cada no site oficial da marca [35] e uma pequena antena para LoRa com conector IPEX-1 vinha junto no kit. Com este preço, é possível afirmar que é um projeto de baixo custo, comparando com outros equipamentos profissionais disponíveis no mercado que podem custar centenas de dólares, mais taxas de importação. A Tabela 1 abaixo descreve os detalhes técnicos do equipamento.

<b>Processador Principal</b>	ESP32 (240MHz Tensilica LX6 dual-core + 1 ULP, 600 DMIPS)
<b>Comunicação Wi-Fi</b>	802.11 b/g/n (802.11n até 150Mbps)
<b>Comunicação Bluetooth</b>	Bluetooth V4.2 BR/EDR e BLE
<b>Comunicação LoRa</b>	Comunicação nodo-a-nodo ou LoRaWAN
<b>Processador LoRa</b>	SX1276/SX1278
<b>Frequência LoRa</b>	US915 (915MHz)
<b>Potência Máxima do Rádio LoRa</b>	19dB ± 1dB
<b>Características de I/O do Hardware</b>	UART x 3; SPI x 2; I2C x 2; I2S x 1; entrada de 12-bits ADC x 18; saída de 8-bits DAC x 2; GPIO x 22; GPI x 6
<b>Memória Flash</b>	8MB (64M-bits) SPI Flash
<b>Memória RAM</b>	520KB SRAM interna
<b>Interfaces de Conexão</b>	microUSB x 1; interface de antena LoRa (IPEX) x 1; 18x2.54 pin x 2
<b>Tamanho Máximo</b>	51 x 25.5 x 10.6 mm
<b>Chip USB para Serial</b>	CP2102
<b>Capacidade para Bateria</b>	3.7V Lithium (SH1.25 x 2 socket)
<b>Economia de Energia</b>	800µA deep sleep
<b>Tamanho do Display</b>	0.96" OLED
<b>Temperatura de Operação</b>	-40~80 °C

Tabela 1: tabela de parâmetros técnicos da placa Heltec WiFi LoRa 32 (V2) [36]

Através desta tabela, é possível observar que este modelo é uma placa de desenvolvimento bastante versátil, compatível com padrões de Wi-Fi, Bluetooth e BLE, LoRa, microUSB, sistema embarcado de carregamento e uso de bateria, função *deep sleep* (“sono profundo”, em tradução livre) muito econômica (800µA), que significa um consumo muito baixo de energia em períodos de espera entre processamentos &c.

### 3.2 VALIDAÇÃO

Para a validação da solução, uma placa foi deixada no Departamento de Computação (o emissor), e a outra foi carregada pelo campus de carro (o receptor), verificando-se em quais pontos a comunicação era estável, instável e perdida. Desta forma, foi possível criar um “mapa de calor” aproximado do sinal dentro do campus, sempre avaliando o posicionamento de uma placa em relação a outra, se houve boa visada ou se houveram obstáculos entre as duas, se houve possível interferência de outros equipamentos &c.

A Figura 8 mostra uma fotografia da entrada do DC/UFSCar, onde a primeira placa (emissor) foi acomodada no banco ao lado direito da porta de entrada.



Figura 8: fotografia do Departamento de Computação da UFSCar (DC/UFSCar) [do próprio autor]

Cada uma destas placas, emissor e receptor, depois de devidamente configurada no computador, foi respectivamente alimentada por um carregador USB e um *power bank* (bateria portátil com porta USB) para portabilidade ao ser movimentada pelo campus.

A Figura 9 mostra uma fotografia da segunda placa (receptor) conectada ao *power bank* e repousando no painel do veículo.

