

# Análise da tecnologia LoRa 915MHz para a UFJF

Rafael da Silva Macêdo,  
*Rafael S. Macêdo, Universidade Federal de Juiz de Fora, rafael.macedo2016@engenharia.ufjf.br*

## I. O QUE É A TECNOLOGIA LoRa

Nos últimos anos houve uma grande expansão das tecnologias de telecomunicação para dispositivos, fazendo assim com que o conceito de **internet das coisas (Internet of Things –IoT)** tomasse proporções até então nunca vistas antes. Neste sentido diversas tecnologias tem sido desenvolvidas para atender novas demandas do mercado.

Dentre os requisitos essenciais a serem suportados por novas tecnologias para IoT, pode-se destacar a imunidade à interferência, já que o aumento do número dispositivos sem fio conectados à internet faz com que haja uma maior poluição do espectro eletromagnético. Além disso, como tais dispositivos costumam ficar em locais remotos espera-se que as tecnologias tenham um gerenciamento eficiente de energia a fim de prolongar a vida útil das baterias.

Uma das tecnologias que atende a tais exigências e que tem ganhado grande destaque nos últimos anos é a tecnologia LoRa desenvolvido pela empresa Semtech.

Segundo [1] a **Long Range (LoRa)** é uma tecnologia de camada física e utiliza uma técnica de modulação derivada da **Chirp Spread Spectrum (CSS)**. A tecnologia LoRa provê um longo alcance e um baixo consumo, quando utilizado juntamente com o protocolo aberto **Long Range Wide Area Network (LoRaWAN®)** tem-se uma rede IoT que pode servir para solucionar diversos desafios do ambiente. Ao realizarmos a estrutura de uma rede utilizando esta tecnologia temos então a estrutura de uma **Low Power Wide Area Network (LPWAN)** que combina uma área de cobertura relativamente grande com dispositivos de baixo consumo, o que é ideal para aplicações em agricultura 4.0, cidades inteligentes e indústria 4.0.

Realizando o estudo preliminar sobre a tecnologia, encontramos alguns parâmetros importantes para a análise. Primeiramente é necessário lembrar-se do teorema de Shannon-Hartley, descrito na Equação (1), que estima a máxima taxa com que a informação pode ser transmitida através de um canal de comunicação de uma largura de banda específica na presença de ruído.

$$c = B \cdot \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (1)$$

Onde  $c$  é a capacidade do canal em bits/s,  $S/N$  é a relação sinal ruído e  $B$  é a largura de banda em

Hz.

Tomando a mudança de base do logaritmo temos o resultado da Equação (2).

$$\frac{c}{B} = 1,433 \cdot \frac{S}{N} \quad (2)$$

Porém, usando o espalhamento espectral temos que  $S/N \ll 1$ , assim, podemos aproximar o resultado conforme a Equação (3).

$$\frac{c}{B} \approx \frac{S}{N} \quad (3)$$

Ou seja, quando utilizamos uma técnica de espalhamento espectral, na prática estamos aumentando a nossa banda de transmissão a fim de manter a nossa taxa de comunicação mesmo com a diminuição da relação sinal ruído. Em resumo, estamos compensando as degradações do sinal com o aumento da largura de banda a fim de preservarmos a mesma taxa de comunicação.

Para entender melhor como funciona a técnica de espalhamento espectral do LoRa, precisamos passar pela técnica **Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)**.

Na transmissão, a técnica DSSS faz a mudança da portadora de acordo com uma sequência de “Chip” que multiplica o sinal. O sinal de Chip tem uma taxa mais elevada que a do sinal que queremos transmitir, o que faz com que o espectro do sinal seja espalhado na banda conforme mostra a Figura 1.

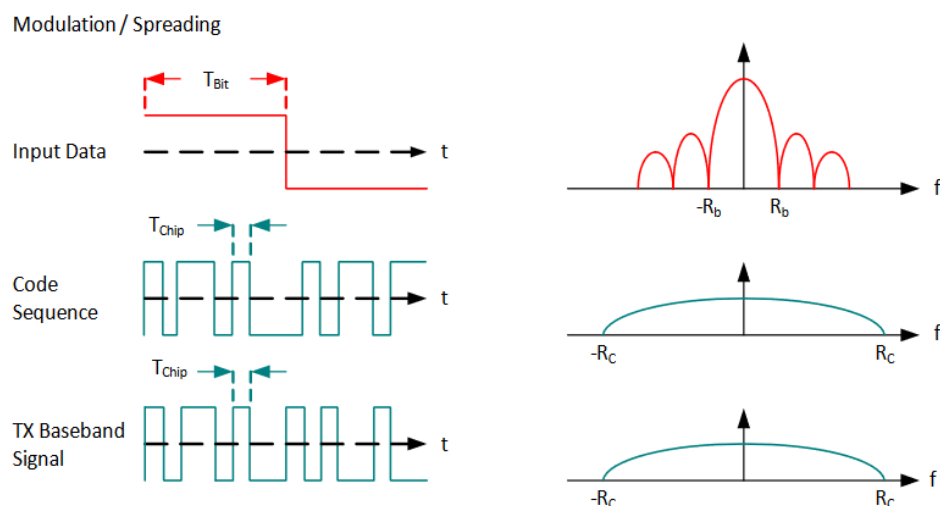


Figura 1: Técnica de modulação DSSS.

Já na recepção, o sinal é novamente multiplicado pelo chip fazendo com que o sinal retorne a banda original. É interessante observar que tanto no transmissor quanto no receptor os sinais de chip devem ser iguais para que ele possa ser enviado e recuperado corretamente o que pode ser observado na

Figura 2.

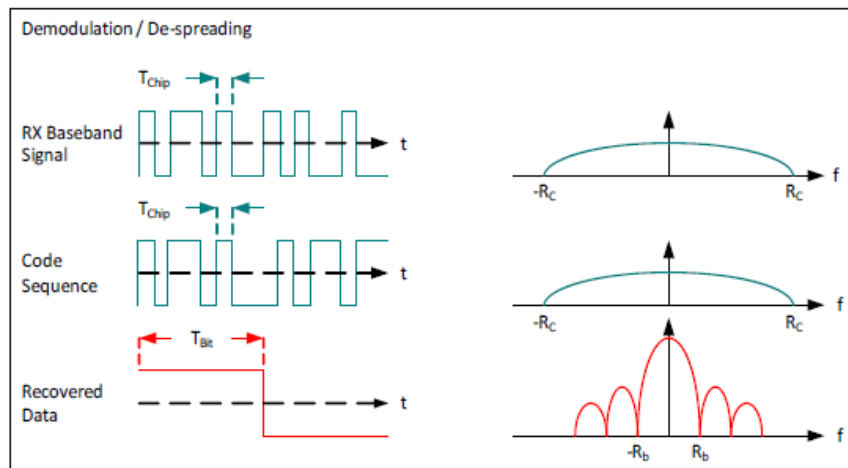


Figura 2: Técnica de demodulação CSS.

Contudo a tecnologia LoRa faz com que o sinal de chip tenha uma frequência variável no tempo, este valor de variação no tempo pode ser alterado conforme o valor do **Fator de Espalhamento (Spread Factor - SF)**, a Figura 3 mostra o espectro de frequência analisado quando a tecnologia LoRa está transmitindo utilizando um fator de espalhamento de 12 e uma largura de banda de 7,1 kHz.

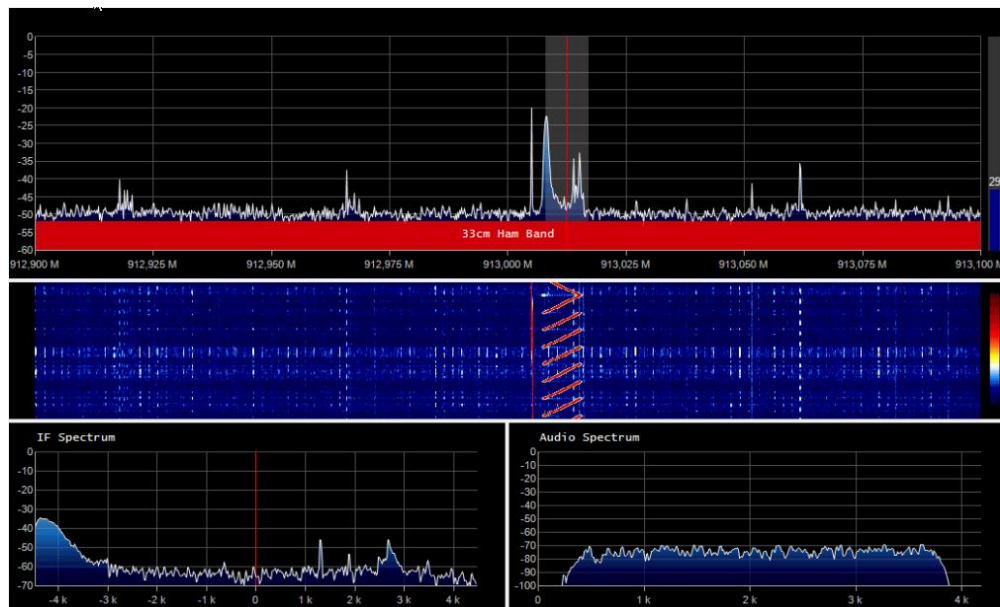


Figura 3: Análise espectral de um sinal LoRa.

Outro parâmetro importante a ser levado em consideração é a largura de banda que influenciará em uma série de parâmetros do sistema, pois ela está diretamente relacionada na capacidade do canal e é um critério importante a ser dimensionado.

Além disso, existe nas medidas **Received Signal Strength Indicator (RSSI)** que segundo o datasheet é uma indicação em dBm do sinal recebido e, portanto pode ser utilizado para realizar

análises de propagação.

