

Análise de Desempenho de Gateway LoRa/LoRaWAN com Dispositivos IoT no SmartCampus

Helder Betiol

Juliana Freitag Borin

Technical Report - IC-19-07 - Relatório Técnico
July - 2019 - Julho

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO

The contents of this report are the sole responsibility of the authors.
O conteúdo deste relatório é de única responsabilidade dos autores.

Análise de Desempenho de Gateway LoRa e LoRaWAN com Dispositivos IoT no Smart Campus

Helder Betiol Juliana Freitag Borin^[1]

^[1]Instituto de Computação Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Caixa Postal 6176
13083-970 Campinas-SP, Brasil - juliana@ic.unicamp.br

Resumo

Este trabalho é parte do projeto Smart Campus desenvolvido pela Prefeitura Universitária em conjunto com pesquisadores da Unicamp que visa aplicar os conceitos de Internet das Coisas (*IoT, Internet of Things*) no campus universitário, conectando diversos dispositivos de usos e aplicações variadas à internet. Para atingir tal objetivo, este trabalho apresenta um estudo do desempenho da aplicação de um gateway LoRa e LoRaWAN como meio de conexão para estes dispositivos. A realização deste trabalho conta com suporte financeiro da empresa Konker.

Observa-se como resultado deste projeto a eficiência da tecnologia LoRa/LoRaWAN na conectividade de dispositivos IoT no Smart Campus, provendo, a partir de apenas um gateway, um raio de conexão superior a 2 km capaz de cobrir toda a área central do campus da Unicamp e prover múltiplas funcionalidades e aplicações.

Palavras-Chave: Internet das Coisas, Smart Campus, LoRa, LoRaWAN, LPWAN, Gateway.

1. Introdução

A Internet das Coisas (*IoT, Internet of Things*) é composta por objetos inteligentes com capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação, capazes de realizar tarefas, extrair dados e se comunicar com outros sistemas, aplicações e objetos, atuando de forma autônoma. Objetos inteligentes tem como característica a limitação em termos de processamento e energia, tornando a comunicação sem fio um grande desafio.

No contexto de campi e cidades inteligentes, IoT tem promovido a experimentação e análise de infraestruturas que permitam inovação e automação de sistemas essenciais ao cotidiano destes ambientes, como sistemas de mobilidade, energia e saúde.

Smart Campus – Unicamp¹ é um projeto desenvolvido pela Prefeitura Universitária da Unicamp para aplicar tecnologias de IoT no campus da Unicamp. É composto, neste momento, por projetos em diferentes áreas, como, por exemplo:

- Iluminação pública: instalação de sensores inteligentes nos postes de iluminação pública do campus que fornecem dados de funcionamentos das lâmpadas à área de saneamento e energia do campus.
- Coleta diferenciada: através de sensores e de uma rede de comunicação, dispositivos IoT medem o nível de pilhas e baterias nos coletores e enviam essa informação a área de Meio Ambiente que otimiza o planejamento da coleta destes materiais.
- *Smart Parking*: dispositivo IoT em desenvolvimento para verificar ocupação de estacionamento. O monitoramento é feito através de um dispositivo inteligente que contém uma câmera e usa uma técnica de aprendizado de máquina para identificar vagas desocupadas. Todo o processamento é realizado no dispositivo local que envia pela rede apenas a informação sobre a existência de vagas disponíveis.

Estes dispositivos enfrentam o desafio de conectar-se à internet com menor gasto energético e estando em regiões fora do alcance de redes tradicionais, como redes de celular e redes Wi-Fi. Embora redes celulares e redes locais sem fio Wi-Fi estejam amplamente difundidas em campi universitários e cidades, ainda há espaços onde este tipo de conectividade não está presente. No campus da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), por exemplo, há locais que estão fora da área de cobertura de redes celulares ou de Wi-Fi.