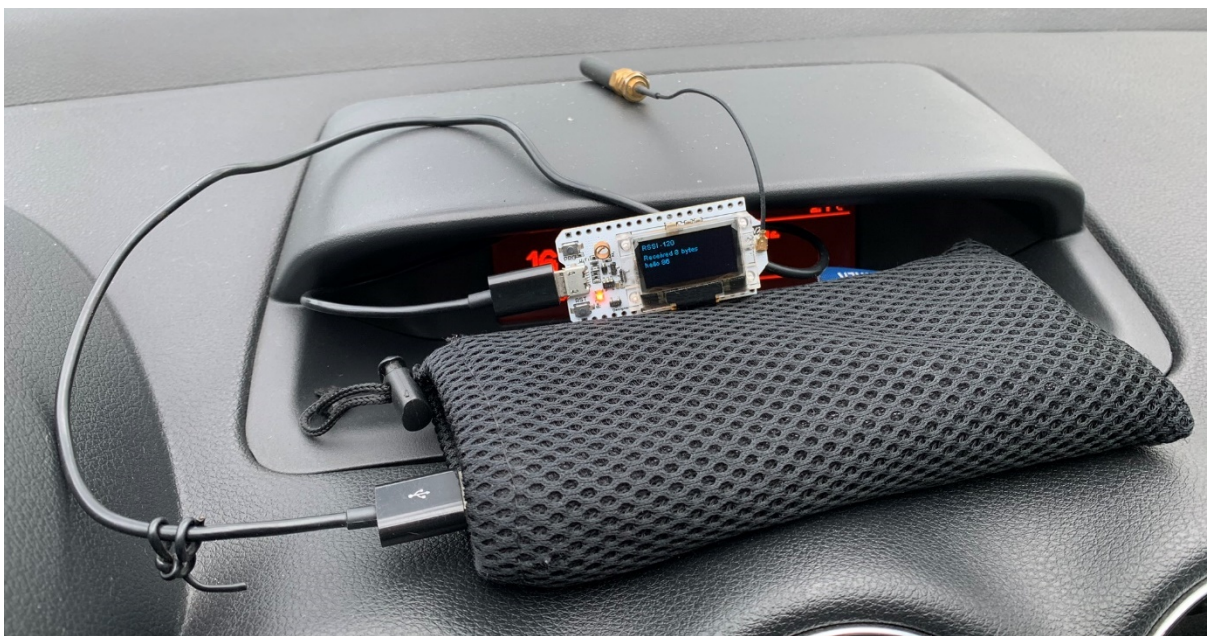


Figura 9: fotografia da placa ESP32 utilizada conectada à um *power bank* [do próprio autor]

## 4 IMPLEMENTAÇÃO

---

Para utilizar a placa ESP32 Heltec WiFi LoRa 32 (V2), é necessário instalar e configurar as bibliotecas específicas na SDK do Arduino [<https://www.arduino.cc/>].

Na SDK do Arduino, clicar em “Arquivos” e depois em “Preferências”. Na opção “URLs adicionais de gerenciamento de placas” adicionar a URL [https://github.com/Heltec-Aaron-Lee/WiFi\\_Kit\\_series/releases/download/0.0.5/package\\_heltec\\_esp32\\_index.json](https://github.com/Heltec-Aaron-Lee/WiFi_Kit_series/releases/download/0.0.5/package_heltec_esp32_index.json).

Em seguida, clicar na opção “Ferramentas”, depois em “Placas”, depois em “Gerenciador de Placas”, buscar “Heltec ESP32” e instalar o pacote “Heltec ESP32 Series Dev-boards”.

A Figura 10 mostra uma captura de tela de configuração do gerenciador de placas da SDK do Arduino.

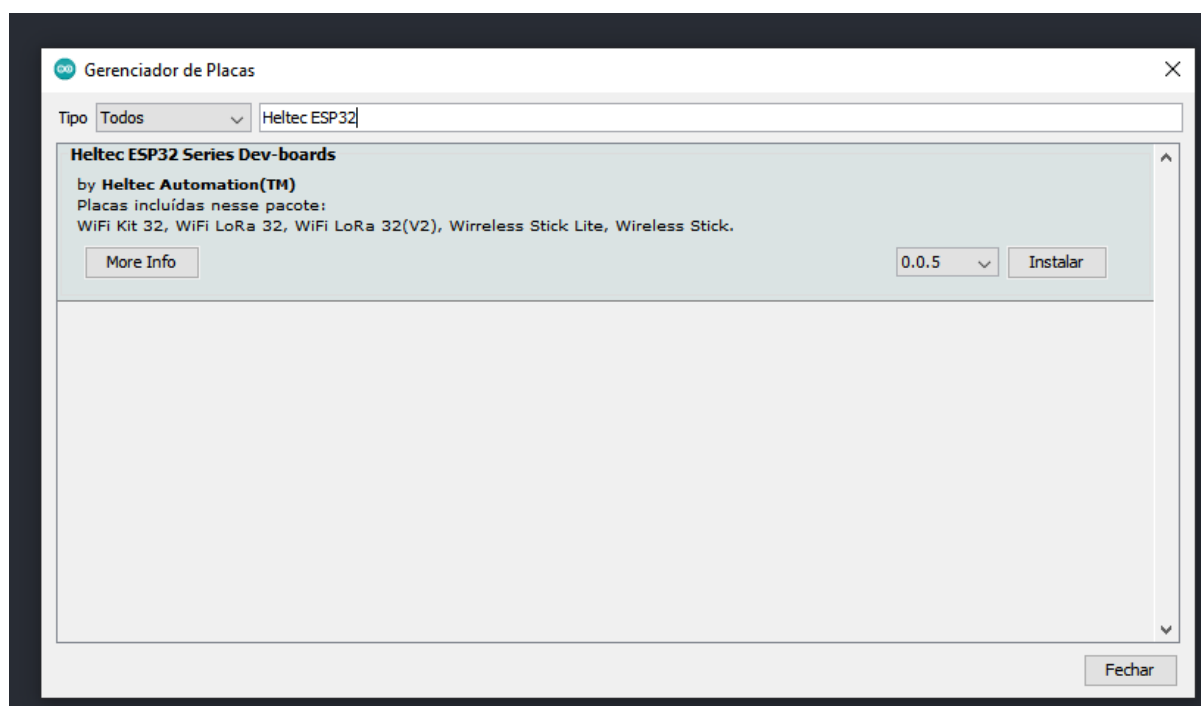


Figura 10: tela do Gerenciador de Placas da SDK do Arduino

Em seguida, é necessário clicar em “Sketch”, depois em “Incluir biblioteca”, depois em “Gerenciador de Bibliotecas”. Na busca, digitar “Heltec ESP32” e instalar o pacote “Heltec

ESP32 Series Dev-boards”. Para mais informações, acessar <[https://heltec-automation-docs.readthedocs.io/en/latest/esp32/quick\\_start.html](https://heltec-automation-docs.readthedocs.io/en/latest/esp32/quick_start.html)>.