É muito importante que antes da implementação da tecnologia tenha-se conhecimento de suas faixas de operação para que tal equipamento a ser projetado trabalhe em conformidade com as legislações do país. Neste sentido a **Associação Brasileira de Internet das Coisas (ABINC)** trabalha em um projeto de iniciativa global baseada na tecnologia LoRaWAN que visa criar uma rede mundial e comunitária [2], tal projeto é chamado **The Things Network (TTN)** e é construído por uma comunidade ativa no mundo todo.

Em [3] encontramos todas as informações sobre a tecnologia LoRa e como aplicá-la a fim de utilizar a rede LoRaWAN. A tecnologia utiliza as bandas **ISM (Industrial, Scientific & Medical)** que são de uso livre desde que respeitadas as legislações vigentes do país que no Brasil utiliza a banda AU-915-928 para a tecnologia LoRa, cujo plano de frequências de uplink e downlink pode ser encontrado em [4]. A resolução nº 680, de 27 de junho de 2017 [5] regularizou a banda de frequência para equipamentos de radiofrequência de radiação restrita no Brasil, além disso, o ato nº 14448, de 04 de dezembro de 2017 [6] traz as informações de aplicação da tecnologia como, por exemplo, a potência máxima que não deve ultrapassar 1W (30dBm).

Neste trabalho, buscou-se realizar uma caracterização da tecnologia LoRa para aplicação no ambiente da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) utilizando equipamentos de baixo custo.

## II. SISTEMA DE MEDIÇÃO

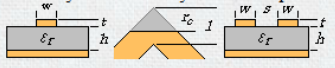
A fim de facilitar as medições, pensou-se em um hardware que fosse: de fácil implementação, fácil de se programar para a realização de mudanças de parâmetros, fosse modular para que não ficasse preso a apenas um módulo, que tivesse mobilidade, possibilidade de alterar as antenas, realizar aquisição de dados e disponibilizar um feedback para quem está fazendo a medição.

Neste sentido, o projeto do sistema de medição foi dividido em três etapas sendo elas o projeto dos módulos LoRa, equipamento para medição e as antenas.

### MÓDULO LORA

Foram comprados os módulos LoRa para 915MHz RFM95W para realização das medidas neste trabalho. Para trazer a possibilidade de inserir antenas omnidirecionais ou antenas direcionais, foi utilizada uma adaptação da placa LoRa juntamente com um conector SMA para que fique mais fácil de conectar a antena. Para tanto, foi calculada uma linha de transmissão utilizando a ferramenta online Line Calc conforme mostra a Figura 4 para que pudesse ser calculado a largura da trilha de sinal que conecta o conector SMA a fim de manter a impedância de  $50 \Omega$  na frequência de 915MHz, foi encontrado o parâmetro de  $w$  igual a 0,73mm.

Online calculator - Synthesize/Analyze microstrip transmission line



Synthesize/Analyze microstrip transmission line

Frequency	915	MHz
Electrical length	90	deg
Dielectric relative permittivity ( $\epsilon_r$ )	4.5	
Dielectric height ( $h$ )	0.4	mm
Conductor thickness ( $t$ )	0.018	mm
Impedance ( $Z_0$ )	50	$\Omega$
Conductor width ( $w$ ) $\approx$	0.7310331690024325	mm
Effective relative permittivity $\approx$	3.312566441805	
Capacitance $\approx$	66.712819039630	pF/m
Inductance $\approx$	166.782047599076	nH/m
Velocity of propagation $\approx$	0.549436745548	
Physical length $\approx$	45.004642749532	mm
Rightangle bend compensation ( $r_c$ ) $\approx$	0.575132281597	
Open end effect length ( $\Delta l$ ) $\approx$	0.154235119583	mm
<input type="button" value="Synthesize for w"/> <input type="button" value="Analyze for Zo"/>		
Side gap ( $s$ )	0.36	mm
Differential impedance ( $Z_{diff}$ ) $\approx$		$\Omega$
Note: The practical ranges for $Z_0$ and $Z_{diff}$ are from 20 $\Omega$ to about 150 $\Omega$ , with possible errors of up to $\pm 10\%$ . <input type="button" value="Zo &lt;math&gt;\rightarrow&lt;/math&gt; Zdiff"/>		

Figura 4: Valores calculados da microstrip utilizando a ferramenta LineCalc.

Criando o layout da placa no Altium Design chegou-se ao resultado mostrado na Figura 5.

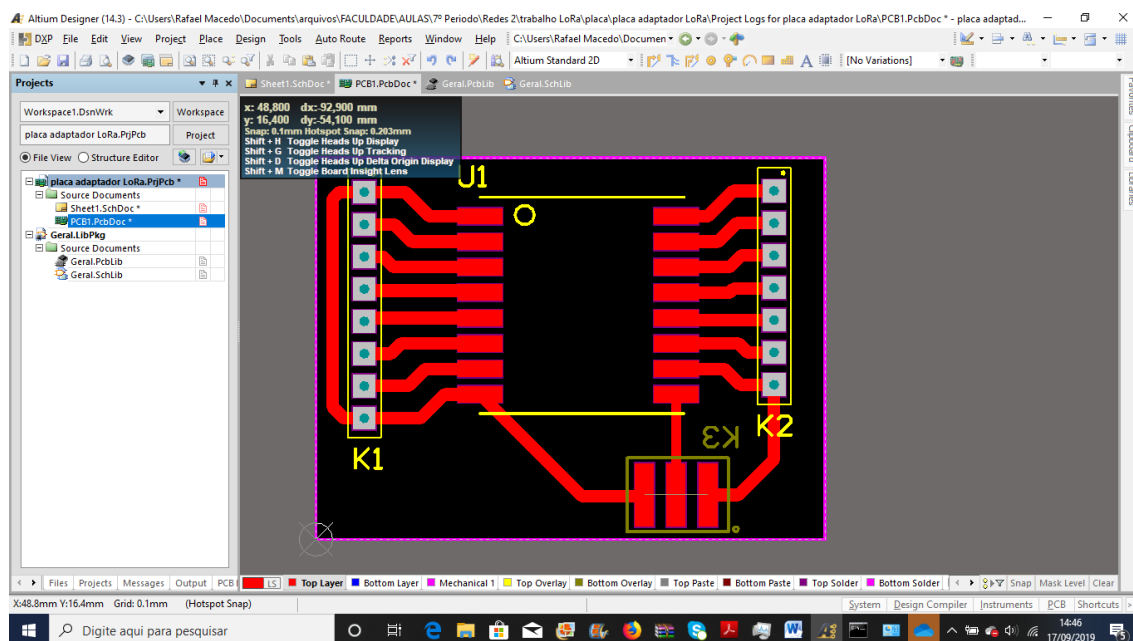


Figura 5: projeto da placa de circuito para o módulo LoRa.

A fim de garantir que não houvessem erros entre as dimensões desenhadas no software e na placa de circuito do módulo, foi averiguado se os tamanhos batiam conforme mostrado na Figura 6, após a confirmação a placa de circuito foi confeccionada conforme mostra a Figura 7.

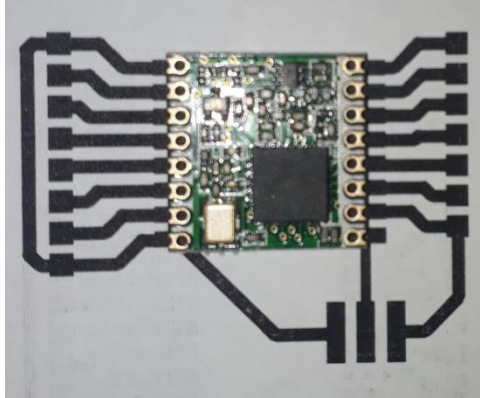


Figura 6: Análise de dimensões do projeto de placa para módulo LoRa.

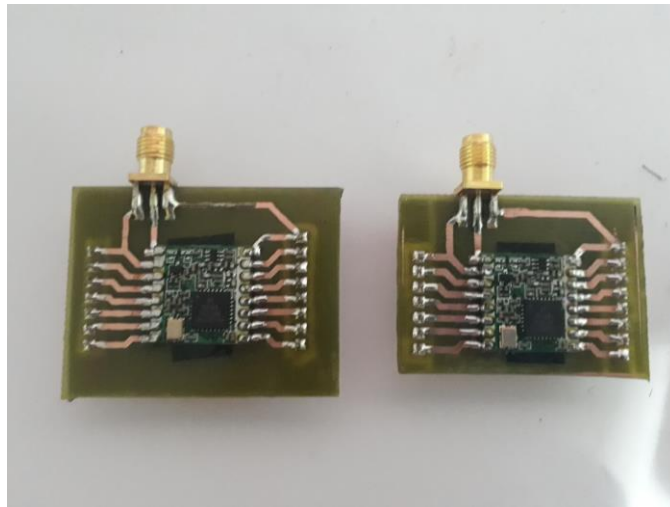


Figura 7: Placa do módulo LoRa confeccionada.

## EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

Com o módulo pronto necessitava-se integrá-lo com o equipamento para que pudéssemos realizar a tarefa de:

- enviar um pacote,
- captar a posição à qual aquele pacote foi enviado,
- salvar a posição e o número do pacote
- Trazer uma forma de o usuário saber quando ele pode iniciar o movimento para a próxima posição
- Trazer uma forma de o usuário conseguir iniciar o envio de pacotes

Neste sentido, utilizou-se um modulo Arduino UNO juntamente com um modulo GPS e Cartão SD além de uma chave e dois leds para sinalização. O programa do Arduino pode ser visto nos anexos sendo que existem três versões:

- ANEXO A: programa para medidas outdoor
- ANEXO B: programa para medidas indoor
- ANEXO C: programa para medidas de banda

A Figura 8 mostra um diagrama em blocos do equipamento utilizado para enviar os pacotes e salvar os dados de posição do nosso sistema de medição.