A comunicação via rede celular ou via Wi-Fi também pode ser inviável quando os dispositivos IoT possuem fontes de energia limitadas. Ambas as tecnologias de comunicação têm alto consumo de energia e, em dispositivos alimentados por baterias, por exemplo, esta é uma característica indesejada.

Tecnologias de comunicação sem fio de longo alcance e baixo consumo de energia (*Low-Power Wide-Area Network- LPWAN*) têm surgido recentemente para dar suporte aos requisitos de cenários da Internet das Coisas. LoRa é um exemplo deste tipo de tecnologia

¹ Smart Campus - Unicamp: <http://smartcampus.prefeitura.unicamp.br/>

que vem sendo desenvolvida de forma aberta pela LoRa Alliance² e pode ser utilizada para transmissão de dados por dispositivos em distâncias ordens de magnitude maiores que o Wi-Fi e com menor consumo energético. Uma antena LoRa com alcance de 2 Km teria capacidade de cobrir inteiramente o campus da Unicamp, da PUC e do CPqD, como mostrado na Figura 1.

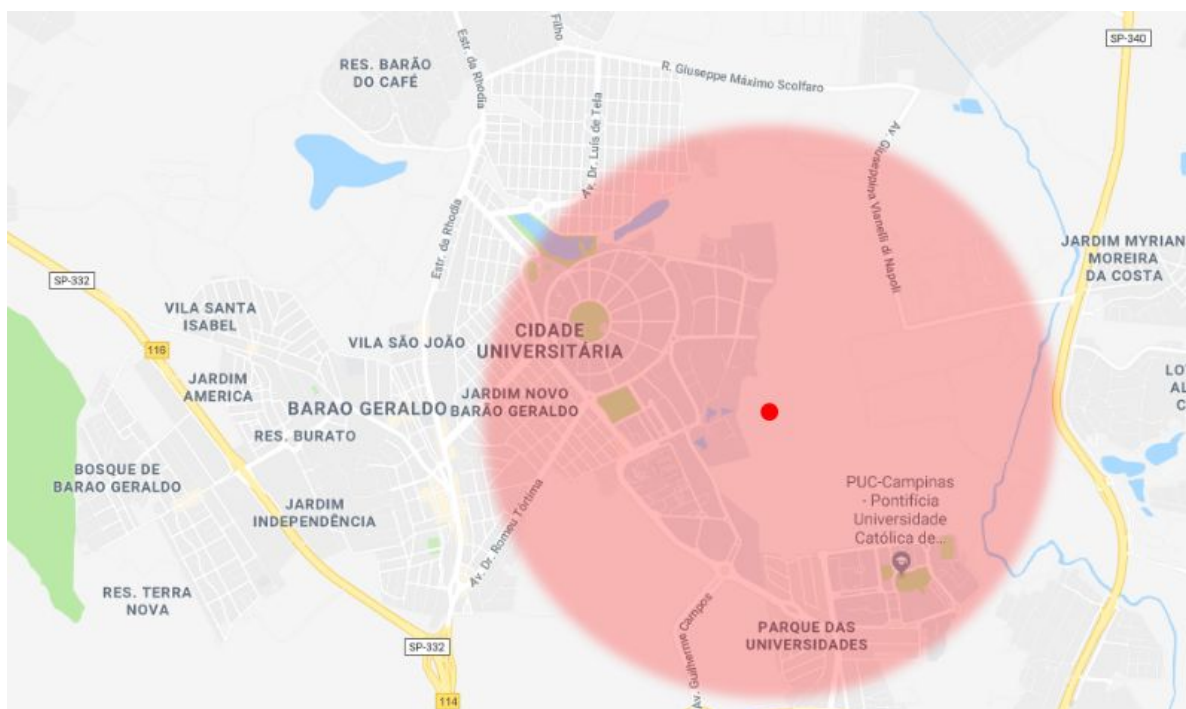


Figura 1. Simulação da cobertura de uma antena LoRa instalada entre os campi da Unicamp, PUC e CPqD.