## 4.1 CÓDIGO

Para o correto funcionamento da solução, foram utilizados dois exemplos de projeto disponíveis na SDK do Arduino após a finalização dos passos anteriores. Clicar em “Arquivo”, depois em “Exemplos”, depois em “Heltec ESP32 Dev-boards”, depois em “LoRa”.

Na primeira placa (emissor), o código fonte do exemplo “OLED\_LoRa\_Sender” gravado foi:

```
#include "heltec.h"
#include "images.h"

#define BAND    868E6 //you can set band here directly,e.g. 868E6,915E6

unsigned int counter = 0;
String rssi = "RSSI --";
String packSize = "--";
String packet ;

void logo()
{
  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->drawXbm(0,5,logo_width,logo_height,logo_bits);
  Heltec.display->display();
}

void setup()
{
  //WIFI Kit series V1 not support Vext control
  Heltec.begin(true /*DisplayEnable Enable*/, true /*Heltec.Heltec.Heltec.LoRa
  Disable*/, true /*Serial Enable*/, true /*PABOOST Enable*/, BAND /*long BAND*/);

  Heltec.display->init();
  Heltec.display->flipScreenVertically();
  Heltec.display->setFont(AriaLMT_Plain_10);
  logo();
  delay(1500);
  Heltec.display->clear();

  Heltec.display->drawString(0, 0, "Heltec.LoRa Initial success!");
  Heltec.display->display();
  delay(1000);
}

void loop()
{
  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  Heltec.display->setFont(AriaLMT_Plain_10);

  Heltec.display->drawString(0, 0, "Sending packet: ");
  Heltec.display->drawString(90, 0, String(counter));
  Heltec.display->display();
}
```

```

// send packet
LoRa.beginPacket();

/*
 * LoRa.setTxPower(txPower,RFOUT_pin);
 * txPower -- 0 ~ 20
 * RFOUT_pin could be RF_PACONFIG_PASELECT_PAB00ST or RF_PACONFIG_PASELECT_RF0
 * - RF_PACONFIG_PASELECT_PAB00ST -- LoRa single output via PAB00ST, maximum
output 20dBm
 * - RF_PACONFIG_PASELECT_RF0 -- LoRa single output via RF0_HF / RF0_LF,
maximum output 14dBm
 */
LoRa.setTxPower(14,RF_PACONFIG_PASELECT_PAB00ST);
LoRa.print("hello ");
LoRa.print(counter);
LoRa.endPacket();

counter++;
digitalWrite(LED, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
delay(1000); // wait for a second
digitalWrite(LED, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
delay(1000); // wait for a second
}

```

Na segunda placa (receptor), o código fonte do exemplo “OLED\_LoRa\_Receiver” gravado foi:

```

#include "heltec.h"
#include "images.h"

#define BAND 433E6 //you can set band here directly,e.g. 868E6,915E6
String rssi = "RSSI --";
String packSize = "--";
String packet ;

void logo(){
  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->drawXbm(0,5,logo_width,logo_height,logo_bits);
  Heltec.display->display();
}

void LoRaData(){
  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_10);
  Heltec.display->drawString(0 , 15 , "Received "+ packSize + " bytes");
  Heltec.display->drawStringMaxWidth(0 , 26 , 128, packet);
  Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
  Heltec.display->display();
}

void cbk(int packetSize) {
  packet ="";
  packSize = String(packetSize,DEC);
  for (int i = 0; i < packetSize; i++) { packet += (char) LoRa.read(); }
  rssi = "RSSI " + String(LoRa.packetRssi(), DEC) ;
  LoRaData();
}

void setup() {
  //WIFI Kit series V1 not support Vext control

```



```

    Heltec.begin(true /*DisplayEnable Enable*/, true /*Heltec.Heltec.Heltec.LoRa
Disable*/, true /*Serial Enable*/, true /*PAB00ST Enable*/, BAND /*long BAND*/);

    Heltec.display->init();
    Heltec.display->flipScreenVertically();
    Heltec.display->setFont(AriaMT_Plain_10);
    logo();
    delay(1500);
    Heltec.display->clear();

    Heltec.display->drawString(0, 0, "Heltec.LoRa Initial success!");
    Heltec.display->drawString(0, 10, "Wait for incoming data..");
    Heltec.display->display();
    delay(1000);
    //LoRa.onReceive(cbk);
    LoRa.receive();
}

void loop() {
    int packetSize = LoRa.parsePacket();
    if (packetSize) { cbk(packetSize); }
    delay(10);
}

```

## 4.2 RESULTADOS

Em um dia quente de sol (aproximadamente 31°C) com pouca chuva no período da tarde (ponto de orvalho a 18 °C) em São Carlos (o aumento na umidade relativa do ar pode ter interferido negativamente no alcance devido à atenuação do sinal [37]), com a primeira placa (emissor) ligada na entrada do Departamento de Computação da UFSCar executando o exemplo “OLED\_LoRa\_Sender” e a segunda placa (receptor) executando o exemplo “OLED\_LoRa\_Receiver” conectada ao *power bank*, foi possível traçar um mapa de calor aproximado do alcance da conectividade LoRa dentro e até fora do campus.

Nas Figuras 11 e 12 é possível observar a acomodação das placas e a execução dos programas nas telas OLED das mesmas.