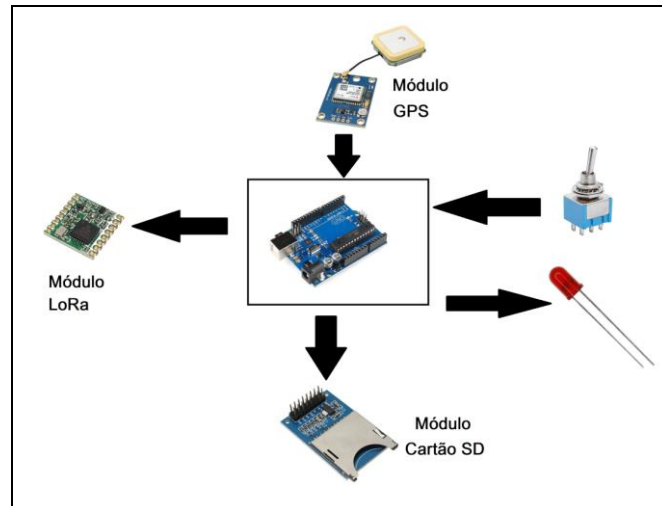


Figura 8: Diagrama de interação entre módulos e Arduino.

Ao integrar todos os dispositivos utilizando o Arduino, foi pensado em uma proteção para o equipamento utilizando uma caixa, o resultado pode ser visto na Figura 9.

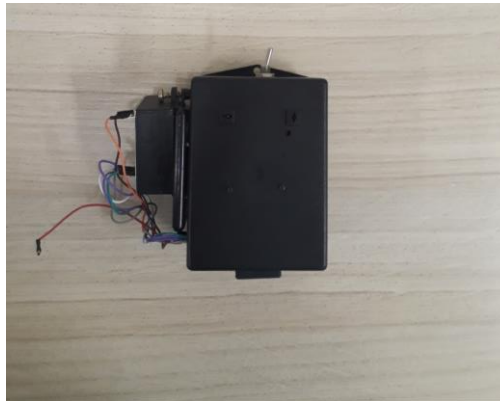


Figura 9: Protótipo de equipamento de medição confeccionado.

## ANTENAS

Neste trabalho foram utilizados dois projetos de antenas, uma para o transmissor e outra para o receptor. O projeto de antena utilizada para o transmissor foi uma antena dipolo de meia onda, as medidas da antena foram retiradas utilizando um modelo já pronto conforme visto da Figura 10. A partir das medidas retiradas deste modelo foi confeccionada uma nova replica.



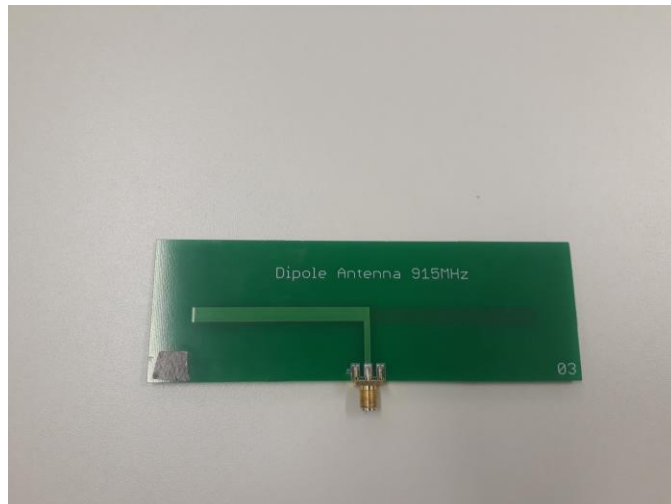


Figura 10: Antena dipolo utilizada como referência.

Ao ser confeccionada, a replica da antena estava ressonando a uma frequência abaixo de 915 MHz, logo para solucionar este problema foram feitos cortes na trilha de sinal da antena a fim de realizar o casamento da mesma, o casamento da antena era acompanhado pelo equipamento FildeFox que mostrava o VSWR da mesma. Nas Figuras 11 e 12 pode-se observar o projeto final da antena dipolo e o resultado de seu casamento respectivamente



Figura 11: Antena dipolo confeccionada.



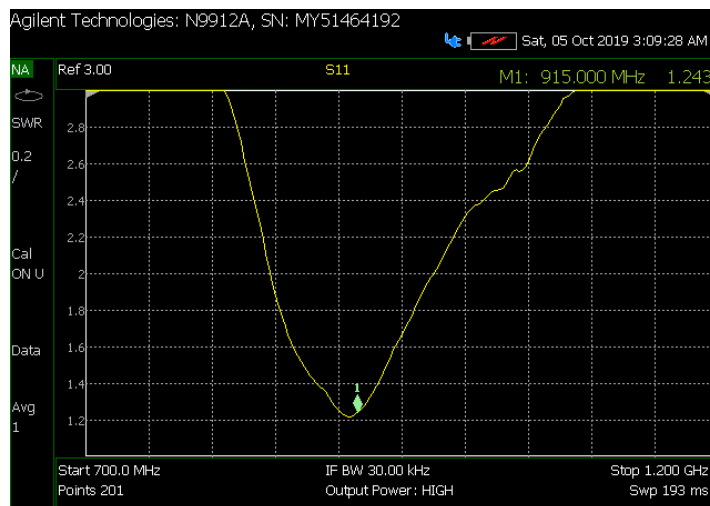


Figura 12: medição de VSWR da antena dipolo.

No receptor pensou-se em uma antena que oferecesse um ganho elevado para aumentar a área de cobertura e que fosse de fácil confecção. Neste passo o projeto utilizado foi a de uma antena colinear para a frequência de 915MHz conforme é descrito em [7]. A vantagem de se utilizar uma antena colinear está em sua característica omnidirecional e seu ganho elevado geralmente em torno de 6dBi. As Figuras 13 e 14 mostram o projeto da antena colinear e o projeto confeccionado.

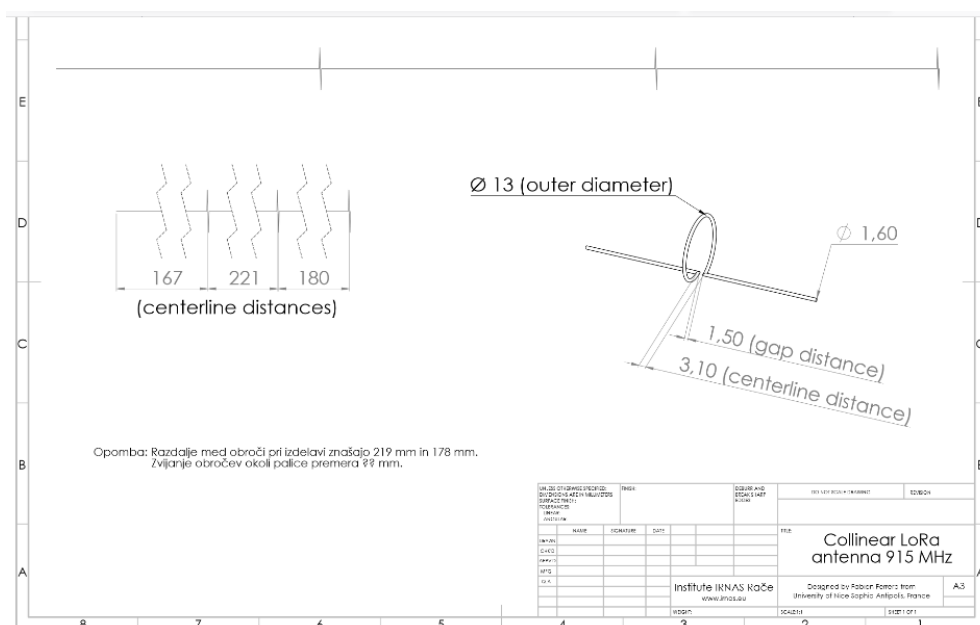


Figura 13: Projeto da antena colinear.



Figura 14: Antena colinear confeccionada

Conforme feito para a antena dipolo, a antena colinear também passou pelo processo de medição a fim de verificar seu ponto de ressonância a Figura 15 mostra o resultado.

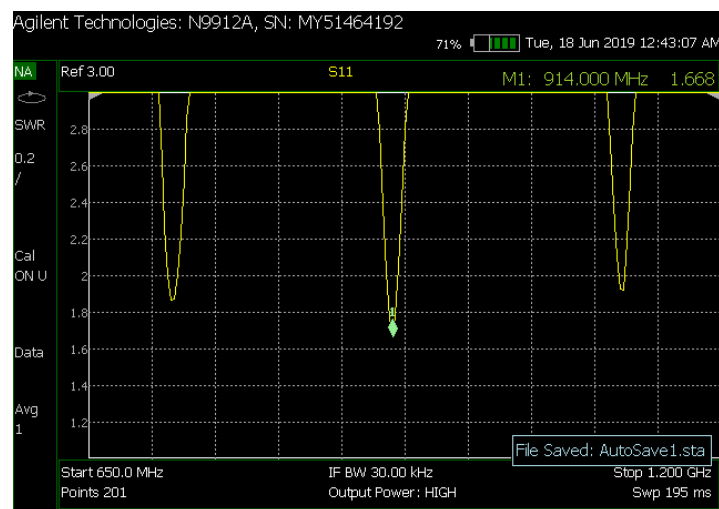


Figura 15: Medição de VSWR da antena colinear.

