

LORA X NS-3: POTÊNCIA DO SINAL, SNR, PERDA DE PACOTE.

LORA X NS-3: SIGNAL POWER, SNR, PACKAGE LOSS.

Beatriz Pestana Teixeira¹
Marcus Vinicius da Silva Barros Fioravante¹
Débora Meyhofer Ferreira²

Universidade São Francisco - Câmpus Swift

beatriz_teixeira97@hotmail.com|mvfiorava@gmail.com|debora.ferreira@usf.edu.br

¹Alunos do Curso de Engenharia Elétrica

²Professora orientadora

RESUMO Esse trabalho se propõe não apenas a entender o funcionamento da tecnologia LoRa[®] mas também em comparar o desempenho de funcionamento de um link ponto a ponto na prática com o resultado de simulação do mesmo cenário. O simulador utilizado é o NS-3 (*Network Simulator 3*) e o hardware utilizado é o ESP32 da *Heltec*, comparando em parâmetros como relação sinal ruído, alcance e perda de pacote. Foram utilizados diversos cenários, tanto para a simulação quanto para o experimento prático. O simulador demonstrou resultados bem próximos aos reais, exceto na situação onde a topologia do terreno não permitiu linha de visada.

PALAVRAS-CHAVE: LoRa, comunicação, LPWAN, NS-3, prova de desempenho, perda de pacote, SNR, potência do sinal, comparação.

ABSTRACT *This work proposes not only to understand how LoRa[®] technology works, but also to compare the performance of a point-to-point link in practice with the simulation result of the same scenario. The simulator used is the NS-3 (Network Simulator 3) and the hardware used is the ESP32 from Heltec, comparing parameters such as signal-to-noise ratio, range and packet loss. Several scenarios were used, both for the simulation and for the practical experiment. The simulator showed results very close to the real ones, except in the situation where the terrain topology did not allow line of sight.*

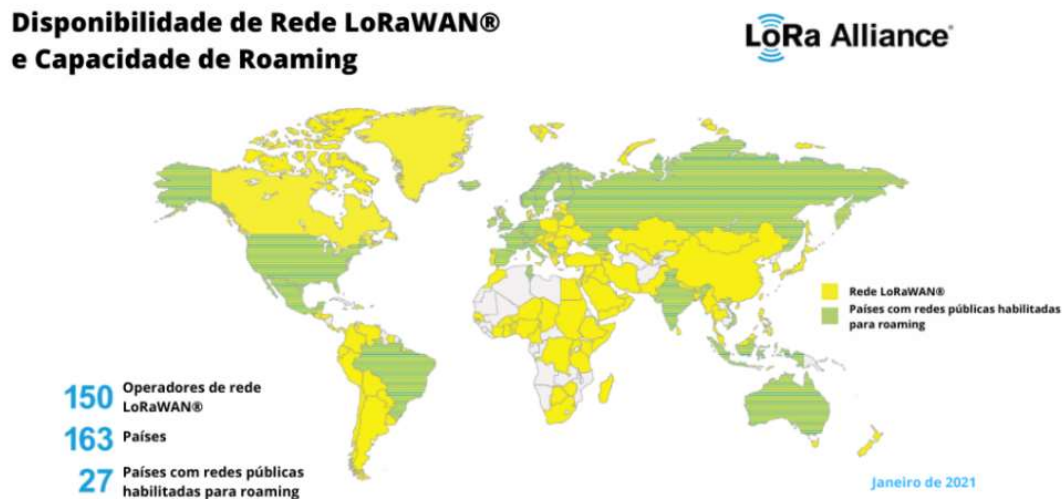
KEYWORDS: *LoRa, communication, LPWAN, NS-3, performance test, packet loss, SNR, Signal strength, potency comparison.*

INTRODUÇÃO

A rede LoRa[®] é uma solução sem fio que trabalha nas frequências sub-GHz e são principalmente indicadas para demandas IoT, permitem comunicação de qualidade a longas distâncias consumindo o mínimo de energia em operação. Sua principal aplicação são os sistemas dos mais diversos tipos de sensores, como os de controle de ambientes e telemetria, principalmente os localizados em áreas de difícil cobertura. Com alta imunidade a ruídos, o alcance da rede LoRa[®] pode chegar a 5 km nas áreas urbanas e 15km nas áreas rurais. No ano de 2020 Thomas Telkamp, utilizando um balão de gás Hélio com um módulo LoRa[®] acoplado atingiu os incríveis 832km de distância no alcance de comunicação. A Tecnologia LoRa[®] foi criada na França e desenvolvida pela empresa *Cycleo SAS*. Em seguida foi adquirida pela Semtech e posteriormente, a associação sem fins lucrativos, *Lora Alliance*, criada em maio de

2015, quis impulsionar e promover o protocolo *LoRaWAN*TM, que é um protocolo padrão global aberto e utiliza a rede LoRa[®] para a comunicação, e partir deste momento a Tecnologia LoRa começou a ser conhecida tendo divulgação e aceitação mais ampla. Devido ao grande desempenho da rede LoRa[®] cada vez mais países e operadores da rede *LoRaWAN*TM aderem à tecnologia ao redor do mundo como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Rede LoRa ao redor do mundo



(Fonte: <https://abinc.org.br/tag/lora-alliance/>).

Este trabalho tem o objetivo de estudar a equivalência entre os resultados de uma simulação executada no simulador de redes *NS-3* e o ambiente real com experimentos práticos que envolvem a comunicação com dispositivos compatíveis com a tecnologia LoRa[®]. Será feita uma avaliação de desempenho dos dois ambientes da comunicação em enlaces compostos por uma unidade transmissora e uma receptora, baseado na metodologia que será aplicada e variada a distância. Será implementado protótipos de hardware para a comunicação LoRa[®], onde as condições dos ambientes serão recriadas. Será avaliado as seguintes situações: taxa de perda de pacote, capacidade da rede em termos de vazão, potência de sinal recebido e relação entre a vazão simulada e a obtida no meio real.

A estrutura do trabalho apresenta no referencial teórico a definição do protocolo e a arquitetura de rede LoRa[®], especificações e estrutura da rede assim como informações de segurança.

REFERENCIAL TEÓRICO

LoRa[®] (abreviação de longo alcance) é uma técnica de modulação de espectro de espalhamento derivada da tecnologia de espalhamento *espectral de chirp (CSS)*. LoRa[®] é a camada física ou modulação sem fio utilizada para criar um link de comunicação de longo alcance. Muitos sistemas sem fio utilizam modulação *keying (FSK)* onde com variação de frequência como camada física porque é muito eficiente para obter baixa potência. Contudo a tecnologia LoRa[®] é baseado na modulação em espectro de propagação chirp, que mantém as características de baixa potência da modulação *FSK (Frequency-shift keying)* a amplitude da onda portadora é constante durante o processo de modulação e a onda resultante varia a sua frequência conforme os níveis lógicos do sinal modulante mas aumenta significativamente o alcance da comunicação, de 2km aproximadamente para até 15km em áreas rurais. Espectro de

propagação *chirp* tem sido usado em comunicação militar e espacial por décadas devido a longas distâncias de comunicação que podem ser alcançadas e possui robustez à interferência, mas LoRa[®] é a primeira implementação de baixo custo para uso comercial. Por meio deste modelo, este tipo de comunicação tem se tornado cada vez mais inteligente, com a possibilidade de capturar e transmitir dados, permitindo que a comunicação entre eles seja controlada.