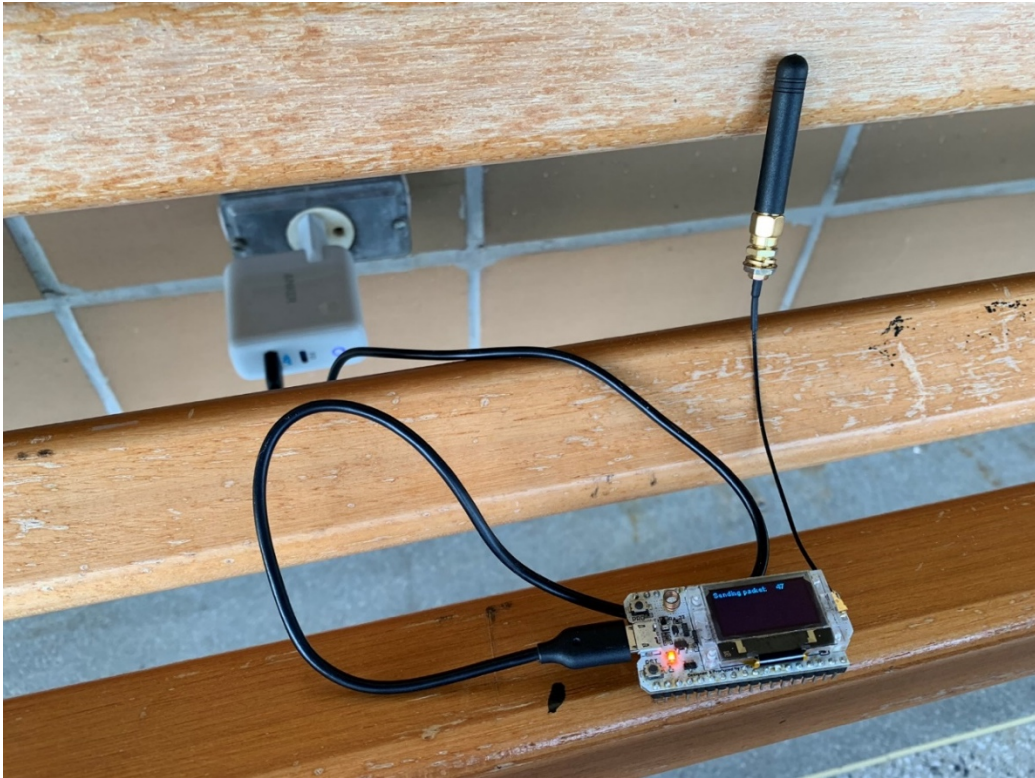


Figura 11: placa ligada na entrada do DC/UFSCar [do próprio autor]

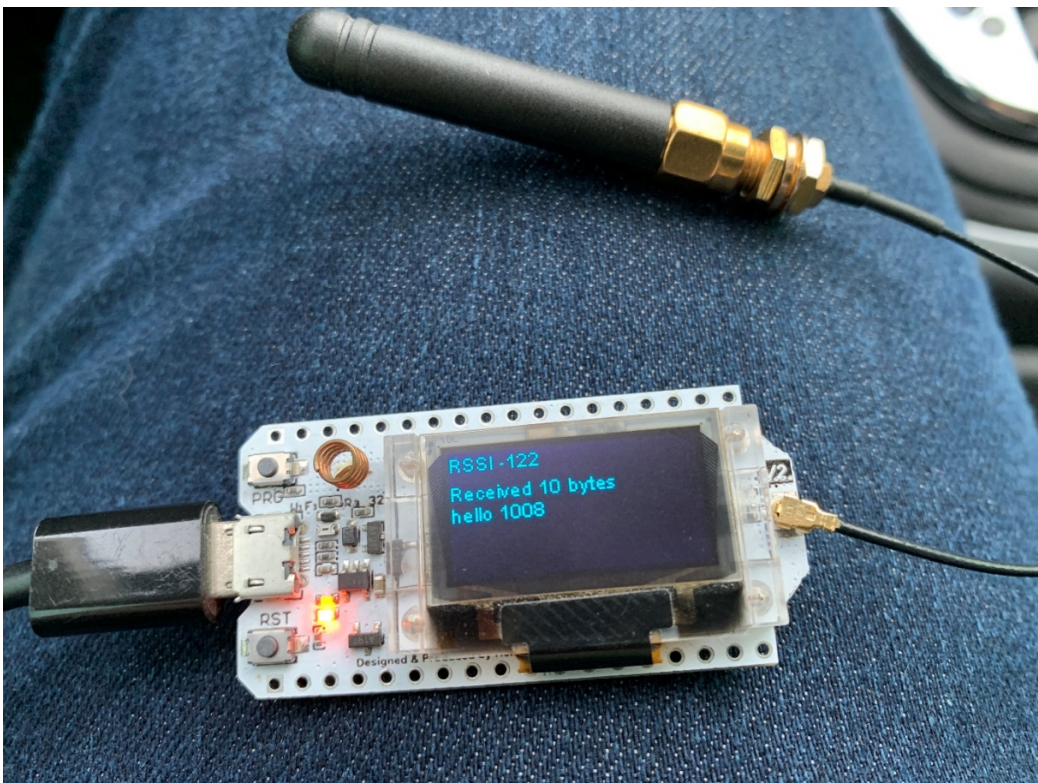


Figura 12: placa recebendo os dados longe do DC/UFSCar [do próprio autor]