## CUSTOS RELACIONADOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

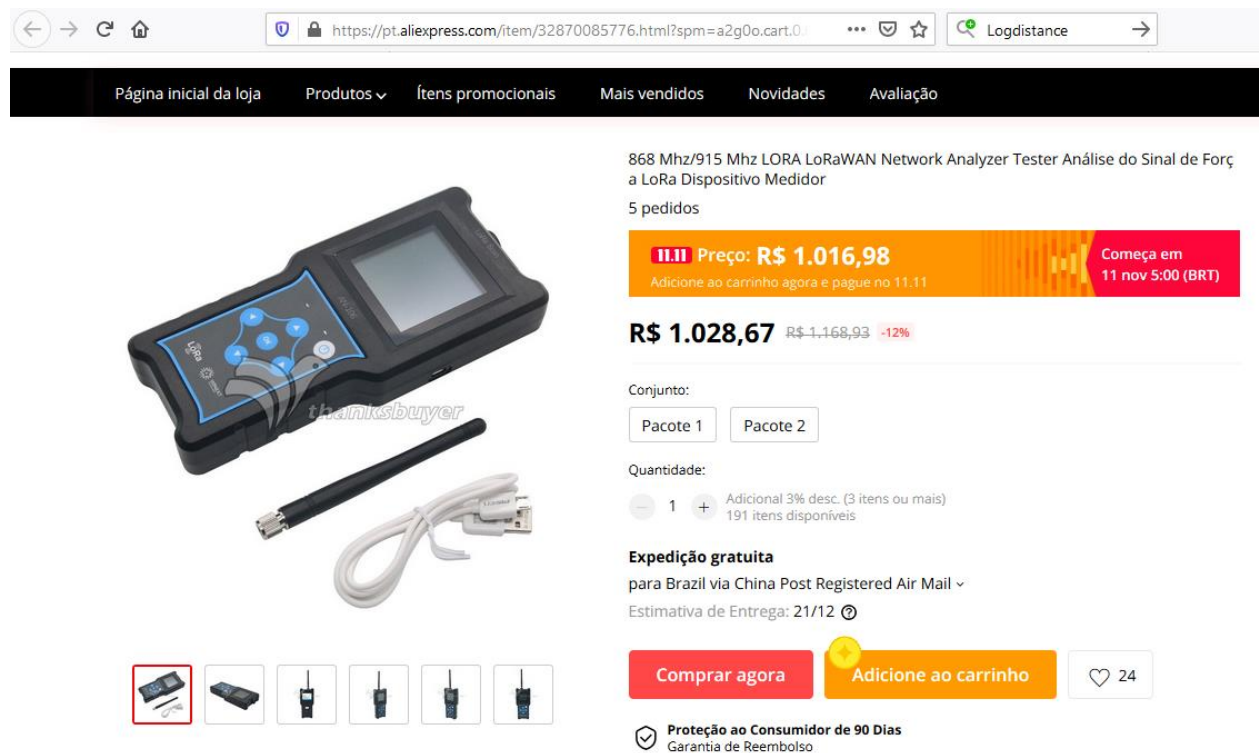
A Tabela I traz os custos de todos os materiais utilizados para a confecção do sistema de medição

TABELA I: GASTOS COM O PROJETO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Descrição	Custo unitário	Quantidade
Modulos LoRa RFM95W 915MHz*	46,86	1
Placa de fibra de vidro dupla face tamanho 10x20	10,24	1
Conector SMA de rosca com angulo de 180°	7,56	2
Arame De Cobre (fio Nú) Diâmetro 2,40mm (500g=12,5metros)	40,00	1
Arduino Uno Rev3 R3 Atmega328 Smd	27,89	2
Módulo Gps Ublox Neo-6m Gy-gps6mv2 Com Antena Cerâmica	54,08	1
Módulo Cartão Leitor Sd Para Arduino Automação Pic Robótica	8,90	1

\*O MODULO DESCRITO EM [8].

O total gasto no sistema de medição foi de R\$230,98. A critério de curiosidade, a Figura 16 mostra um equipamento de medição de canal LoRa que pode ser adquirido em [9]. Veja que o protótipo desenvolvido neste trabalho teve um custo de quase um quarto do valor de um equipamento comercial.



868 Mhz/915 Mhz LORA LoRaWAN Network Analyzer Tester Análise do Sinal de Força a LoRa Dispositivo Medidor

5 pedidos

**Preço: R\$ 1.016,98**

Adicione ao carrinho agora e pague no 11.11

**R\$ 1.028,67** R\$ 1.168,93 -12%

Conjunto:

Pacote 1 Pacote 2

Quantidade:

1 Adicional 3% desc. (3 itens ou mais) 191 itens disponíveis

**Expedição gratuita**

para Brasil via China Post Registered Air Mail

Estimativa de Entrega: 21/12

**Comprar agora** **Adicione ao carrinho** 24

**Proteção ao Consumidor de 90 Dias**

Garantia de Reembolso

Figura 16: Equipamento de medição comercial.

## III. CARACTERIZAÇÃO DE PERDA DE PERCURSO

No ambiente, um sinal de RF que se propaga no ar está sujeito a diversos fenômenos físicos que podem alterar sua potencia, dentre estes destacamos a perda de percurso que faz com que o sinal decaia conforme a distância. Existem diversas formas de caracterizar a perda de percurso levando em conta diversos efeitos do cenário. Neste trabalho foi utilizado o modelo Log-distance que também foi adotado nos trabalhos [10], [11] e [12]. Tal modelo pode ser demonstrado na Equação (4).

$$Pl(d) = P0 + 10 n \log(d) \quad (4)$$

Onde  $Pl(d)$  é a perda na distância  $d$ ,  $P0$  é a perda em um ponto de referencia,  $n$  é o coeficiente de perda e  $d$  é à distância em metros. Neste trabalho foi utilizada a Equação quatro de forma a caracterizarmos  $n$  utilizando o método dos mínimos quadrados que aproxima uma nuvem de pontos a uma função com menor erro. Como parâmetro de métrica de nossa aproximação e caracterização da curva utilizou-se a **Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM)**.

No nosso setup de medição, foi utilizado como transmissor o equipamento que pode ser visto na Figura 17. Ele é composto da antena dipolo projetada para a frequência de 915MHz, o modulo LoRa de 915 MHz e um Arduino UNO que faz a comunicação com o modulo LoRa e gerência o envio de pacotes. Além disso, o equipamento é composto de um modulo GPS e um cartão SD em que antes de enviar um pacote o Arduino captura a posição atualizada do transmissor e a salva no cartão SD juntamente com o número do pacote a ser enviado.



Figura 17: Equipamento utilizado para transmissão de pacotes.

Já no setup de recepção temos uma antena colinear ressonante em 915MHz ligada ao modulo LoRa também de 915MHz e um modulo Arduino que recebe os pacotes e os envia para o notebook por comunicação serial. O sistema foi posicionados na janela do prédio da engenharia Itamar Franco conforme pode-se observar nas Figuras 18 e 19.



Figura 18: Posicionamento a antena receptora vista do lado de fora do prédio.

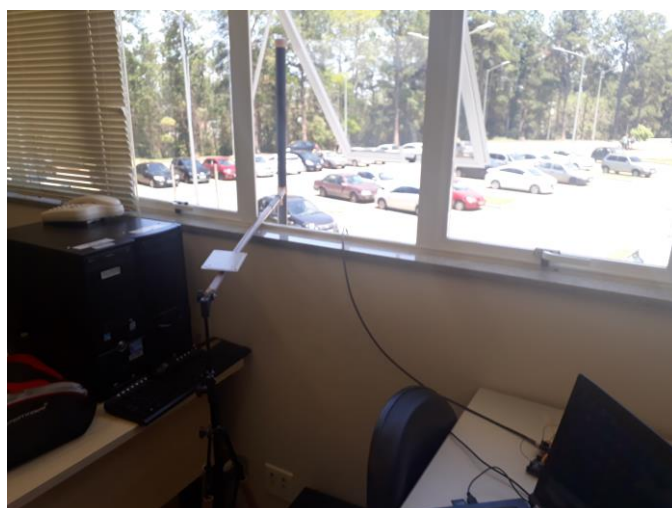


Figura 19: Posicionamento a antena receptora vista de dentro do laboratório.

As configurações dos módulos LoRa podem ser observadas na Tabela II.

TABELA II: CONFIGURAÇÕES DOS MÓDULOS LoRa.

Parâmetro	Transmissor	Receptor
Largura de Banda	125 kHz	125kHz
Fator de espalhamento	12	12
Potência de transmissão	14dBm	-
CRC	Desabilitado	Desabilitado
frequência	915MHz	915MHz

## MEDIDAS OUTDOOR

Para fazer a caracterização do ambiente outdoor, foram utilizados dois tipos de cenários distintos, sendo eles:

- Cenário A: ambiente outdoor com visada

- Cenário B: ambiente outdoor sem visada

O motivo da escolha desses dois tipos de cenário é que ao realizar a modelagem para ambos teremos ao final uma modelagem com estimativas de RSSI máximo e mínimo para uma determinada distância o que pode nos dar uma análise da cobertura da comunicação **ponto a ponto (Point to Point - P2P)**.

Nesta medida além dos dados aqui coletados utilizou-se medidas realizadas anteriormente para a frequência de 433MHz em que o modulo havia sido configurado com as mesmas características apresentadas anteriormente e que podem ser encontrada em [13]

Na Figura 20 podemos observar a rota escolhida para o cenário A que se trata de um percurso de 286,77 metros de distância do receptor LoRa. Nota-se que existe no percurso uma linha de visada praticamente em todo o percurso. Contudo, existe uma área de pouca vegetação no meio do caminho o que pode obstruir um pouco da visada. Além disso, a presença de prédios ao entorno do percurso e a presença de automóveis em movimento e parados podem contribuir para o efeito de multipercurso que pode contribuir ou prejudicar a recepção do sinal modulado LoRa. Para garantir que as medidas coletadas fossem realmente de perda de percurso, a distancia entre os pontos onde eram enviados os pacotes teve uma distância de  $30\lambda$ .