Neste contexto da “internet das coisas”, eles têm como característica periódica limitação em termos de processamento e energia, tornando um desafio para a comunicação sem fio. As redes *LoRaWAN*[™] (Protocolo que define arquitetura do sistema) atendem essa questão, referindo-se a uma rede de longo alcance e baixa potência, ou *LPWAN* (*Low Power Wide Area Network*).

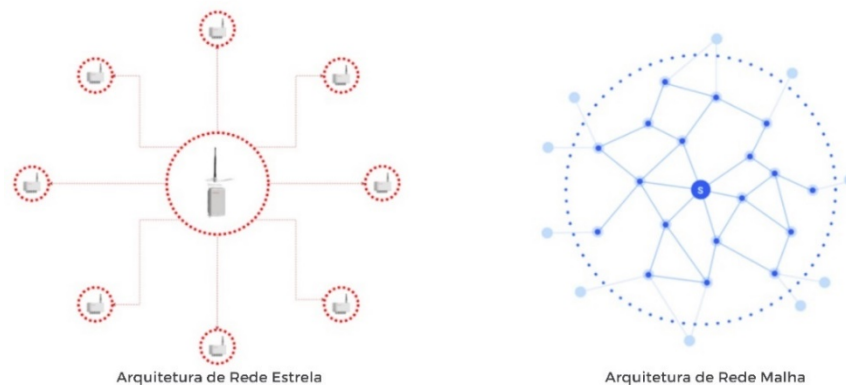
A rede *LoRaWAN*[™] é indicada, principalmente, para aplicações de internet das coisas (*Internet of Things*) que solicitam cobertura de grandes áreas. Para isso, a LoRa[®] implementa uma técnica de modulação por espalhamento espectral de *chirps* (*Chirp Spreading Spectrum*), que modifica a frequência sem mudar a fase entre símbolos adjacentes, fazendo com que o sinal resultante seja resistente a interferências por ruído ou sinais com frequências próximas. Além disso LoRa[®] se caracteriza pela compactação do hardware, na redução do tamanho dos cabeçalhos e da complexibilidade da rede em termos de saltos e endereçamento, viabilizando uma comunicação bidirecional simples, com o uso de infraestrutura mínima e com baixo consumo de energia. Contudo, o planejamento de redes *LPWAN* torna-se complexo pelos múltiplos aspectos da sua implementação, ao que podem ser avaliadas por meio de simulações.

Os dispositivos LoRa[®] e o padrão *LoRaWAN*[™] aberto permitem aplicativos IoT inteligentes resolverem alguns dos maiores desafios que nosso planeta enfrenta: gerenciamento de energia, redução de recursos naturais, controle de poluição, eficiência de infraestrutura, prevenção de desastres e muito mais. Os dispositivos LoRa[®] e o padrão *LoRaWAN*[™] acumulam várias centenas de casos de uso conhecidos para cidades inteligentes, casas e edifícios inteligentes, agricultura inteligente, medição inteligente, cadeia de suprimentos, logística inteligentes e muito mais. Com mais de 191 milhões de dispositivos conectados a mais de 151 redes esta tecnologia vem crescendo a cada dia (LORA[®] ALLIANCE, 2015).

LoRaWAN[™] define o protocolo de comunicação e arquitetura do sistema para a rede enquanto a camada física LoRa[®] permite o link de comunicação de longo alcance. O protocolo e a arquitetura da rede têm a maior influência na determinação do vida útil da bateria de um nó, a capacidade da rede, a qualidade do serviço, a segurança, e a variedade de aplicativos servidos pela rede. O *LoRaWAN*[™] oferece um diagrama chamado *ADR* (*Adaptive Data Rate*), que é usado para controlar a configuração dos parâmetros de transmissão do dispositivo para os *gateways*. Ao utilizar *ADR*, os dispositivos permitem que o servidor de rede que é responsável de selecionar individualmente os parâmetros utilizados por cada dispositivo presente na rede, possuem a finalidade de diminuir a perda de pacotes e otimizar questões de consumo de energia. Sendo assim, na rede *LoRaWAN*[™], existem outros parâmetros relacionados à integridade de transmissão dos dados, esses parâmetros são geralmente ajustados pelo servidor de rede e entre eles está a largura de banda e a taxa de código. Além disso, outro motivo importante que pode interferir na transmissão é a distância de instalação dos dispositivos em relação aos *gateways*.(LORA[®] ALLIANCE, 2015).

Muitas redes implantadas existentes utilizam uma arquitetura de rede em malha. Em uma malha de rede, os nós finais individuais encaminham as informações de outros nós para aumentar o alcance de comunicação e o tamanho da célula da rede. Enquanto este formato aumenta o alcance, ele também adiciona complexidade, reduz a capacidade da rede e reduz o tempo de vida da bateria à medida que os nós recebem e encaminham informações de outros nós que pode ser irrelevante para eles. A arquitetura estrela de longo alcance utilizado pela *LoRaWAN*[™] faz mais sentido para preservar vida útil da bateria quando a conectividade de longo alcance pode ser alcançada.(LORA[®] ALLIANCE, 2015) conforme Figura 2:

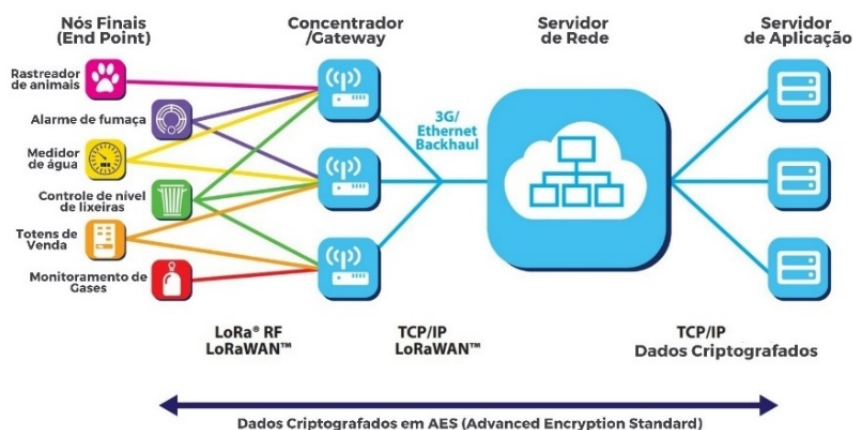
Figura 2 - Arquitetura de rede estrela e malha



(Fonte: <https://www.worldsensing.com/pt/news/lora-key-reasons/>).