O funcionamento dos programas executados nas placas é dado pelo “OLED\_LoRa\_Sender”, executado na primeira placa (emissor, que permaneceu no DC) enviando pacotes em sequência, cada um destes pacotes contendo a palavra “hello” seguida de um caractere de espaço e um número sequencial incrementado a cada segundo. O programa “OLED\_LoRa\_Receiver”, executado na segunda placa (receptor), recebe os pacotes e exibe na tela OLED da placa o RSSI aproximado, a quantidade de bytes do pacote e em seguida o pacote completo com a palavra “hello”, o espaço e o número sequencial incrementado.

Foram aferidos 60 pontos, e conforme a distância entre as placas aumenta, o valor de RSSI diminui e conseqüentemente a confiabilidade da conexão também diminui, até que a placa receptora deixa de receber novos pacotes de dados. A Figura 13 demonstra os pontos identificados como relevantes para a criação do mapa de calor aproximado (o restante dos pontos aferidos com a placa receptora estavam muito longe do emissor e não receberam nenhum pacote de dados).

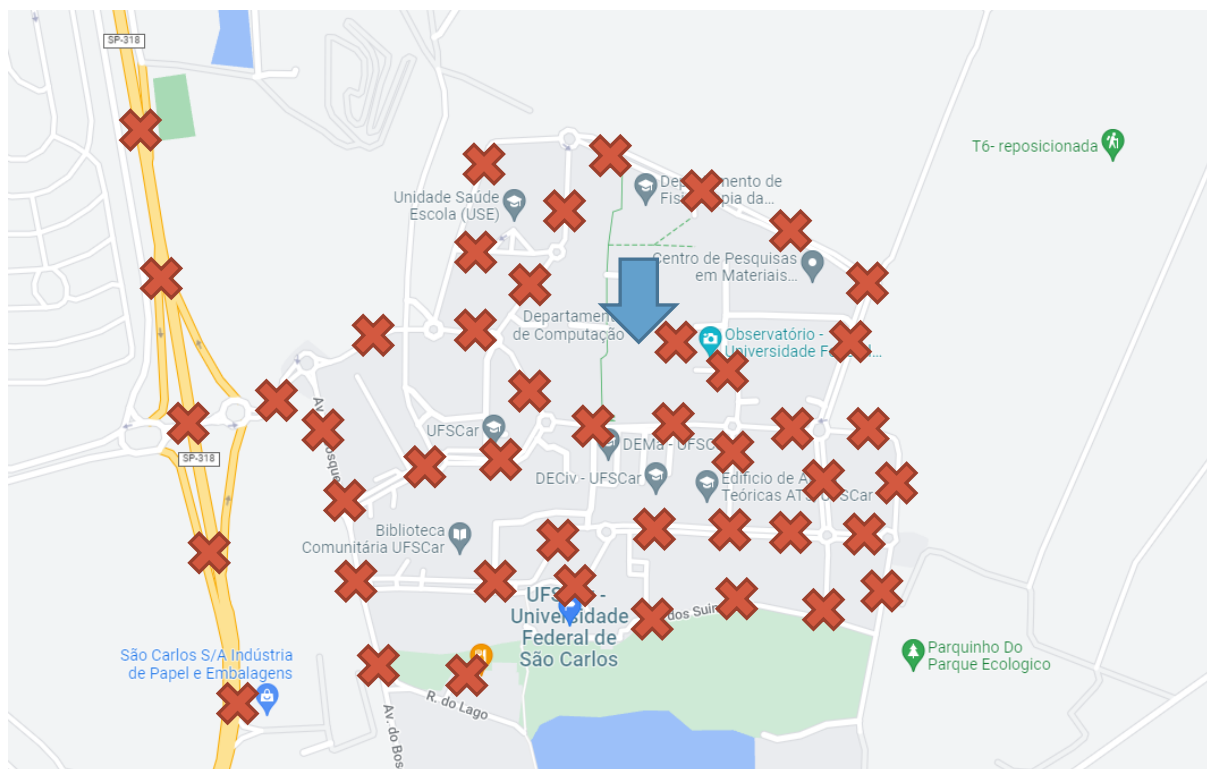


Figura 13: localização dos pontos aferidos com o receptor (em vermelho) relevantes marcados sobre um mapa da Área Norte do campus São Carlos da UFSCar; seta azul indica o DC/UFSCar, onde estava localizado o emissor [do próprio autor]

Na Figura 14 é possível ver uma aproximação do alcance do sinal no experimento na forma de um “mapa de calor” simplificado, feito com base nos 60 pontos aferidos.