Embora este tipo de tecnologia tenha vantagens com relação ao alcance e ao consumo energético, a taxa de transmissão é bastante reduzida quando comparada às tecnologias celulares e Wi-Fi, devendo ser ideal para aplicações que não demandem transmissão de grandes quantidades de dados.

Este trabalho apresenta uma avaliação de desempenho da tecnologia LoRa e LoRaWAN em cenários reais no campus da UNICAMP. A métrica considerada nesta avaliação foi o alcance do sinal, levando em consideração diferentes plataformas de hardware e diferentes configurações na camada física.

O restante deste documento descreve brevemente a tecnologia LoRa e a arquitetura de uma rede LoRaWAN, a metodologia de pesquisa utilizada, os resultados obtidos e as conclusões.

² LoRa Alliance: <https://loro-alliance.org/>

2. LoRa e LoRaWAN

LoRa (Long Range) é uma especificação proprietária para redes LPWAN que opera em frequências não licenciadas ISM (915 a 925 MHz no Brasil). Sua camada física é baseada em uma técnica de modulação de espalhamento espectral proprietária e desenvolvida pela Semtech³, uma variante do espalhamento espectral por chirp (Chirp Spread Spectrum – CSS). Nesta técnica, cada símbolo é enviado em um sinal de banda estreita propagada sobre uma banda de frequência mais ampla, com a mesma densidade de potência. Se a variação de frequência de um chirp ocorre de uma frequência mais baixa para uma mais alta, temos um *up-chirp*. No caso contrário, temos um *down-chirp*.

Um espectrograma da camada física LoRa consiste em 8 símbolos de preâmbulos, 2 símbolos de sincronização, payload e CRC opcional. A Figura 2 ilustra um espectrograma LoRa. Nela, observa-se: os 8 primeiros up-chirps são o preâmbulo para detectar chirps LoRa, os próximos 2 down-chirps são de sincronização temporal seguidos por 5 símbolos modulados de *payload*. LoRa substitui um bit por múltiplos chirps de informação. Os múltiplos chirps de informação precisam ser transmitidos tão rápido quanto a taxa de bits original [1][2][3].