Como os nós não estão de modo direto associados a apenas 1 (um) *gateway*, as informações são transmitidas espontaneamente, e assim podendo ser recebidos por mais de 1 (um) *gateway* de rede. Cada pacote recebido será encaminhado para o servidor da rede, que então lidará com possíveis duplicações, autenticação e reconhecimento de entrega. Essa informação é importante do ponto de vista de aplicações IoT pois é natural que haja alteração de nós e este tratamento não individual de cada nó exclui a necessidade de reconfiguração quando acontece deslocamentos (LORA[®] ALLIANCE, 2015) conforme Figura 3:

Figura 3 -Arquitetura de rede LoRa[®]



(Fonte: LORA[®] ALLIANCE, 2015).

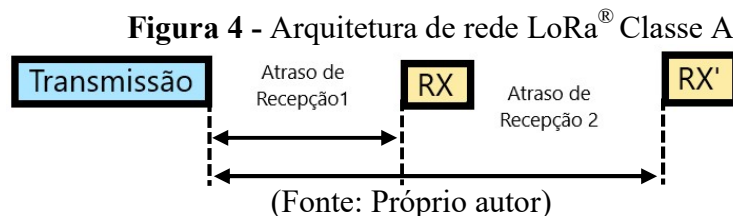
LoRaWAN[™]

A arquitetura de rede *LoRaWAN[™]* é implantada em uma topologia estrela na qual diversos *gateways* encaminham mensagens dos dispositivos finais para um servidor central da rede (WATTEYNE et al., 2017). Os *gateways* são conectados ao servidor de rede por meio de conexões IP padrão e atuam como uma ponte transparente, simplesmente convertendo pacotes RF em pacotes IP e vice-versa conforme Figura 3. A comunicação sem fio aproveita as características de Longo Alcance da camada física LoRa[®] permitindo um link de salto único entre o dispositivo final e um ou vários *gateways*. Todos os modos são capazes de comunicação bidirecional e há suporte para grupos de endereçamento *multicast* (método ou técnica de transmissão de um pacote de dados para múltiplos destinos ao mesmo tempo) para

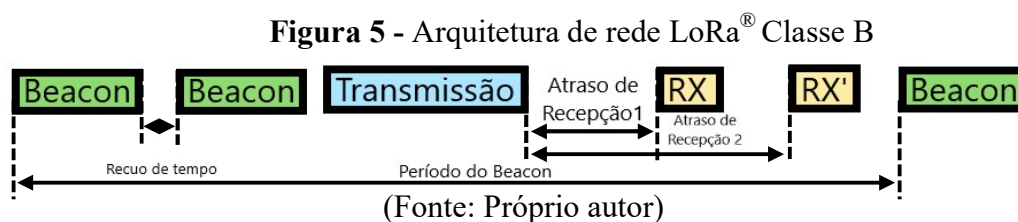
fazer uso eficiente do espectro durante tarefas como atualizações de Firmware *Over-The-Air* (FOTA) ou outras mensagens de distribuição em massa (LORA[®] ALLIANCE, 2015).

Os dispositivos LoRa[®] são categorizados por classe e são definidos em 3 tipos de dispositivos diferentes na rede LoRaWAN[™], separados em classes A, B e C.

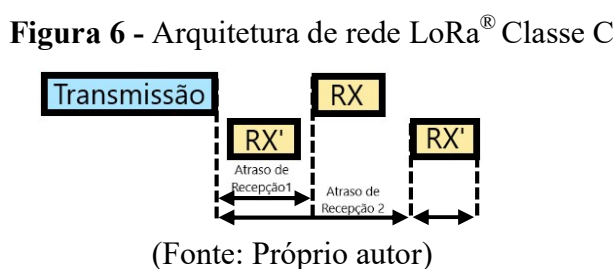
1. Classe A: tem como particularidade a espera de uma resposta de um período de aproximadamente 2s após o envio do dado. Essa classe é a que menos consome energia entre as outras classes, pois apenas recebe uma informação quando a mensagem chega com sucesso em um *gateway* (WATTEYNE et al., 2017). Demonstrado na Figura 4:



2. Classe B: tem a janela de recebimento de dados configurada, o dispositivo recebe um despertar do *gateway* em períodos pré-determinados configurados através de mensagens de *beacon* emitidas pelo *gateway*, desta forma há garantia de que o dispositivo está “ouvindo” (LORA[®] ALLIANCE, 2015). Demonstrado na Figura 5:



3. Classe C: tem o maior período de recepção dentre as classes de dispositivos, sua janela é contínua e é apenas fechada em caso de transmissão (LORA[®] ALLIANCE, 2015; LORA[®] ALLIANCE TECHNICAL COMMITTEE, 2017; WATTEYNE et al., 2017). Demonstrado na Figura 6:



Segurança de Rede

Proteger uma implantação de Internet das Coisas (IoT) e mantê-la segura e protegida não é apenas uma questão de escolher o protocolo certo, mas depende do processo de implementação e de adotar as práticas recomendadas e os padrões do setor.

O LoRaWAN[™] é projetado para ser muito seguro - autenticação e criptografia são, na verdade, obrigatórias - mas as redes e os dispositivos podem ser comprometidos se as chaves de segurança não forem mantidas seguras, não forem aleatórias entre os dispositivos ou se os números criptográficos usados uma vez forem reutilizados, como está sendo mostrado por

vários *posts* de blog. É por isso que é fundamental procurar dispositivos *LoRaWAN*TM Certificado para garantir que o dispositivo foi testado em relação ao padrão e funciona conforme o esperado. (LORA ALLIANCE[®] TECHNICAL COMMITTEE, 2015)

O *LoRaWAN*TM utiliza duas camadas de segurança, a primeira visa garantir autenticidade do nó na rede, a segunda garante que o operador da rede não tenha acesso aos dados do aplicativo do usuário final. Para isso utiliza-se encriptação do tipo AES3 (*advanced encryption standard*) em trocas de chave com identificador *IEEE EUI64* (formato de identificador exclusivo estendido de 64 bits). Existem compensações em cada escolha de tecnologia, exceto os recursos *LoRaWAN*TM na arquitetura de rede, classes de dispositivos, segurança, escalabilidade para capacidade e a otimização para mobilidade onde aborda a mais ampla variedade de aplicações de IoT em potencial. (LORA[®] ALLIANCE, 2015).

METODOLOGIA

A metodologia desse trabalho se divide em duas partes: uma parte prática e outra parte chamada de experimental onde foi configurado um hardware para ser comparado com o desempenho do simulador. Foi proposto como métrica a quantidade de pacotes perdidos no ambiente simulado e no ambiente real. Para isso foi considerada a intensidade de sinal recebido, distância, e a relação sinal-ruído.