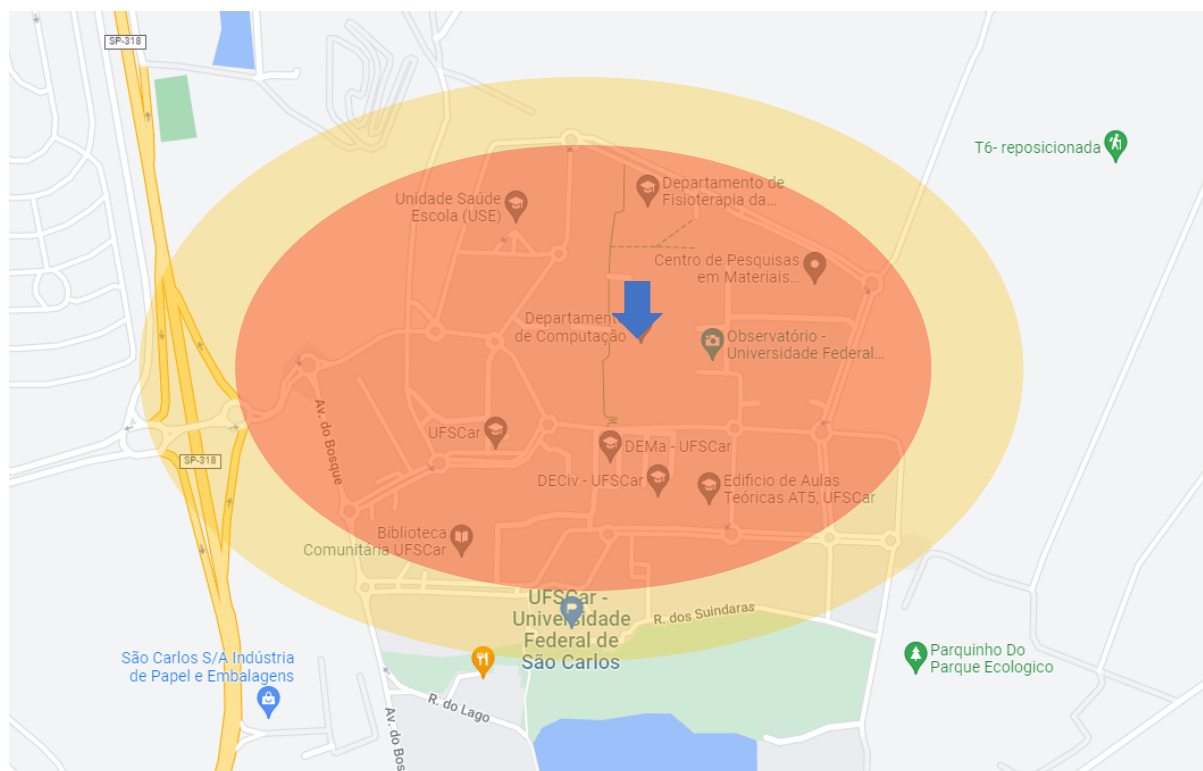


Figura 14: mapa de calor simplificado do alcance aproximado da conectividade LoRa na área norte do campus São Carlos da UFSCar, no qual as áreas em vermelho evidenciaram um bom sinal e as áreas em amarelo evidenciaram um sinal intermitente; seta azul indica o DC/UFSCar, onde estava localizado o emissor [do próprio autor]

A elipse vermelha, onde o sinal teve razoavelmente boa qualidade, com centro aproximado no DC, tem eixo menor com comprimento de 765m e eixo maior com comprimento de 1170m. O formato de elipse, e não circular, pode ser explicado por diversos fatores, incluindo a significativa diferença na elevação do terreno entre o norte e sul e o fato da área ser rodeada por florestas.

O centro deslocado em relação ao DC/UFSCar, que deveria ser o centro da elipse, pode ser explicado pelo fato de a área em vermelho representar o que é conhecido por “Área Norte da UFSCar”, que fica entre a Área Sul e o Cerrado e possui construções esparsas, com muitas

áreas relativamente abertas, como estacionamentos e grandes gramados. A Área Norte é rodeada por florestas, o que provavelmente causou muita atenuação no sinal deste experimento e reduziu a área de cobertura. Portanto a área coberta poderia ser ainda maior, aproximando-se mais de um círculo com raio de 800m com emissor no centro, caso não houvesse as árvores principalmente ao norte e ao sul da Área Norte.

A maior distância alcançada foi aferida passando de carro pelo trevo do portão da Área Norte da UFSCar, a aproximadamente 800m do DC, com pouca obstrução em relação às demais áreas. A Figura 15 demonstra a linha de visada deste cenário.