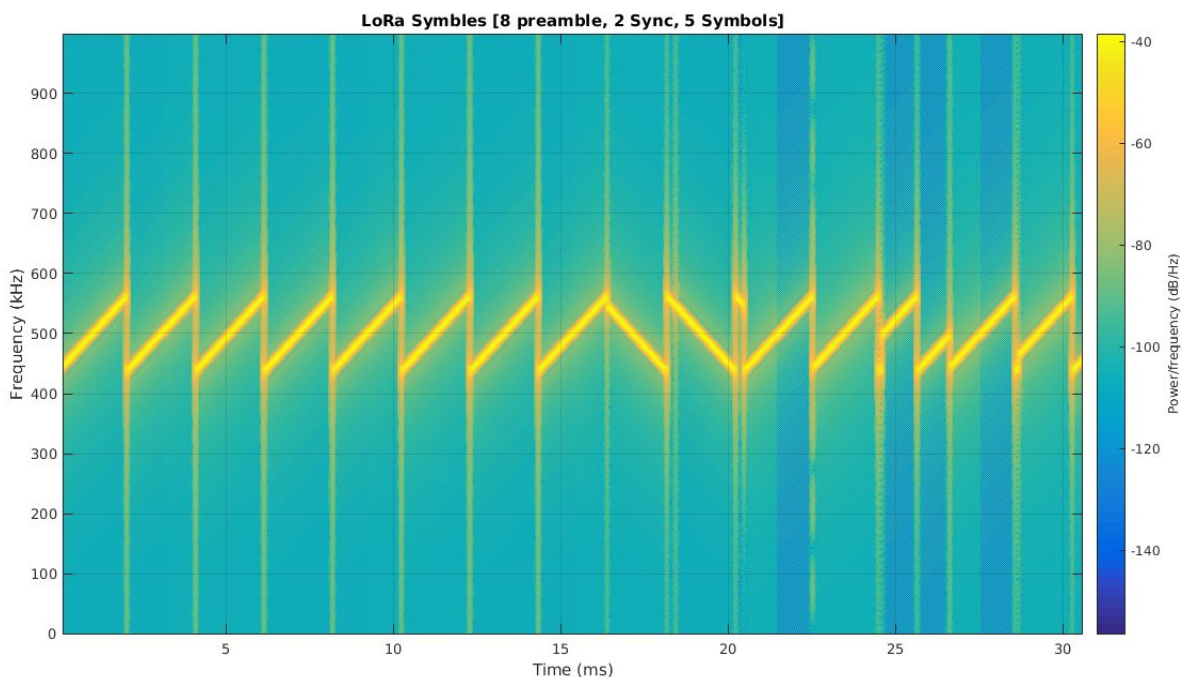


Figura 2. Ilustração de espectrograma da camada física LoRa de rede LoRaWAN [3].

LoRaWAN é o protocolo que define a arquitetura do sistema e parâmetros de comunicação e de acesso ao meio (MAC – Medium Access Control) que utiliza a camada física LoRa. Sua arquitetura de rede está ilustrada na Figura 3.

³ Semtech: <https://www.semtech.com/>

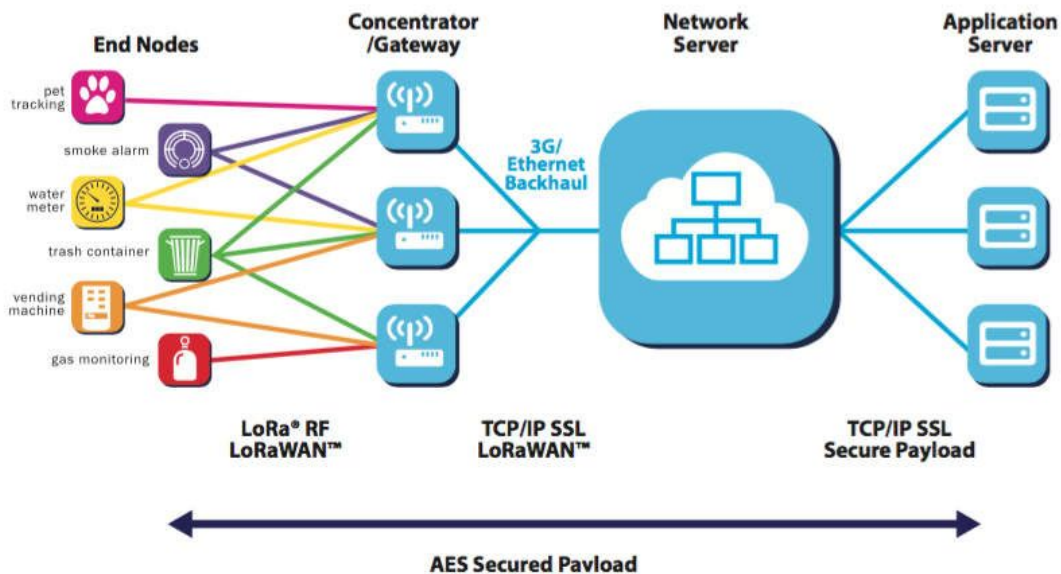


Figura 3. Ilustração de arquitetura de rede LoRaWAN [1].

A rede LoRaWAN é composta por três tipos de dispositivos: terminais, gateways e servidores. Os dispositivos terminais são objetos inteligentes, porém, tipicamente, com restrições energéticas. Podem ser sensores, atuadores ou outros tipos de dispositivos inteligentes. Os gateways são dispositivos com restrições mais leves em termos de energia e processamento, que servem de ligação entre o LoRaWAN e o servidor. Os servidores são dispositivos que recebem e analisam as informações enviadas pelos dispositivos terminais ou que comandam os dispositivos terminais [1].