Para o ambiente simulado foi utilizado o *NS3 (Network Simulator 3)* pois abrange o protocolo *LoRaWAN*TM e é atualmente o simulador de rede que está mais em evidência. Quanto ao ambiente real foi montada uma estrutura com um emissor e uma receptora utilizando placas *LoRa[®] Esp32* conforme demonstrado na Tabela 1. A seguir detalharemos os materiais que fizeram parte do ambiente real e o software utilizado para a simulação.

Tabela 1 - Equipamentos necessários para desenvolvimento do ambiente real.

Equipamento	Fabricante	Chip Base	Quantidade
Placa Lora Esp32 - Arduino	Heltec	Dual-core Tensilica LX6	2

(Fonte: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>)

Simulação

Conforme desenvolvedor (nsnam.org), o *NS-3* foi concebido para fornecer uma plataforma de simulação de rede extensível e aberta, para pesquisa de rede e educação (conforme licença pública GNU GPLv2 - <https://www.gnu.org/licenses/old-licenses/gpl-2.0.en.html>). O *NS-3* fornece modelos de como as redes de dados por pacote funcionam, e fornece uma simulação padrão para os usuários conduzirem experimentos de simulação. Algumas das razões para o uso de um simulador como o *NS-3* inclui a realização de estudos que são mais difíceis ou impossíveis de realizar em alguns ambientes reais, também para estudar o comportamento do sistema em um sistema altamente controlado, ambiente reproduzível e para aprendizagem. (NSNAM, REALEASENS-3-DEV, 2021).

O *NS-3* é construído como um sistema de bibliotecas de software que funcionam juntas. Os programas do usuário podem ser escritos vinculados (ou importados) a essas bibliotecas. Os programas do usuário são escritos nas linguagens de programação C++ ou *Python*.

É distribuído como código-fonte, o sistema de destino precisa ter um ambiente de desenvolvimento de software para construir primeiro as bibliotecas e, em seguida, construir o programa do usuário. Ele poderia, em princípio, ser distribuído como bibliotecas pré-construídas para sistemas selecionados e, no futuro, poderão ser distribuídos dessa forma, mas

no momento, muitos usuários realmente fazem seu trabalho editando o próprio *NS-3*, tendo assim o código-fonte ao redor para reconstruir as bibliotecas úteis para ele.

Todo o conjunto de bibliotecas *NS-3* disponíveis tem várias dependências de bibliotecas de terceiros, mas a maior parte do *NS-3* pode ser construída e usada com suporte para alguns componentes comuns (geralmente instalados por padrão): um compilador C ++, uma instalação do *Python*, um editor de código-fonte (como vim, emacs ou Eclipse) e, se estiver usando os repositórios de desenvolvimento, uma instalação do sistema de controle de código-fonte Git.

Na Figura 7 podemos verificar um exemplo de pacotes que podem oferecer suporte a opções comuns do *NS-3* e fornece os comandos usados para instalá-los para variantes comuns do Linux ou macOS.

Figura 7 - Imagem ilustrativa dos módulos *NS-3*.

```
Modules built:
antenna          aodv          applications
bridge           buildings      config-store
core             csma           csma-layout
dsvd            dsr           energy
fd-net-device    flow-monitor  internet
internet-apps    lr-wpan       lte
mesh            mobility      mpi
netanim (no Python) network      nix-vector-routing
olsr            point-to-point point-to-point-layout
propagation      sixlowpan     spectrum
stats           tap-bridge    test (no Python)
topology-read    traffic-control uan
virtual-net-device visualizer     wave
wifi            wimax

Modules not built (see ns-3 tutorial for explanation):
brite           click          openflow

Leaving directory ./ns-3.35
```

(Fonte: próprio autor)

Simulação *NS-3*

Com o auxílio de uma máquina virtual *Oracle* juntamente com o sistema Linux vinculado, foi possível fazer a instalação do simulador *NS-3* na máquina e assim iniciar a estruturação do programa a ser rodado no equipamento.

A simulação foi feita utilizando o conceito *Point To Point*, que segue o raciocínio de calcular o sinal entre dois ou mais pontos, utilizado as bibliotecas relacionadas a modulação e aplicações de um ponto ao outro (Figura 8).

Figura 8 - Bibliotecas utilizadas *NS-3*

```
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/point-to-point-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
```

(Fonte: Próprio autor)

Com essas bibliotecas disponíveis foi possível montar a programação na linguagem C++. Com as tentativas chegou-se a uma programação onde foi alcançado o valor em relação a potência do sinal com a distância e o tamanho do pacote em bytes, constatado na Figura 9.

Figura 9 - Parte importante do programa em C++

```
37 CommandLine cmd ( FILE );
38 cmd.Parse (argc, argv);
39
40 Time::SetResolution (Time::NS);
41 LogComponentEnable ("UdpEchoClientApplication", LOG_LEVEL_INFO);
42 LogComponentEnable ("UdpEchoServerApplication", LOG_LEVEL_INFO);
43
44 NodeContainer nodes;
45 nodes.Create (2);
46
47 pointToPoint.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("8Mbps"));
48 pointToPoint.SetChannelAttribute ("Delay", StringValue ("2ms"));
49 vector(31.66)
50
51 NetDeviceContainer devices;
52 devices = pointToPoint.Install (nodes);
53
54 InternetStackHelper stack;
55 stack.Install (nodes);
56
57 Ipv4AddressHelper address;
58 address.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");
59
60 Ipv4InterfaceContainer interfaces = address.Assign (devices);
61
62 UdpEchoServerHelper echoServer (9);
63
64 ApplicationContainer serverApps = echoServer.Install (nodes.Get (1));
65 serverApps.Start (Seconds (1.0));
66 serverApps.Stop (Seconds (10.0));
67
68 UdpEchoClientHelper echoClient (interfaces.GetAddress (1), 9);
69 echoClient.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (1));
70 echoClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (1.0)));
```

(Fonte: Próprio autor)

Primeiramente, na programação criamos os dois pontos necessários e a partir deles fomos criando suas características, o tamanho do pacote um *delay* em segundos, a distância (linha 49) era modificada a cada *endpoint* listado no trabalho. O endereço apresentado e utilizado foi da própria máquina e ali foi necessário fazer o *input* do *start* e *stop* do envio dos pacotes para os dois *nodes*, e assim foi como obtivemos os resultados e com eles foram feitas as comparações com os módulos reais.

Experimento prático

O experimento prático foi estabelecido no formato ponto a ponto sendo adquirido 2 (dois) módulos LoRa[®] da Heltec e realizado a configuração sendo 1 (um) *sender* e 1 (um) *receiver*.