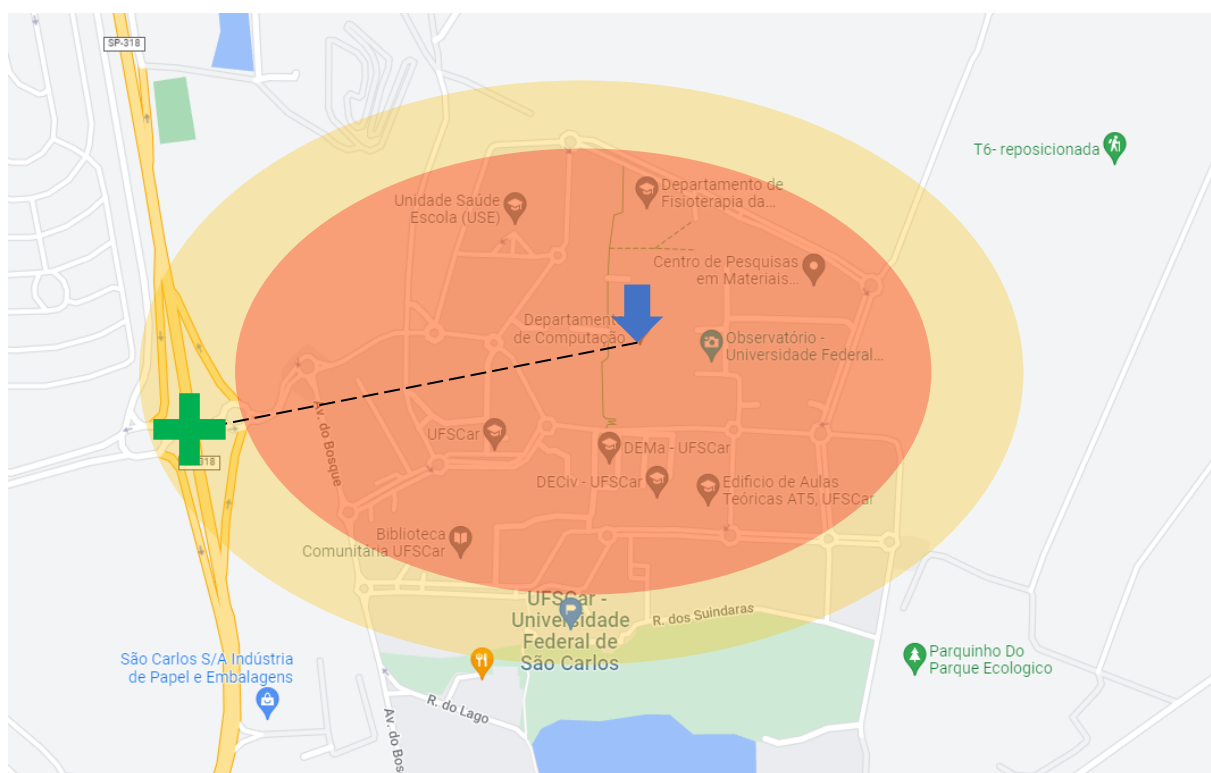


Figura 15: mapa de calor indicado na figura anterior sobreposto com uma cruz verde que indica o local do receptor onde foi detectado o sinal com maior alcance e linha tracejada preta que representa a distância de aproximadamente 800m entre o emissor e receptor [do próprio autor]

O valor de RSSI indicado na tela OLED do receptor pelo programa executado variou de -112dBm, próximo ao DC/UFSCar, a -150dBm, identificado no ponto mais distante, a aproximadamente 800m do emissor. A variação deste parâmetro foi inversamente proporcional

a distância, isto é, quanto maior a distância, menor era o RSSI. Porém, este valor deve ser considerado meramente indicativo, já que os valores teóricos sofrem variação de acordo com o equipamento que realizou a medição e os parâmetros utilizados no cálculo.

A área alcançada representou a conhecida Área Norte da UFSCar, que representa aproximadamente metade do campus. É uma área de cobertura significativa na comunidade, sendo que as condições eram longe das ideais. Em uma aplicação real, a antena do gateway LoRa (placa emissora) deveria ficar em um local mais elevado (como um poste) e afastada o máximo possível de edificações para se aproveitar do efeito Fresnel [38]. Além disso, antenas maiores, com melhores ganhos, deveriam ajudar consideravelmente. Entretanto, estas e outras modificações aumentariam o custo inicial do projeto.

## 5 CONCLUSÃO

---

Conforme o mapa de calor resultante do experimento no campus, verifica-se que mesmo com antenas com ganho tão pequeno e um equipamento com preço acessível, é possível criar uma rede LoRa com alcance interessante para soluções pequenas e simples.

Supondo-se que a condição do campus, devido às edificações, seja mais severa que em uma região com densidade de construções menor, ou uma área rural, pode-se inferir o potencial de aplicação desta tecnologia e de dispositivos similares para a agricultura familiar.

Desta forma, é possível a implementação de uma rede LoRa de campo de alcance médio com custo acessível para aplicações de IoT em área de agricultura familiar.

## 6 REFERÊNCIAS

---

- [1] TESLA. **Electric Cars, Solar Panels & Clean Energy Storage | Tesla**. Disponível em: <<https://www.tesla.com/>>. Acesso em: 20 maio. 2022.
- [2] BMW. **The international BMW Website | BMW.com**. Disponível em: <<https://www.bmw.com>>. Acesso em: 20 maio. 2022.
- [3] APPLE. **AirTag**. Disponível em: <<https://www.apple.com/airtag/>>. Acesso em: 20 maio. 2022.
- [4] TILE. **Find Your Keys, Wallet & Phone with Tile's App and Bluetooth Tracker Device | Tile**. Disponível em: <<https://www.thetileapp.com/>>. Acesso em: 20 maio. 2022.
- [5] SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. [s.l.] World Economic Forum, 2016.
- [6] SCHWAB, K.; DAVIS, N. **Shaping the Future of the Fourth Industrial Revolution**. New York: Currency, 2018.
- [7] SOARES NETO, V. **Sistemas de Comunicação: Serviços, Modulação e Meios de Transmissão**. [s.l.] Editora Érica, 2015.
- [8] THE THINGS NETWORK. **What are LoRa and LoRaWAN?** Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan>>. Acesso em: 20 mar. 2022.
- [9] THE THINGS NETWORK. **What are LoRa and LoRaWAN?** Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan>>. Acesso em: 20 mar. 2022.
- [10] THE THINGS NETWORK. **What are LoRa and LoRaWAN?** Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan>>. Acesso em: 20 mar. 2022.
- [11] VANGELISTA, L. Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation. **IEEE Signal Processing Letters**, v. 24, n. 12, p. 1818–1821, dez. 2017.