Network server é o nome dado ao servidor na rede LoRaWAN cuja função é manipular os quadros de uplink recebidos dos gateways, tratando a camada MAC e agendando transmissões de downlink, e tratar duplicação de pacotes provenientes dos gateways, ou seja, pacotes originalmente enviados pelo mesmo terminal e repassados por mais de um gateway.

Application server é o servidor de aplicações da rede LoRaWAN, sendo responsável pelo inventário de terminais, gerenciando-os e tratando o *payload* de suas mensagens, incluindo encriptação e decríptação.

2.1. Parâmetros de Configuração LoRa

Os parâmetros de configuração da camada física do LoRa definem a comunicação entre os terminais e o gateway, influenciando diretamente no alcance máximo, consumo de energia, taxa de transmissão e resistência à interferências e ruídos.

O primeiro deles é a frequência da portadora. No Brasil, é definida a faixa de 915 a 928 MHz, sendo não ajustável. A largura de banda, por outro lado, possui três larguras programáveis: 125, 250 e 500 kHz. Quanto maior a largura de banda, maior a capacidade de

transmissão de dados por aumentar o número de sinais ortogonais, porém, com menor sensibilidade, sendo mais vulnerável a ruídos.

Outro parâmetro é a taxa de código (*CR*, *Code Rate*) que pode assumir quatro valores: 5, 6, 7 e 8. *CR* está diretamente relacionado à técnica *FEC* (*Forward Error Correction*). Define quantos bits são utilizados para dados de redundância na mensagem. Um *CR* maior provê maior capacidade de recuperação de dados em caso de erro, porém, incrementa o tempo de transmissão no ar (*time on air*).

O fator de espalhamento (*SF*, *Spreading Factor*) é definido em um destes seis valores: 7, 8, 9, 10, 11 ou 12. Quanto maior, maior a energia por bit transmitido, possibilitando maior alcance entre receptor e transmissor, mas reduzindo a taxa de transmissão de bits por segundo [2]. Além disso, o tempo de transmissão também aumenta com o aumento do *SF*, como ilustra o espectrograma da Figura 4, onde cada up-chirp da esquerda para a direita representa um chirp enviado com *SF* 7 até *SF* 12.