Hardware dos módulos Esp32 LoRa[®]

Conforme especificação do fabricante Heltec (<https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>) o módulo ESP32 LoRa[®] com Oled 0,96", é uma placa compacta e conta com: Bluetooth V4.2BR/EDR/LE, WiFi 802.11b/g/n e Lora[®]. Além da conectividade, esse módulo também embarca um display Oled 0,96", uma antena SMA e uma conexão para bateria (mini-JST 2 vias). Ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Imagem ilustrativa do módulo ESP32 LoRa.



(Fonte: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>)

O Módulo ESP32 é um módulo de alto desempenho e baixo consumo de energia ideal para aplicações IoT. Utiliza-se LUA ou a IDE do Arduíno com um cabo micro-usb para programação. A vantagem da utilização deste módulo está no visor onde pode-se programar a visualização do envio e recebimento de pacotes de dados no próprio módulo, não dependendo de programas ou equipamentos externos para isso. Segue algumas especificações do módulo ESP32 LoRa[®] conforme Tabela 2:

Tabela 2- Especificação Técnica do módulo Esp32 da *Heltec*.

Recurso	Parâmetro
Frequência de atuação	Estabelecido 915Mhz (Programável de 433 a 923Mhz)
LoRa [®] Chip Base	Dual-core Tensilica LX6
Consumo de energia em modo <i>Sleep</i>	<i>Deep Sleep</i> - 4mW
Consumo de energia em funcionamento	LoRa [®] 10db output - 250mW
Temperatura de Trabalho	-40° ~80°C

(Fonte: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>)

As configurações a serem realizadas na Placa LoRa[®] Esp32 da *Heltec* baseiam-se na frequência da portadora e largura de banda. A frequência do módulo LoRa[®] Esp32 da *Heltec* adquirido será utilizado na faixa 915MHz. Quanto a largura de banda consiste em uma configuração estabelecida em âmbito regional e é definida na tabela 3.

Tabela 3 - Taxa de transmissão teórica em função do fator de espalhamento.

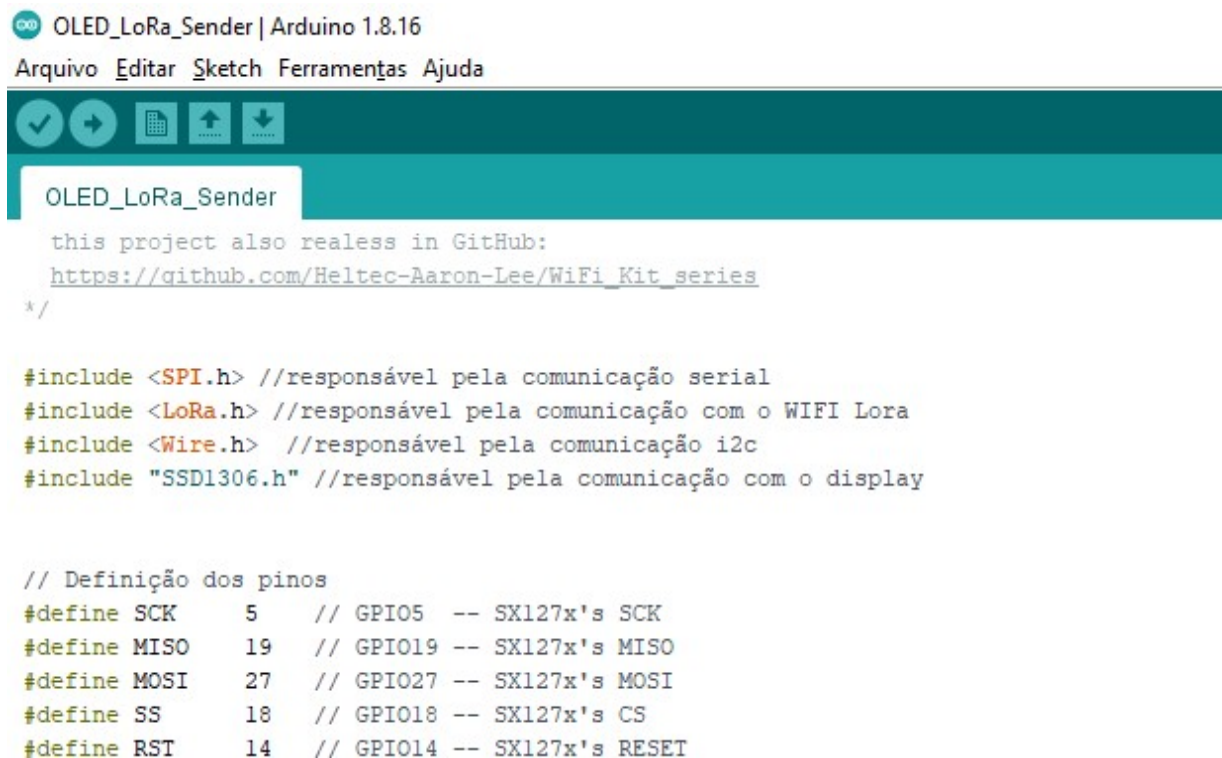
Fator de Espalhamento	Largura de Banda [kHz]	Taxa de bits [bit/sec]
SF12	500	980
SF11	500	1760
SF10	500	3900
SF09	500	7000
SF08	500	12500
SF07	500	21900

(Fonte: *RP002-I.0.3 LoRaWAN[™] Regional Parameters. Table 41: AU915-928 Data Rate table*)

Programação dos módulos Esp32 LoRa®

Os módulos Esp32 LoRa® da *Heltec* são programáveis por código Arduino. Foi utilizado um programa de teste contido no próprio programa Arduino versão 1.8.16, ilustrado na Figura 11, para a programação dos 2 (dois) módulos sendo 1 (um) para *sender* e 1 (um) para *receiver*. Consideramos apenas a configuração padrão com largura de banda 500KHz conforme Tabela 03, que vem configurado com os módulos Esp32 da *Heltec*, desta forma não é preciso configurá-los.

Figura 11 - Imagem ilustrativa do programa Arduino 1.8.16



```
OLED_LoRa_Sender

this project also realness in GitHub:
https://github.com/Heltec-Aaron-Lee/WiFi\_Kit\_series
*/

#include <SPI.h> //responsável pela comunicação serial
#include <LoRa.h> //responsável pela comunicação com o WIFI Lora
#include <Wire.h> //responsável pela comunicação i2c
#include "SSD1306.h" //responsável pela comunicação com o display

// Definição dos pinos
#define SCK      5    // GPIO5  -- SX127x's SCK
#define MISO     19   // GPIO19 -- SX127x's MISO
#define MOSI     27   // GPIO27 -- SX127x's MOSI
#define SS       18   // GPIO18 -- SX127x's CS
#define RST      14   // GPIO14 -- SX127x's RESET
```

(Fonte: Próprio autor)

Localização dos experimentos

A localização dos experimentos em ambiente real se deu na cidade de Campinas-SP, foi utilizado a Unidade São Francisco (USF) para a realização dos experimentos, a porta de entrada da Universidade no andar superior foi dada como sendo o ponto de referência e onde foi localizado o *gateway*. Conforme figura 10 pudemos realizar testes em 5 (cinco) distâncias distintas ao *gateway*, sendo 4 (quatro) posições internamente na Universidade e 1 (um) ponto externo. Conforme proposta inicial foi considerado 1 (um) módulo como sendo *endpoint* e 1 (um) como sendo *gateway*.