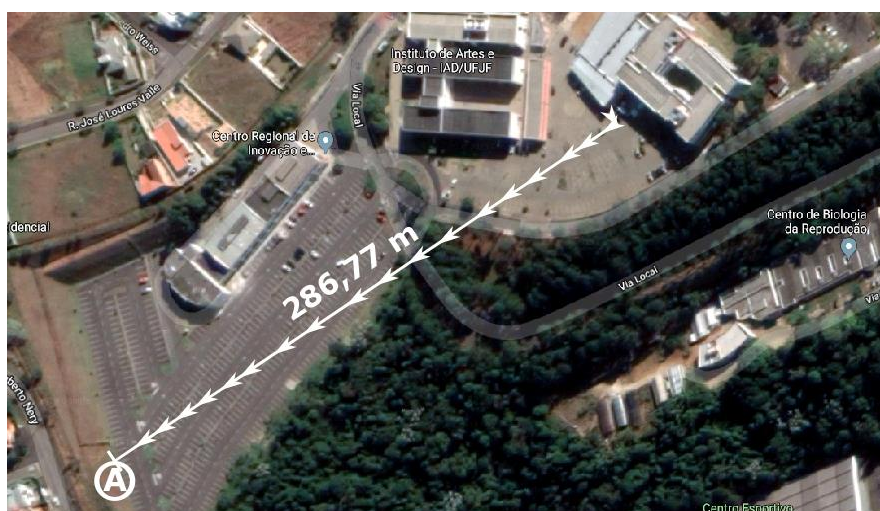


Figura 20: Ambiente de medição com visada outdoor (Cenário A)

A Figura 21 traz o cenário B que se trata de um percurso que caracteriza um ambiente sem visada, pois em todo o percurso a antena receptora estava posicionada atrás do prédio da engenharia, onde a distância máxima percorrida foi de 218,82 metros. Como se trata de um ambiente em que a visada é obstruída devido à presença de prédios espera-se que o RSSI para este trajeto caia muito mais que no caso do cenário A.





Figura 21: Ambiente de medição sem visada outdoor (Cenário B).

Os resultados para o cenário A podem ser vistos a seguir juntamente com medidas realizadas anteriormente para a frequência de 433MHz a critério de comparação nas Figuras 22 e 23. Notamos que para a frequência de 915MHz houve uma maior atenuação do sinal, isso porque tomando uma mesma distância, o sinal tende a decair mais com a distância para frequências mais elevadas

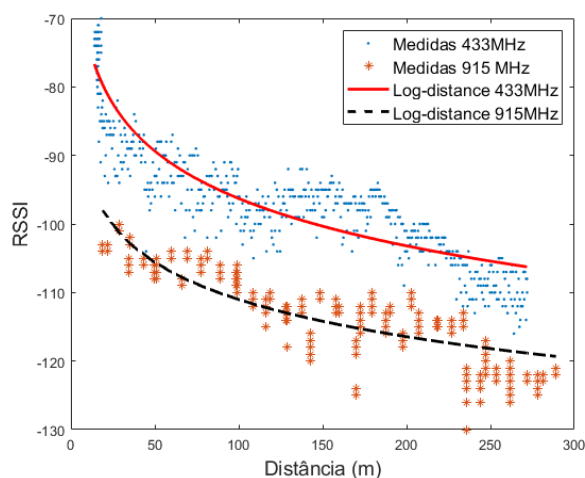


Figura 22: Resultado do tratamento dos dados em escala linear no cenário A.

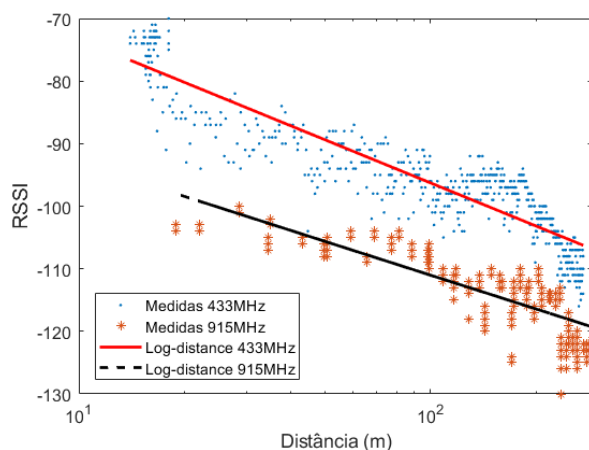




Figura 23: Resultados do tratamento dos dados em escala logarítmica no cenário A.

Já no cenário B, observa-se pelas figuras 24 e 25 o sinal teve uma maior atenuação devido à retirada da linha de visada devido à obstrução do prédio. É interessante frisar que mais uma vez o nível de sinal para a frequência de 915MHz se manteve menor que os valores obtidos para a frequência de 433MHz, o que a ação do fenômeno físico influenciando no RSSI.

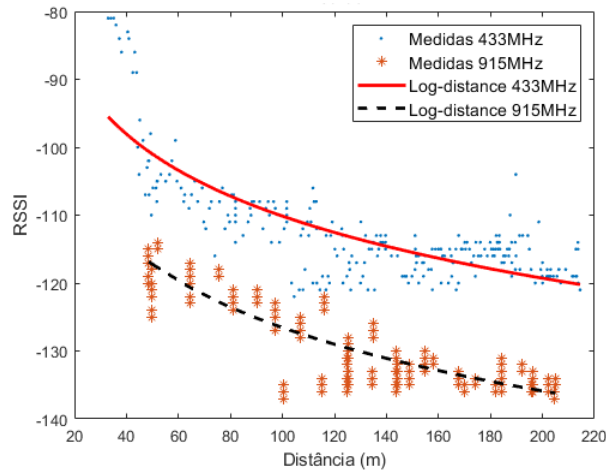


Figura 24: Resultado do tratamento dos dados em escala linear no cenário B.

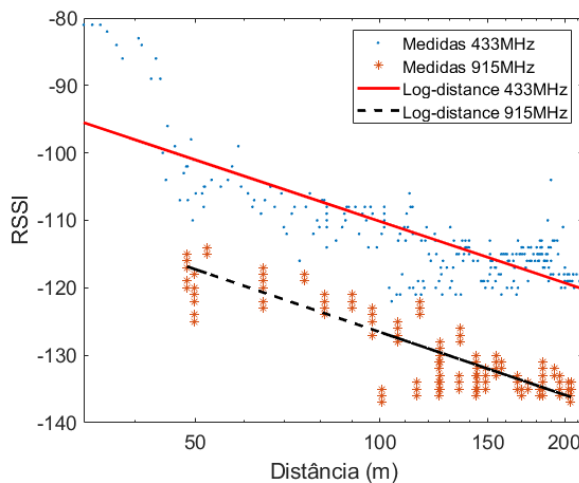


Figura 25: Resultados do tratamento dos dados em escala logarítmica no cenário B.

Comparando agora os valores das medições para 433MHz e 915Mhz podemos observar pela Tabela III que para o cenário A os valores do coeficiente de perda  $n$  estão próximos de dois caracterizando assim um ambiente com visada. Nota-se, contudo, que o valor de  $n$  para 433MHz está um pouco elevado o que se deve a presença de vegetação e prédios próximos ao trajeto de medição que podem influenciar na atenuação do sinal. Já em 915MHz ele está abaixo de dois, o que demonstra que o efeito de multipercurso pode estar influenciando para um aumento no nível do sinal.

Tomando agora a análise do cenário B, nota-se que os valores de  $n$  estão próximos tanto para 433MHz quanto para 915MHz e é interessante frisar que estes valores aumentaram quando comparado ao cenário A, o que era esperado já que a caracterização se trata de um ambiente sem linha de visada.

TABELA III: RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE OUTDOOR.

Parâmetro	Cenário A		Cenário B	
	433MHz	915MHz	433MHz	915MHz
n	2,2972	1,7997	3,0362	3,0968
P0	-50,3351	-75,0325	-49,4207	-64,6280
REQM	4,2261	3,2953	4,5641	3,2166

## DIFICULDADES

Nesta caracterização houve uma principal dificuldade inicial com o GPS, pois não havia como confirmar se a posição que o GPS pegava era atualizada. Em algumas medidas acabava-se perdendo o dia, pois todas as medidas ficaram perdidas já que o dispositivo não estava atualizando a posição.

Para solucionar este problema foi observado que não podia-se inserir um delay na sequência de comandos, pois o GPS acabava perdendo o sinal de satélite com a atualização de posição. Logo, no código, entre o fim do envio da rajada de pacotes e o sinal para o próximo envio, foi retirado uma rotina que fazia o led piscar e inserido o código que realizava a atualização da posição, desta forma enquanto o usuário caminhava para a próxima posição o GPS ia atualizando a sua posição.

Outro problema encontrado foi com os cabos, pois conforme observamos na Figura 26 o conector SMA é crimpado no cabo e como estes cabos acabam sendo utilizados em outras praticas ele acaba tendo a sua ponta sendo mandada para traz do conector que faz com que haja um mal contado entre o conector SMA fêmea e o macho. Este problema fez com que os resultados da medição ficassem com um RSSI muito baixo ao ponto de não conseguir distancias tão elevadas. Para solucionar o problema nós simplesmente trouxemos o vivo do conector para mais fora do cabo sem danificá-lo a fim de garantir a conexão sem perdas.