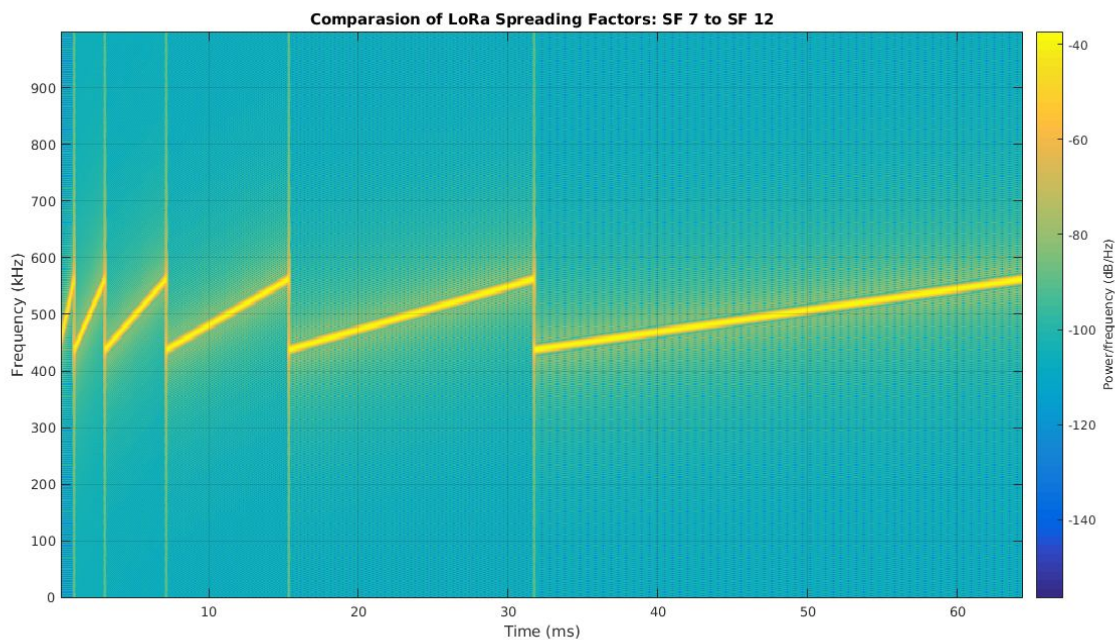


Figura 4. Ilustração de espectrograma LoRa variando os fatores de espalhamento [3].

2.2. Parâmetros de Configuração LoRaWAN

Além de todos os parâmetros LoRa descritos no tópico anterior, para utilização de terminais e gateways em uma rede LoRaWAN é necessário a aplicação de configuração específicas da rede que não possui relação com a camada física.

Para o gateway se comunicar com o servidor é exigida uma identificação única (gateway ID) que deve estar contida em todo pacote enviado ao servidor.

Para o terminal, a configuração varia segundo seu método de ativação. Existem dois modos de ativação de um terminal em uma rede LoRaWAN: OTAA (*Over The Air*

Activation) e ABP (*Activation By Personalization*). Em OTAA, há um procedimento de *join* a ser realizado pelo terminal no início da comunicação com o servidor. Neste procedimento, ocorre a negociação de chaves de segurança e a atribuição de uma identificação única a ele (*device address*).

Em ABP, as chaves de segurança (AppSKey, Application Session Key, e NwkSKey, Network Session Key) são geradas pelo servidor e fornecidas previamente ao terminal. A identificação do terminal (DevAddr, *device address*) também é definida previamente entre ambos. Assim, ao iniciar o envio de pacotes, não há um procedimento de *join* e as devidas chaves e identificação já entram em uso.

2.3. Parâmetros Regionais para LoRaWAN (AU915-928)

Está definido para o Brasil pelos órgãos governamentais competentes a utilização da banda não licenciada de frequências que se estende de 915 a 928 MHz para LoRa e LoRaWAN em território nacional. Assim, aplica-se os parâmetros regionais de LoRaWAN estabelecidos pela LoRa Alliance na banda AU915-928 MHz, sendo "AU" uma sigla representativa de Austrália, o primeiro país a utilizar oficialmente esta banda.

Para esta banda, a versão 1.1 de LoRaWAN [4] utilizada neste projeto tem definido:

- Upstream: 64 canais numerados de 0 a 63 utilizando largura de banda (BW) 125 MHz, com Data Rate (DR) variando de DR0 a DR5, com code rate (CR) $\frac{4}{5}$, começando em 915,2 MHz e incrementando linearmente em 200 kHz até 927,8 MHz.
- Upstream: 8 canais numerados de 64 a 71 utilizando BW 500 kHz e DR6, iniciando em 915,9 MHz e incrementando linearmente em 1,6 MHz até 927,1 MHz.
- Downstream: 8 canais numerados de 0 a 7 utilizando BW 500 kHz, com DR8 a DR 13, iniciando em 923,3 MHz e incrementando linearmente em 600 kHz até 927,5 MHz.