Figura 12 - Posicionamento do gateway e endpoint's do 1 ao 4



(Fonte: Google Maps)

Legenda da figura 10

End Point 1: Pátio da fonte da Universidade - 31,66m

End Point 2: Entrada do Laboratório de Eletrônica - 61,20m

End Point 3: Lanchonete - 118,32m

End Point 4: Gruta na cabeceira da quadra - 170,47m

Figura 13 - Posicionamento do gateway e endpoint 5.



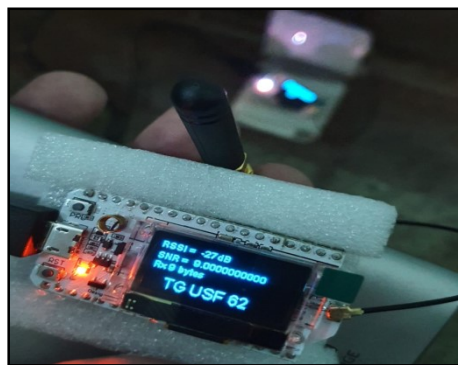
(Fonte: Google Maps)

Conforme Figuras 12 e 13, foi utilizado simulação em 5 posições distintas ao *gateway*, sendo o ponto de referência na Universidade São Francisco no piso superior à porta de entrada, onde fica o *gateway*. O *endpoint* 1 (um) foi posicionado a 31,66m aproximadamente de distância localizado no pátio da fonte, o *endpoint* 2 (dois) aproximadamente 61,20m de distância no laboratório de eletrônica, o *endpoint* 3 (três) aproximadamente 118,32m de distância localizado na lanchonete, o *endpoint* 4 (quatro) aproximadamente 180,47m de distância localizado na gruta na cabeceira da quadra e o *endpoint* 5 (cinco) aproximadamente 1090m de distância localizado no bairro Jd. São Pedro. Em todas as posições não temos a visada livre, contudo, o ponto de referência (*gateway*) encontra-se numa altura de elevação superior aos *endpoints* 1 ao 4. Diferentemente de outros artigos estudados, buscamos não ter a visada livre, temos como objetivo simular um ambiente urbano real, onde há barreiras em que os sinais devem encontrar no cotidiano.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos da análise da comunicação entre os módulos *sender* e *receiver* LoRa®. São apresentados resultados mostrando os dados na unidade *receiver* conforme mostrado na Figura 14, sendo potência de sinal, relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise-Ratio* - SNR) e perda de pacote, pois são informações onde os dados são coletados continuamente provendo estabilidade em cada *endpoint* para a composição do resultado. Os resultados são comparados com a simulação realizada através do software de simulação de redes NS-3. Devemos considerar que estamos utilizando todo material original do fabricante incluindo a antena SMA. Também será apresentado o resultado realizado na simulação do NS-3 e discutido a comparação do experimento prático e a simulação.

Figura 14 - Ilustração do experimento realizado



(Fonte: Próprio autor)

Conforme tabela 4 temos os dados medidos durante o experimento realizado, potência do sinal, relação sinal x ruído e perda de pacote. Consta todos os *endpoint's* incluindo a posição 0.

Tabela 4- Resultados encontrados no experimento realizado

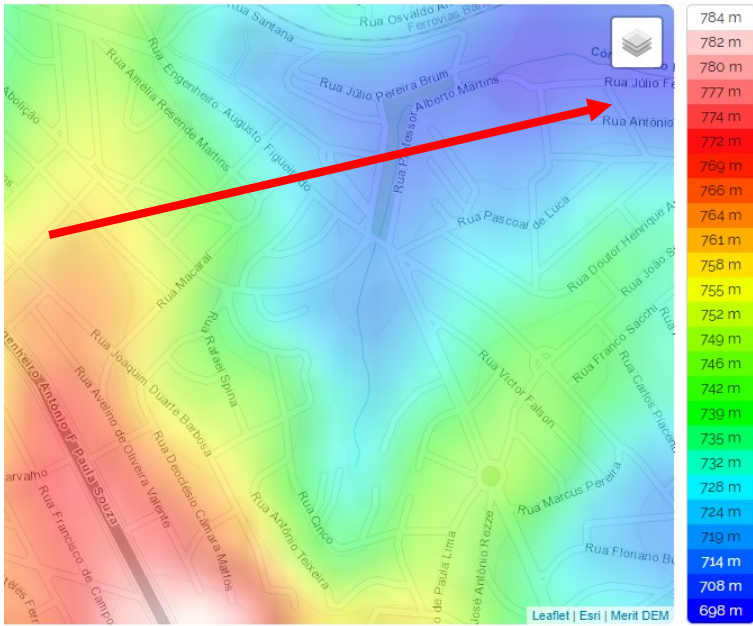
End Point	Distância (m)	Potência do sinal (dBm)	SNR (dB)	Perda de pacote (%)
0	0	-27	9	0
1	31,66	-93	7	0
2	61,20	-104	5,5	0
3	118,32	-115	-2	0
4	170,47	-111	3,5	0
5	500,00	-122	-8,75	0

(Fonte: Próprio autor)

No *endpoint* 1, na fonte do pátio, com distância aproximada de 31,66m foi registrado perda de potência de -66dbm registrando -93dbm e relação sinal ruído em 7db. No *endpoint*2, em frente ao laboratório de eletrônica, com distância aproximada de 61,20m a potência do sinal diminuiu mais -11dbm registrando -104dbm e relação sinal ruído em 5.5dB. No *endpoint* 3, na lanchonete, com distância aproximada de 118,32m a potência do sinal registrou -115dbm tendo mais uma queda sendo também de -11dbm em relação ao *endpoint* 2e relação sinal ruído de -2db. No *endpoint*4, na gruta, com distância aproximada de 170,47m a potência do sinal registrou -111dbm, neste caso podemos observar um ganho em relação ao endpoint 3 de 4dbm e relação sinal ruído de 5,2dB.

Quanto ao *endpoint* 5 não foi possível atingir a visada de comunicação esperada, o *endpoint* se encontra em um local de sombra como demonstrado na Figura 15 com uma diferença de relevo de 50 metros e a comunicação foi interrompida. Desta forma foi aplicado deslocamento do *endpoint* até que fosse estabelecida a comunicação novamente entre os módulos, o que aconteceu a aproximadamente 500m de distância em relação ao *gateway*. Sendo assim foi conseguido uma medição de -122dbm e relação sinal ruído de -8.7db.