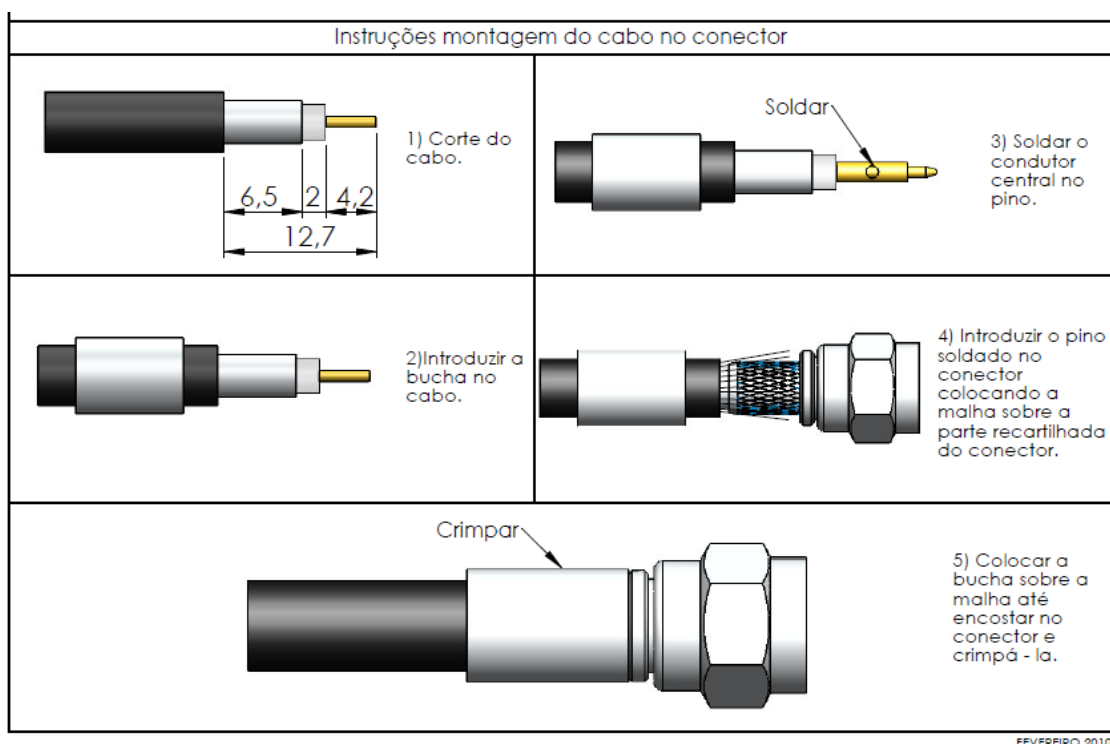


Figura 26: Esquema de montagem de um conector SMA macho.

Por fim uma ultima dificuldade foi com relação ao receptor, pois no inicio das medidas era impossível saber

se as medidas realmente estavam chegando. Para resolver este problema foram realizados testes preliminares e pesquisas correlacionando com outros artigos para identificar a melhor configuração do módulo LoRa. Nos testes observou-se que o código corretor de erros fazia com que a transmissão piorasse no sentido de que ela chegava com erros, porém o código tentava corrigir o erro, mas não conseguia e por consequência descartava o pacote. Uma suposição para este descarte do pacote se deve ao tamanho do mesmo ter sido aumentado o que faz com que a taxa de erros seja maior e por consequência a comunicação fique ruim. A solução para este problema foi desabilitar o código corretor de erros nas configurações do módulo por meio de um comando no Arduino.

## MEDIDAS INDOOR

No setup de medição para o ambiente indoor a antena receptora foi posicionada a uma altura de 1,5 metros do chão sob um suporte também confeccionado usando canos de PVC, a antena foi ligada ao dispositivo LoRa configurado como receptor tal como no ambiente outdoor. A Figura 27 mostra o setup de recepção.



Figura 27: Setup de recepção para medidas indoor.

Para as medidas indoor utilizaram-se os seguintes cenários:

- Cenário C: ambiente indoor com visada
- Cenário D: ambiente indoor sem visada

No cenário C temos um percurso em linha reta no qual existe linha de visada entre transmissor e receptor. As medidas foram feitas em distância de 1 em 1 metro, sendo que para cada posição o transmissor enviava 10 pacotes com intervalo entre pacotes de 1 segundo. A figura 28 mostra como é o cenário C.

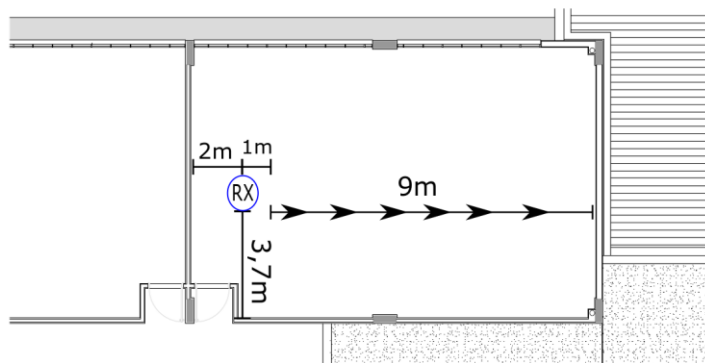


Figura 28: Ambiente com visada indoor (cenário C).

Já no cenário D, não existe a presença de visada devido à obstrução física das paredes e portas. Novamente as medidas foram efetuadas em distâncias de 1 metro. A figura 29 mostra o cenário D.

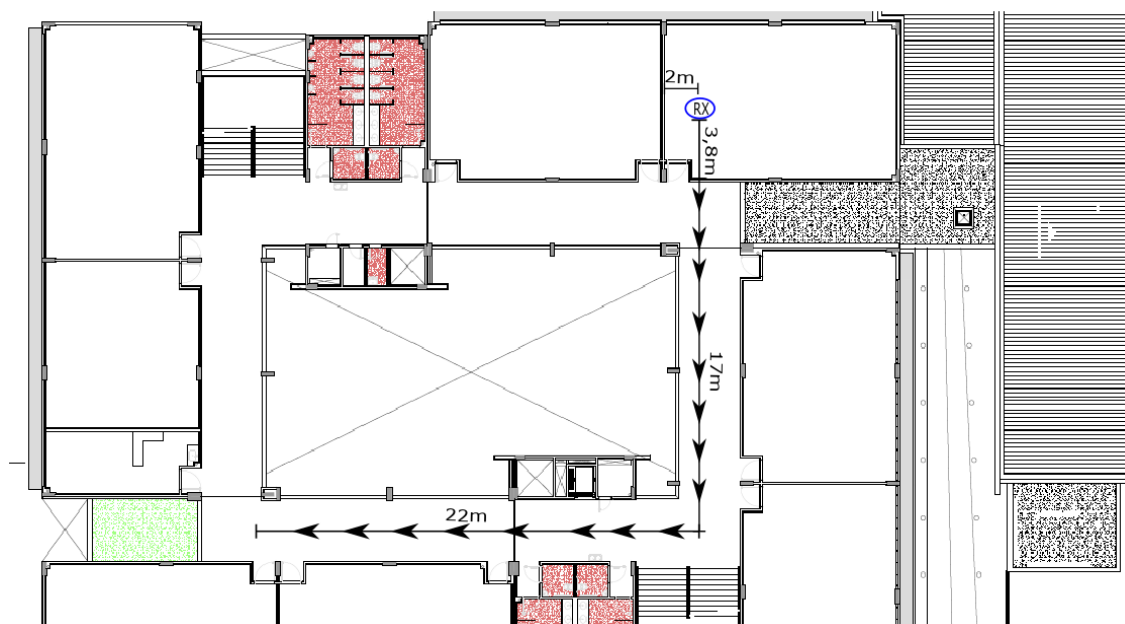


Figura 29: Ambiente sem visada indoor (cenário D).

Analisando os resultados das medidas do cenário C demonstrados nas figuras 30 e 31, observamos que apesar de efetuarmos 10 medidas em cada posição, os valores de RSSI estão bem comportados no sentido de que a variância dos valores é pequena e fazendo com que a medida convirja para um valor. Isto pode ter ocorrido devido à forma com que a tecnologia LoRa executa o cálculo de seu RSSI que nos entrega um valor numérico inteiro, fazendo assim com que pequenas variações do sinal passem despercebidas. Portanto, para distâncias muito próximas acabamos tendo valores praticamente fixos, porém quando chegamos a distâncias mais elevadas começamos a observar uma variabilidade no RSSI medido conforme se pode observar.

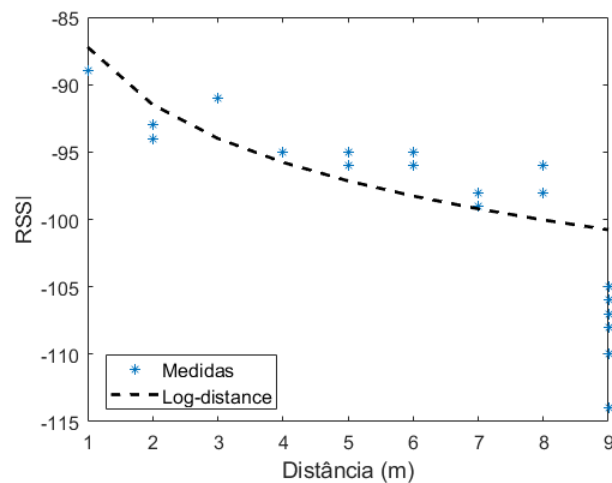


Figura 30: Resultado do tratamento dos dados em escala linear no cenário C.

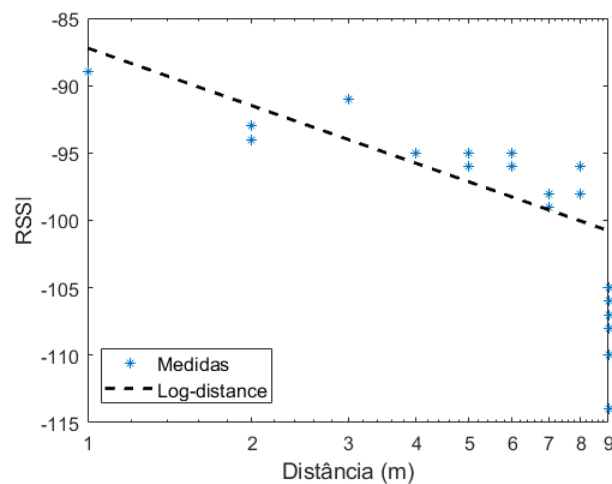


Figura 31: Resultados do tratamento dos dados em escala logarítmica no cenário B.

Já para o cenário D, observamos pelas Figuras 32 e 33 que a inserção de obstrução de visada fez com que houvesse uma maior variabilidade do RSSI. Nota-se ainda que o nível de sinal caiu, o que já era esperado para o cenário em que foi medido.