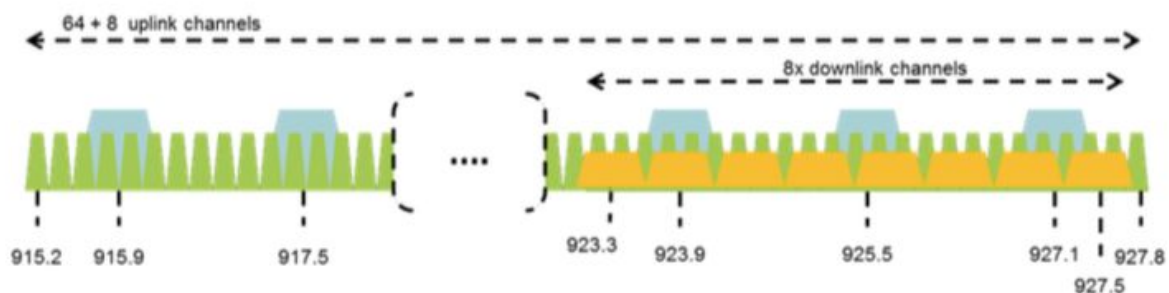


Figura 5. Frequências dos canais para AU915-928 [4].

Data Rate é uma definição de configuração de propriedade do canal onde combina-se um valor de fator de espalhamento com um valor de largura de banda. Esta combinação resulta em uma vazão específica de dados, ou seja, a quantidade de bits que podem ser enviados em um segundo. A Tabela 1 apresenta suas definições para AU915-928 MHz.

DataRate	Configuration	Indicative physical bit rate [bit/sec]
0	LoRa: SF12 / 125 kHz	250
1	LoRa: SF11 / 125 kHz	440
2	LoRa: SF10 / 125 kHz	980
3	LoRa: SF9 / 125 kHz	1760
4	LoRa: SF8 / 125 kHz	3125
5	LoRa: SF7 / 125 kHz	5470
6	LoRa: SF8 / 500 kHz	12500
7	RFU	
8	LoRa: SF12 / 500 kHz	980
9	LoRa: SF11 / 500 kHz	1760
10	LoRa: SF10 / 500 kHz	3900
11	LoRa: SF9 / 500 kHz	7000
12	LoRa: SF8 / 500 kHz	12500
13	LoRa: SF7 / 500 kHz	21900
14	RFU	
15	Defined in LoRaWAN	

Tabela 1. Valores de SF e BW associado a cada DR e vazão bit/s correspondente [4].

3. Testes de Desempenho LoRa

3.1 Metodologia

3.1.1 Seleção e Configuração de Componentes de Hardware e Software

Para o desenvolvimento do projeto, foi necessário a montagem de terminais e de gateways preparados para o uso da tecnologia LoRa. Após pesquisas de componentes disponíveis no mercado, optou-se, como primeira opção, pelo uso de Arduinos juntamente com Shield LoRa da empresa chinesa Dragino para a construção dos terminais e um gateway LoRa também da Dragino. Estes componentes foram adquiridos juntamente com o kit de desenvolvimento LoRa da Dragino (Dragino LoRa IoT Development Kit⁴), que possui um custo de 159 dólares. Este kit contém:

- 1 Gateway LoRa Dragino LG01-P;
- 1 LoRa Shield e 1 LoRa Shield com GPS;
- 2 Arduinos UNO;
- 4 sensores diferentes, 1 relay e 1 buzzer;
- 3 antenas monopolo;
- 60 cabos (dupont wire) para conexões entre as placas.