Figura 15 - Mapa de relevo



(Fonte: <https://pt-br.topographic-map.com/maps/gn3q/Campinas/>)

Potência do sinal

As medições realizadas de potência do sinal foram obtidas sem utilizar um instrumento de medição externo, mas sim utilizando o próprio módulo Esp32 da *Heltec* e apresentado no display. O comportamento no experimento prático foi o esperado como demonstrado no Gráfico 1. Conforme o aumento da distância entre os módulos a potência do sinal vai tendo uma perda gradativa. Podemos observar no *endpoint* 4 um aumento na potência de 3dbm contudo devido à variação do ambiente onde foram realizadas as medições.

Na simulação os resultados foram muito parecidos aos do experimento prático, a maior diferença ficou por conta do *endpoint* 5 onde na simulação foi possível considerar este ponto pois não há configuração de local de sombra para poder emparelhar com o experimento prático, contudo consideramos o ponto medido no experimento prático na distância de 500m.

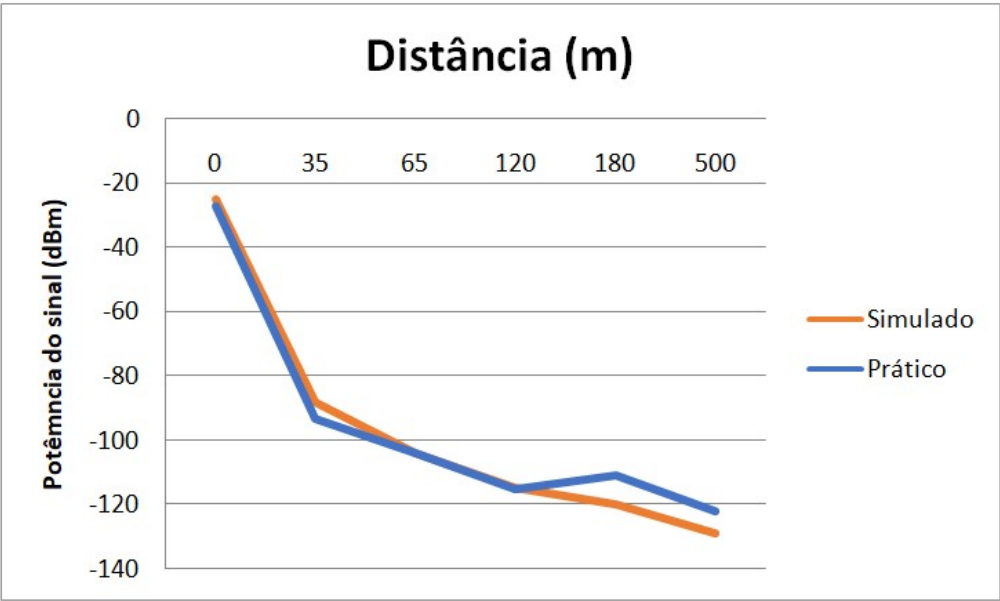
No Gráfico 1 podemos verificar a perda de potência de sinal simulado de modo a confirmar os resultados do experimento prático onde obtivemos pouca diferença.

Tabela 5 - Relação potência x distância -prático x simulado

End Point	Distância (m)	Potência do sinal (dBm) Experimento	Potência do sinal (dBm) Simulado	Variação (dBm)
0	0	-27	-25	2
1	31,66	-93	-88	5
2	61,2	-104	-104	0
3	118,32	-115	-115	0
4	170,47	-111	-120	9
5	500	-122	-129	7

(Fonte: Próprio autor)

Gráfico 1- Relação potência x distância -prático x simulado



(Fonte: Próprio autor)

Relação sinal-ruído (SNR)

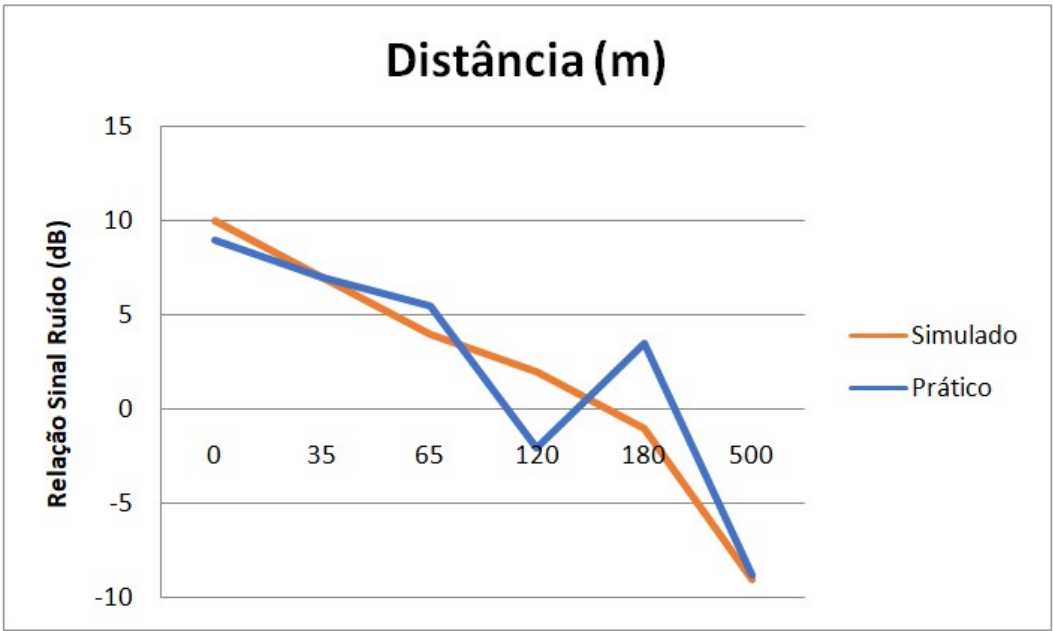
A relação sinal-ruído (SNR) é um parâmetro importante para entender a qualidade de sinal, desta forma é possível verificar quanto o sinal está bom. Podemos observar no *endpoint* 4 (~170m) a relação sinal-ruído melhor que o *endpoint* 3 conforme demonstrado no Gráfico 2, visualizamos que a relação SNR está proporcionalmente relacionada à potência de sinal, onde obtivemos aumento na potência do *endpoint* 4 em 3 dBm em relação ao *endpoint* 3 conforme Tabela 6. Quanto ao *endpoint* 5 a distância mais elevada e potência menor proporcionou uma SNR menor, porém uma queda mais abrupta, demonstrando que quanto maior a distância e menor a potência a qualidade de sinal diminui bastante. Quanto a simulação do SNR no simulador não existe parâmetro suficiente para que seja configurado desta forma foi apresentado apenas dados do experimento prático.