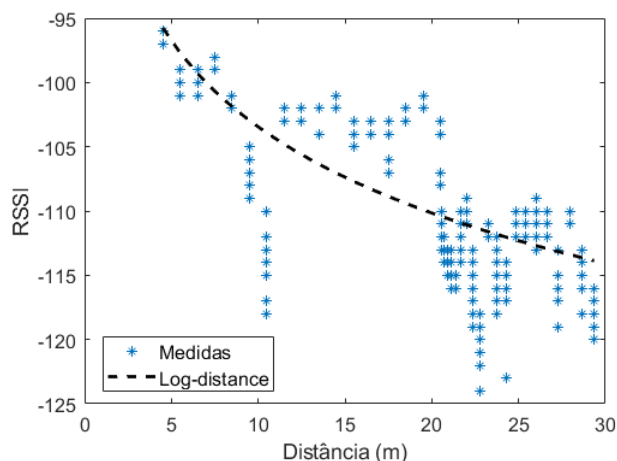


Figura 32: Resultado do tratamento dos dados em escala linear no cenário D.

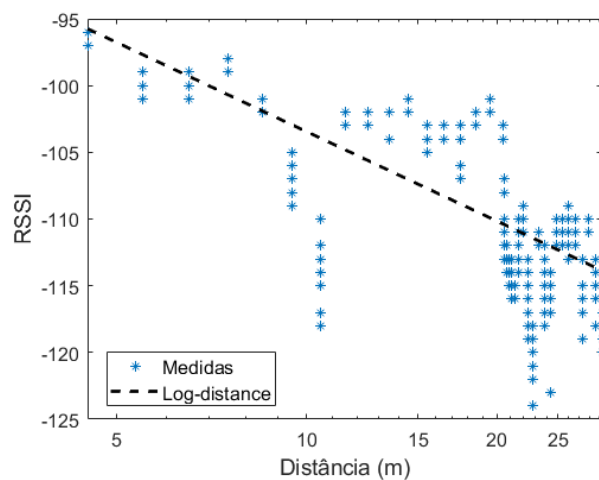


Figura 33: Resultado do tratamento dos dados em escala logarítmica no cenário C.

Ao observar os valores numéricos encontrados para o modelo na Tabela IV, observamos que o valor de  $n$  para o cenário C ficou mais abaixo quando comparado com o cenário A, tal efeito era esperado já que neste estamos em um cenário outdoor e naquele se trata de um cenário indoor ambos com linha de visada. Já no cenário D observamos novamente que ao retirar a linha de visada houve um aumento do valor de  $n$  o que já era esperado e, além disso, o valor é inferior ao encontrado no cenário B devido à característica de um cenário indoor.

TABELA IV: RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DE AMBIENTE INDOOR

Parâmetro	Cenário C	Cenário D
$n$	1,4200	2,2256
$P_0$	-87,2171	-81,2019
REQM	3,2370	4,2335

## DIFICULDADES

Nesta medição houve a dificuldade de que por se tratar de um ambiente indoor, o numero de medidas foi muito pequeno já que as medidas eram realizadas em distancias de 1 metro. No final tal dificuldade não comprometeu a medida.

Outra dificuldade encontrada foi com relação à presença de pessoas no cenário, uma vez que a presença de pessoas ajuda nos efeitos de multipercurso, foi necessário realizar as medidas em ambientes vazios o que só era possível antes do inicio do horário de aulas. Para solucionar esta dificuldade as medidas eram realizadas nos horários de 06h30min as 07h30min, horário em que poucas pessoas estavam transitando nos corredores da universidade.

## IV. TAXA DE ERRO DE BITS (BER) E ERRO DE PACOTES

Outra preocupação da implementação do sistema de comunicação LoRa está em saber qual a largura de banda ideal a ser trabalhar para um determinado tamanho de pacote. Neste sentido foi realizado um setup de medição em que o transmissor foi posicionado a uma distancia de 10 metros do receptor conforme se pode observar na Figura 34. Nesta posição, pacotes de diferentes tamanhos foram enviados. Os tamanhos dos pacotes foram pensados a fim de realizar aplicações diversas como registro de temperatura e unidade de um determinado local. Para tanto, eram enviados quatro pacotes com tamanhos de 8,16, 32 e 48 bytes. Estes pacotes eram enviados em intervalos de guarda de 1 segundo em ciclos de 10 vezes, totalizando um total de 40 pacotes.

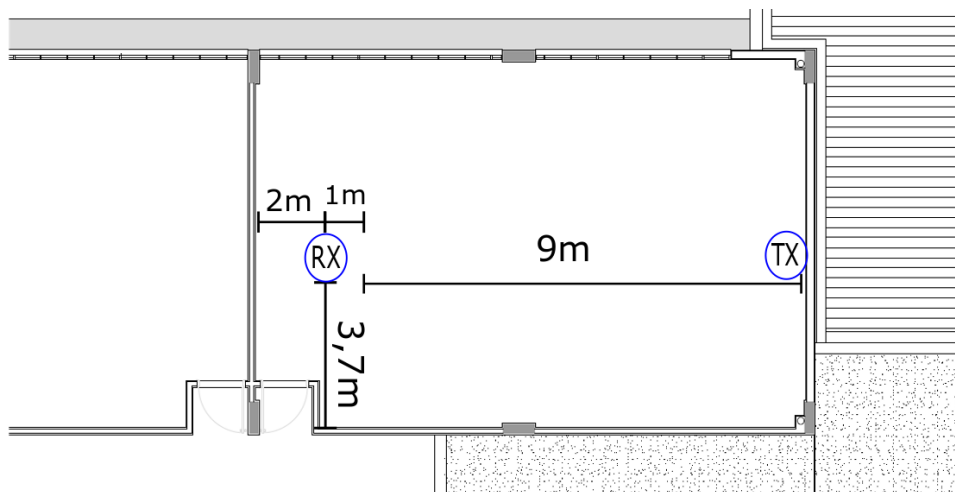


Figura 34: configuração para o cenário de medição para testes com a largura de banda

A fim de avaliar o desempenho da banda foram contabilizados os pacotes errados, pacotes perdidos e pacotes corretos. Com base nos pacotes errados escolhia-se de forma aleatória um pacote para verificar a taxa de erro de bits (BER) que é dada pela Equação (5).

$$BER = \frac{n^{\circ} \text{ bits errados}}{n^{\circ} \text{ total de bist}} \times 100 \quad (5)$$

A Tabela V mostra os resultados desta caracterização para diferentes larguras de banda.



TABELA V: RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE TESTE DA LARGURA DE BANDA.

Largura de banda(kHz)	Tamanho do pacote	Pacotes errados	Pacotes perdidos	Pacotes corretos	BER (%)	Bits errados	Caracteres corretos	Total de bits
31,2	8	1	9	0	21,8750	14	2	64
	16	5	5	0	24,2188	31	6	128
	32	3	7	0	23,4375	60	10	256
	48	6	4	0	25	96	17	384
41,7	8	9	1	0	21,8750	14	2	64
	16	10	0	0	16,4063	21	7	128
	32	10	0	0	20,7031	53	13	256
	48	9	1	0	17,7083	68	25	384
62,5	8	0	0	10	0	0	8	64
	16	7	0	2	7,8125	10	10	128
	32	10	0	0	13,6719	35	17	256
	48	9	1	0	13,5417	52	28	384
125	8	1	0	9	1,5625	1	7	64
	16	2	0	8	1,5625	2	15	128
	32	9	0	1	7,8125	20	21	256
	48	9	0	1	11,7188	45	29	384
250	8	0	0	10	0	0	8	64
	16	0	0	10	0	0	16	128
	32	0	0	10	0	0	32	256
	48	2	0	8	2,0833	8	44	384

Com os dados de valor de BER foi possível caracterizar de forma mais interessante como a largura do canal influenciava no BER. A Figura 35 traz o comportamento do BER em função da largura de banda, nota-se que conforme a largura de banda é maior, é possível suportar um pacote maior sem que haja muitos erros de bits, contudo à medida que diminua a largura de banda era necessário diminuir o tamanho do pacote para que a taxa de erro de bits diminuísse. Um contraste interessante é que para os tamanhos utilizados para o pacote viu-se que a largura de banda de 31,2kHz foi a que apresentou o pior desempenho. Para larguras de banda inferiores já não valia mais a pena realizar medições já que os pacotes eram totalmente perdidos.

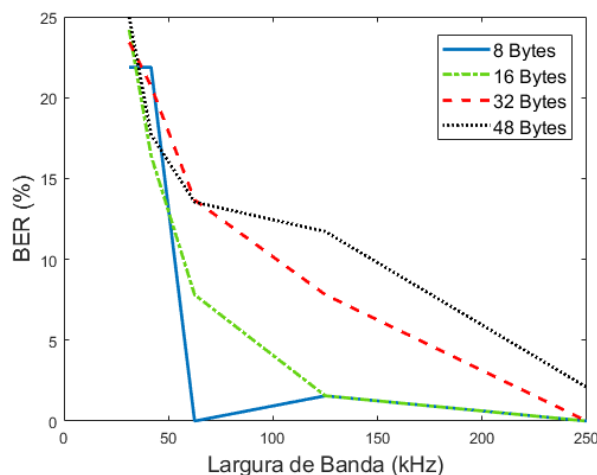


Figura 35: Resultados para medição com a largura de banda.

## DIFICULDADES

Como dificuldade para esta medida pode-se destacar novamente a presença de pessoa na sala o que dificultou as medidas, para solucionar o problema esperou-se que não houvesse pessoas na sala para que o processo de medição fosse executado.

## V. CARACTERIZAÇÃO DE ÁREA DE COBERTURA

Por fim, foi realizada uma medida experimental para averiguar a área de cobertura. Para tanto, configurou-se o transmissor com uma largura de banda de 125kHz, um fator de espalhamento de 12 e uma potência de transmissão de 14dBm.

O código implementado no transmissor fazia com que a posição de GPS fosse atualizada enquanto o usuário não iniciasse as transmissões. Ao pressionar a chave para realizar a transmissão, o dispositivo começava a enviar pacotes contendo o número de medida, tais pacotes tinham o tamanho de 2 bytes. O dispositivo enviava 10 pacotes com intervalos de tempo de 1 segundo entre os pacotes. Após este ciclo o dispositivo guardava o número do pacote juntamente com os valores de latitude e longitude no cartão SD.