- [12] KORE WIRELESS. **Home | KORE Wireless**. Disponível em: <<https://www.korewireless.com/>>. Acesso em: 20 maio. 2022.
- [13] HELIUM FOUNDATION. **Helium – Introducing the People’s Network**. Disponível em: <<https://www.helium.com/>>. Acesso em: 31 maio. 2022.
- [14] THE THINGS NETWORK. **The Things Network**. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/>>. Acesso em: 31 maio. 2022.
- [15] MNTD PTE. LTD. **Get the MNTD. Helium Hotspot Miner: Consumer-Friendly Crypto Hardware**. Disponível em: <<https://getmntd.com/>>. Acesso em: 14 ago. 2022.
- [16] LORA ALLIANCE. **Homepage**. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/>>. Acesso em: 31 maio. 2022.
- [17] Imagem extraída do software Google Maps® em 17 mar. 2022.
- [18] THE THINGS NETWORK GLOBAL TEAM. **LoRa World Record Broken: 832km/517mi using 25mW**. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/article/lorawan-world-record-broken-twice-in-single-experiment-1>>. Acesso em: 22 mar. 2022.
- [19] GARG, P. **Did we just prove the world isn’t flat? or maybe it is ?** Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/article/atmospheric-duct>>. Acesso em: 23 mar. 2022.
- [20] THOMAS, M. E. **Optical propagation in linear media: atmospheric gases and particles, solid state components, and water**. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2006. p. 327–328
- [21] ATMOSPHERIC duct. In: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric\\_duct](https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_duct)>. Acesso em: 8 out. 2009.
- [22] THE THINGS NETWORK GLOBAL TEAM. **LoRa World Record Broken: 832km/517mi using 25mW**. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/article/lorawan-world-record-broken-twice-in-single-experiment-1>>. Acesso em: 22 mar. 2022.

- [23] THE THINGS NETWORK. **What are LoRa and LoRaWAN?** Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan>>. Acesso em: 23 mar. 2022.
- [24] SEMTECH. **Semtech and Swarm Deliver Satellite Communications With LoRa®.** Disponível em: <<https://www.semtech.com/company/press/semtech-and-swarm-deliver-satellite-communications-with-lora>>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- [25] STARLINK. **Starlink.** Disponível em: <<https://www.starlink.com/technology>>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- [26] FELIX, V. H. **O que é Starlink? Entenda como funciona a internet de Elon Musk.** Disponível em: <<https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-starlink>>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- [27] APPLE. **Emergency SOS via satellite available today on the iPhone 14 lineup in the US and Canada.** Disponível em: <<https://www.apple.com/newsroom/2022/11/emergency-sos-via-satellite-available-today-on-iphone-14-lineup/>>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- [28] DECCAN HERALD. **Explained: How Apple iPhone 14 satellite connectivity works.** Disponível em: <<https://www.deccanherald.com/technology/explained-how-apple-iphone-14-satellite-connectivity-works-1162936.html>>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- [29] WANG, S.-Y. et al. Performance of LoRa-Based IoT Applications on Campus. **2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)**, p. 1–6, set. 2017.
- [30] OLIVEIRA, F. **Campo dribla falta de internet para usar tecnologia de dados.** Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2018/10/campo-dribla-falta-de-internet-para-usar-tecnologia-de-dados.shtml>>. Acesso em: 23 mar. 2022.
- [31] KURJI, A. S.; AL-NAKKASH, A. H.; HUSSEIN, O. A. LORA in a Campus: Reliability and Stability Testing. **IOP conference series**, v. 1105, n. 1, 1 jun. 2021.

- [32] SWEDBERG, C. **IoT System Monitors Water Levels, Plant Growth, Fire Hazards**. Disponível em: <<https://www.rfidjournal.com/iot-system-monitors-water-levels-plant-growth-fire-hazards>>. Acesso em: 23 abr. 2022.
- [33] SWEDBERG, C. **Montevideo's Smart Lighting Leverages LoRaWAN Connectivity**. Disponível em: <<https://www.rfidjournal.com/montevideos-smart-lighting-leverages-lorawan-connectivity>>. Acesso em: 8 mar. 2022.
- [34] HELTEC AUTOMATION. **WIFI LoRa 32 (V2)**. Disponível em: <<https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>>. Acesso em: 17 mar. 2022.
- [35] HELTEC AUTOMATION. **WIFI LoRa 32 (V2)**. Disponível em: <<https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>>. Acesso em: 17 mar. 2022.
- [36] HELTEC AUTOMATION. **WIFI LoRa 32 (V2)**. Disponível em: <<https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>>. Acesso em: 17 mar. 2022.
- [37] PUC-RIO. **EFEITOS DA CHUVA NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS MILIMÉTRICAS**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/27690/27690\\_4.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/27690/27690_4.PDF)>. Acesso em: 20 ago. 2023.
- [38] HUCABY, D. **CCNA Wireless 640-722 Official Cert Guide**. [s.l.] Cisco Press, 2014.