Tabela 6 - Relação sinal x ruído - prático x simulado

End Point	Distância (m)	Relação sinal x ruído (dB) Experimento	Relação sinal x ruído (dB) Simulado	Variação (dB)
0	0	9	10	1
1	31,66	7	7	0
2	61,2	5,5	4	1,5
3	118,32	-2	2	4
4	170,47	3,5	-1	4,5
5	500	-8,75	-9	0,25

(Fonte: Próprio autor)

Gráfico 2- Relação sinal x ruído-prático x simulado



(Fonte: Próprio autor)

Taxa de perda de pacote

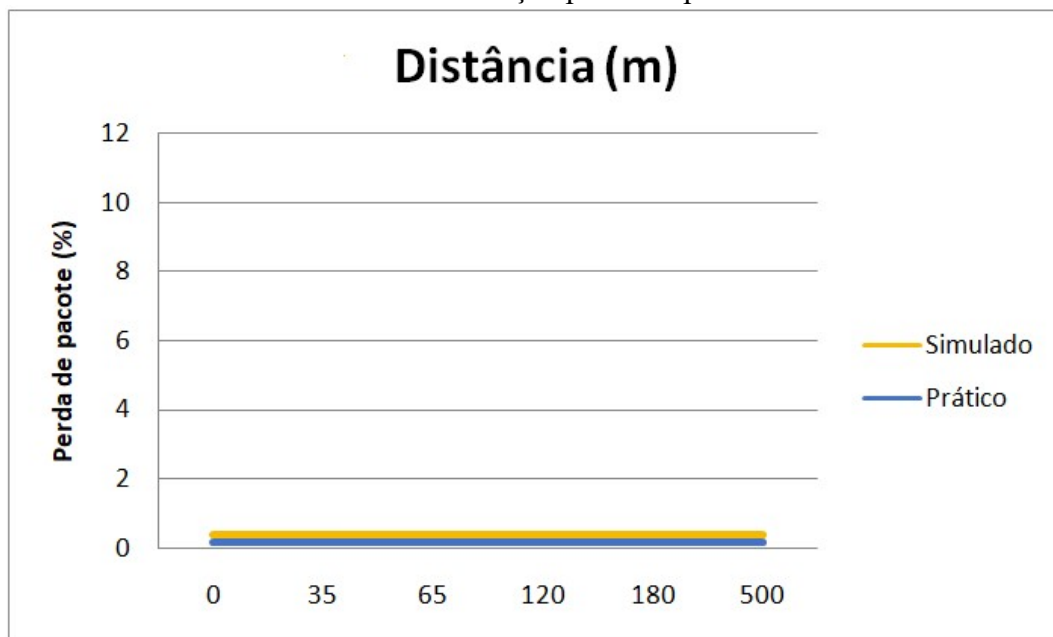
A taxa de perda de pacote para o experimento prático realizado manteve-se constante e estável durante todo o tempo. O mesmo resultado foi obtido através da simulação conforme Tabela 7. As distâncias verificadas e relação sinal ruído fizeram com que mantivesse 0% de perda de pacotes como visualizado no Gráfico 3.

Tabela 7 - Taxa de perda de pacote - prático x simulado

End Point	Distância (m)	Perda de Pacote (%) Experimento	Perda de pacote (%)Simulado	Variação (%)
0	0	0	0	0
1	31,66	0	0	0
2	61,2	0	0	0
3	118,32	0	0	0
4	170,47	0	0	0
5	500	0	0	0

(Fonte: Próprio autor)

Gráfico 3- Relação perda de pacote



(Fonte: Próprio autor)

CONCLUSÕES

Esse projeto se propôs a realizar o comparativo do simulador *NS-3* com experimento prático para demonstrar o desempenho do simulador. Com os desfechos obtidos podemos concluir que o resultado do simulador se aproxima muito com o experimento prático,

deduzindo que o *NS-3* é um simulador válido e seguro para utilizar em pequenos e grandes projetos. É fundamental uma base de conhecimento de nível intermediário á avançado em programação C++, Python e no próprio sistema Linux.

O *endpoint 5* perdeu a comunicação devido a diferença de relevo em relação ao *gateway*, o *endpoint* então foi deslocado até que a comunicação fosse retomada. O simulador não conseguiu identificar esta diferença. O simulador segue sendo atualizado de tempos em tempos, podendo assim no futuro melhorar ainda mais seus parâmetros e eficácia nas simulações realizadas.

Como trabalho futuro será feito refinamento de todo espectro disponível para a rede LoRa® e classe de dispositivos para poder entender e direcionar a melhor solução para cada tipo de ambiente disponível. Também realizar comparativo com outras soluções para redes IoTe agregar maior capacidade de comunicação a fim de melhorar a qualidade e o alcance dos dispositivos de forma a cobrir toda necessidade que qualquer ambiente possa requerer.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANATEL. **Agência Nacional de Telecomunicações**, 2016. Plano de atribuição, destinação e distribuição de frequências no Brasil (PDF). Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2019/1351-resolucao-716>. Acesso em: 20, mai. 2021.

GEORGE, M. **Protocolo de comunicação de topologia MESH utilizando radio frequência por modulação Lora**. 2019. 75 f. Dissertação de Graduação em Engenharia de Controle e Automação - Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2019.

KHUTSOANE, O *et al.* **IoT Devices and Applications based on LoRa/LoRaWAN**, 2017.

KUBES, S (2021, 25 mai.). **LoraWAN driving IoT growth across Brazil in all markets [Webinar]**. LoRa® Alliance. <https://event.on24.com/wcc/r/3150413/F32190E609932485ADD978CF8E5224A6?mode=logi n&email=mvfiorava@gmail.com>.

LIMA, E. F. **Fundamentos de Redes e Cabeamento Estruturado**. 1ed. 2015. 188p.

LLUETH, K. State of the IoT 2018: Number of IoT devices now at 7B – Market accelerating. **Iot Analytics**, 2018. Disponível em: <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/>. Acesso em: 15 abr. 2021.

LORAWAN. **LoRaWAN™ Alliance**, 2015. Explore IoT applications and use cases all over the world. Disponível em: <https://lora-alliance.org/>. Acesso em: 17, mai. 2021.

MICHEL, J. **Redes LoRaWAN: implantação e desenvolvimento de aplicações**. 2017. 67 f. Dissertação de Graduação em Engenharia de Telecomunicações - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, São José, 2017.

NETWORK. **The things network**, 2019. Building a global open LoRaWAN™ network. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>. Acesso em: 20, mai. 2021.

PASSOLINI, G *et al.* **Smart City Pilot Projects Using LoRa® and IEEE802.15.4 Technologies**, 2018.

PEREIRA, P. **Desenvolvimento de dispositivo de sensoriamento para cidades inteligentes usando o padrão LoRaWAN**. 2019. 72 f. Dissertação de Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.