O receptor foi posicionado no mesmo local onde foram realizadas as medidas de caracterização de ambiente outdoor e ficava recebendo os pacotes e salvando o valor de RSSI.

No processo de análise dos dados, fez-se uma classificação de pacotes perdidos e pacotes recebidos juntamente com seus valores de RSSI. Para analisar se os valores encontrados na caracterização outdoor estavam de conformidade foi utilizada a Equação (4), porém desta vez inserindo a distância, retirada da latitude e longitude, já que  $n$  e  $P_0$  já haviam sido caracterizados. Desta forma pode-se observar se o valor médio de RSSI medido estava batendo com as caracterizações realizadas.

A Tabela VI mostra os resultados experimentais em cada um dos pontos medidos e a Figura 36 mostra os locais onde estes pontos foram medidos.

Nota-se que os valores médios de RSSI batem dentro dos valores máximos e mínimos de RSSI esperados. Nota-se também que o desempenho da tecnologia foi satisfatório uma vez que ela conseguiu cobrir toda a universidade e obteve um desempenho excelente para o ponto de maior distância (ponto J) de 945,026 metros.

TABELA VI: RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE COBERTURA DA TECNOLOGIA LoRa.

Ponto	Local	Pacotes recebidos	Pacotes perdidos	RSSI médio	Distância (m)	RSSI max esperado	RSSI min esperado
A	RU	10	0	-131,8	127,049	-112,897	-129,784
B	Proximo FAEFID	8	2	-133,375	258,69	-118,455	-139,347
C	Protão SUL	10	0	-137,2	653,69	-125,701	-151,814
D	Chegada HU	10	0	-128,4	774,40	-127,025	-154,093
E	Porta HU	10	0	-123,9	853,29	-127,784	-155,3983
F	Portão HU	10	0	-130,3	618,68	-125,271	-151,074
G	Direito	10	0	-136,9	733,984	-126,606	-153,373
H	Reitoria	9	1	-135,777	723,272	-126,491	-153,175
I	Odonto chegada	10	0	-132,8	598,766	-125,014	-150,6341
J	Humanas	10	0	137	945,026	-128,581	-156,771
K	Biologia	10	0	-137,3	316,875	-120,041	-142,076
L	Economia	9	1	-134,888	868,98	-127,926	-155,643
M	Odonto saída	8	2	-136	742,96	-126,701	-153,536
N	Engenharia	10	0	-110,1	80,14	-109,296	-123,586

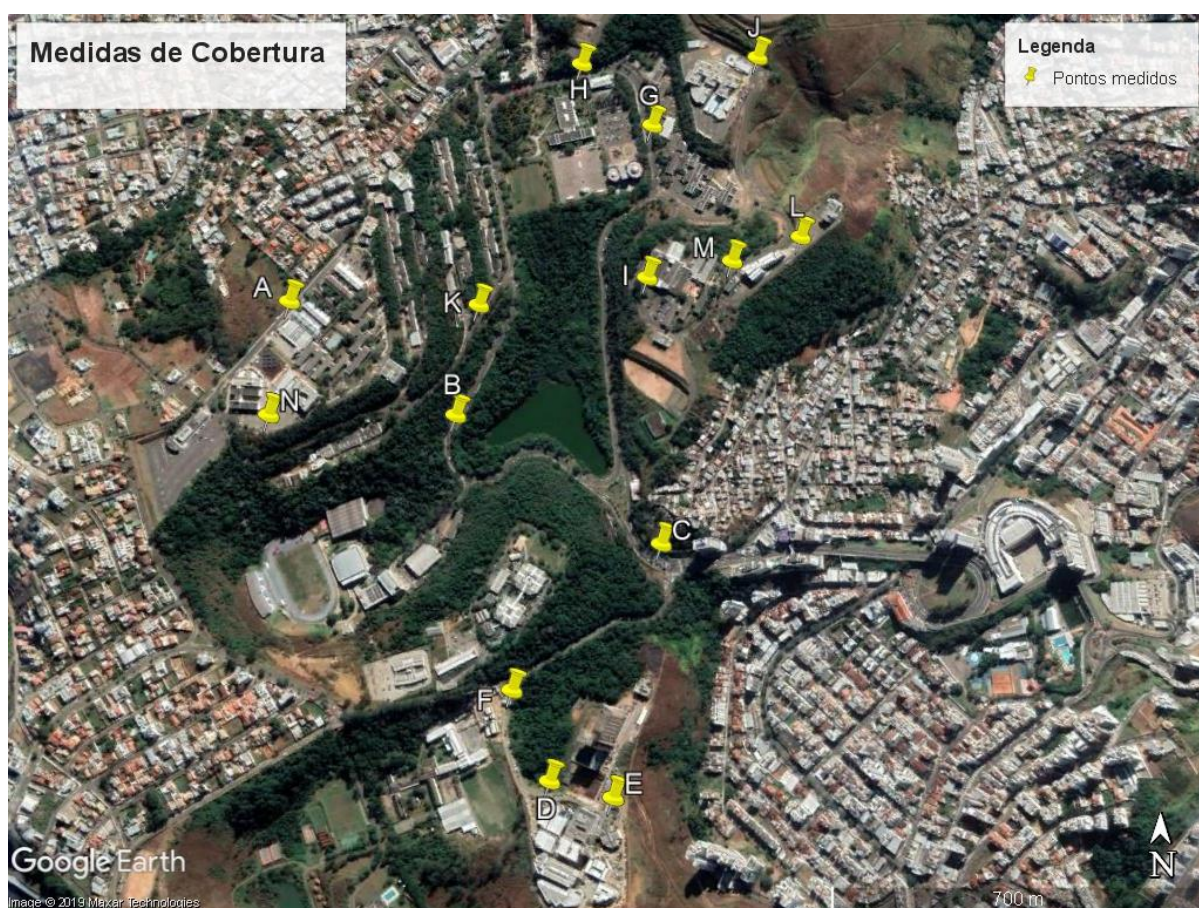


Figura 36: Resultados para medição de cobertura da tecnologia LoRa.

#### Dificuldades

A principal dificuldade enfrentada nesta medição está no fato de que a medida demorava pelo menos 10 segundo por ponto, assim era necessário permanecer na mesma posição o que era muito difícil de conseguir já

que para a locomoção utilizou-se o ônibus circular. Para solucionar tal problema foi utilizada a estratégia de realizar estas medidas em pontos de cruzamento de ruas e onde e pontos de ônibus onde as pessoas entravam e desciam do ônibus.

## VI. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi realizada uma caracterização da tecnologia LoRa para o ambiente da Universidade Federal de Juiz de Fora a fim de prever quais eram as previsões de cobertura por meio de uma modelagem matemática, taxa de erro de bits e medidas de cobertura efetiva da tecnologia por meio de medidas em campo.

Observou-se que com o uso de módulos LoRa foi possível realizar uma caracterização de perda de percurso usando o modelo Log-distance com os parâmetros de RSSI medido e a distância do transmissor ao receptor. Com estas medidas chegou-se a uma caracterização do ambiente.

Viu-se ainda que nos testes de largura de banda, a taxa máxima de erros suportada foi de 25% sendo que a partir deste valor não se conseguia mais receber pacotes, este teste mostrou ainda que pacotes menores sofrem menos com o BER para uma dada largura de banda, podendo assim diminuí-la dependendo do tamanho do pacote.

Por fim observou-se que no teste de cobertura que a tecnologia consegue facilmente cobrir a universidade mesmo estando com a antena em uma posição que obstrui a visada.

Como trabalhos futuros busca-se melhor o sistema de medição e implementar os protocolos de camada superior da rede LoRaWAN para criar assim uma rede IoT LPWAN na Universidade Federal de Juiz de Fora.

## REFERENCIAS

- [1] Semtech “What is LoRa?” <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.
- [2] Associação Brasileira de Internet das Coisas (ABIC) “Projeto TTN – The Things Network” <https://abinc.org.br/projeto-ttn-the-things-network/>
- [3] The Things Network <https://www.thethingsnetwork.org/>
- [4] The Tings Network “Frequency Plans” <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequency-plans.html>
- [5] Agencia nacional de Telecomunicações (Anatel) “Resolução nº 680, de 27 de junho de 2017” <https://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>
- [6] Agencia nacional de Telecomunicações (Anatel) “Ato nº 14448, de 04 de dezembro de 2017” <https://www.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-certificacao/2017/1139-ato-14448#item10.3.1>
- [7] Github “Build and configure your own LoraWAN Gateway from The Things Conference On Tour in Maribor!” <https://github.com/IRNAS/ttn-irnas-gw>
- [8] Aliexpress “Módulo RFM95W” <https://pt.aliexpress.com/item/32809306023.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.5b2cb90a3fqftV>
- [9] Aliexpress “LoRaWAN Network Analyzer” <https://pt.aliexpress.com/item/32870085776.html?spm=a2g0o.cart.0.0.142c3c00yxjLea&mp=1>
- [10] P. Jörke, S. Böcker, F. Liedmann and C. Wietfeld, "Urban channel models for smart city IoT-networks based on empirical measurements of LoRa-links at 433 and 868 MHz," *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Montreal, QC, 2017, pp. 1-6.
- [11] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen and M. Pettissalo, "On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology," *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, Copenhagen, 2015, pp. 55-59.
- [12] S. Benaissa *et al.*, "Internet of animals: characterisation of LoRa sub-GHz off-body wireless channel in dairy barns," in *Electronics Letters*, vol. 53, no. 18, pp. 1281-1283, 31 8 2017.
- [13] Rafael da S. Macêdo, Matheus H. A. Miranda, João Paulo S. H. Lima, Álvaro A. M. de Medeiros "Modelagem inteligente de perda de percurso utilizando transceptores LoRa," em XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2019), October 1, 2019.