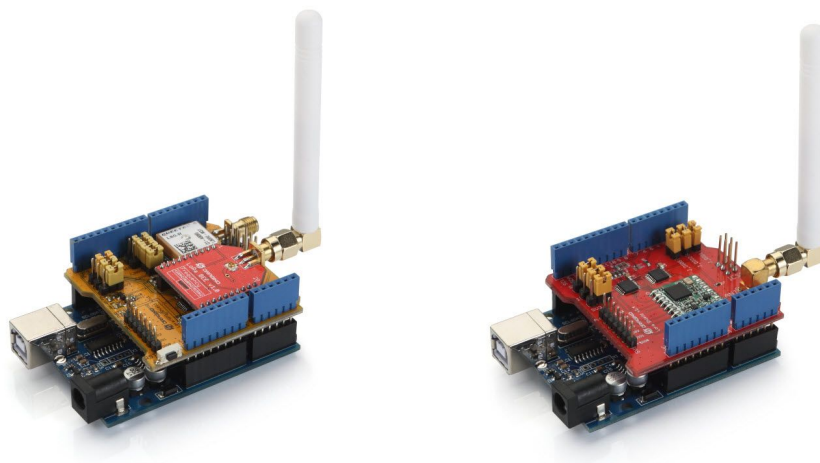


Figura 6. À esquerda (a), o Arduino UNO conectado ao Shield com LoRa e GPS da Dragino com a antena. À direita (b), o Arduino UNO conectado ao Shield LoRa com a antena.

⁴ Dragino LoRa IoT Development Kit:
<http://www.dragino.com/products/lora/item/120-lora-iot-kit.html>

A Figura 6 apresenta os dois terminais usados nos testes. O terminal (a) possui funcionalidade GPS e foi programado para enviar periodicamente através de LoRa suas coordenadas GPS ao gateway. O terminal (b) foi conectado ao sensor de umidade e temperatura e programado para enviar os valores lidos por este ao gateway. A programação foi feita através da Arduino IDE.

O gateway da Dragino utiliza código totalmente aberto (*open source*) com sistema baseado no OpenWrt. É composto por um microcontrolador ATmega 328P, programável com a Arduino IDE, associado a um chip LoRa SX2176, e um microprocessador Atheros AR9331 400MHz, onde a distribuição Linux roda. A Figura 7 apresenta uma imagem ilustrativa do gateway (a) e um diagrama simplificado de sua arquitetura (b) [5].

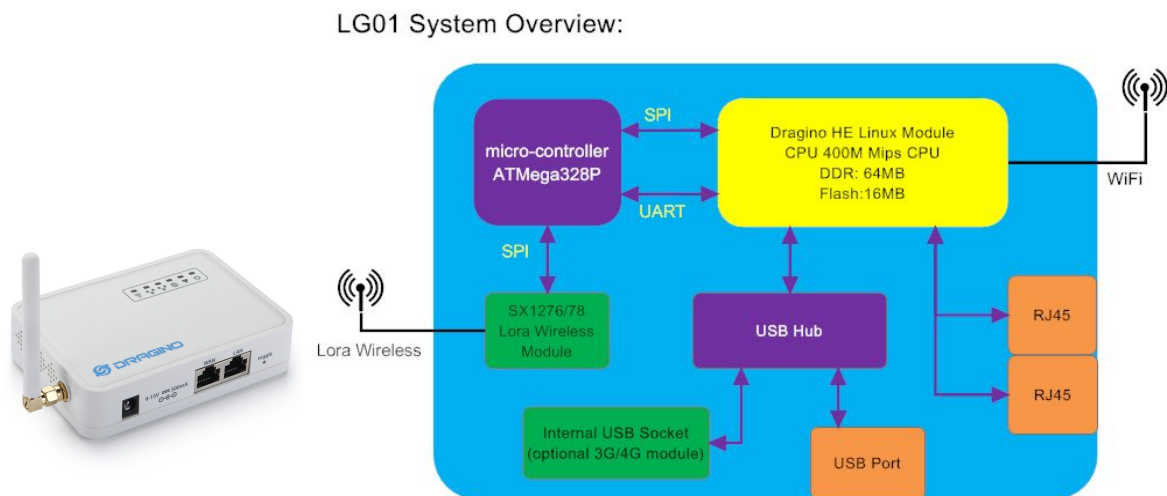


Figura 7. À esquerda (a), o gateway Dragino LG-01P. À direita (b), um diagrama da arquitetura deste gateway.

Como segunda opção, construiu-se um gateway a partir de um Raspberry Pi 3 Model B juntamente com transceiver LoRa RFM95W da Adafruit⁵ adquirido por 22 dólares. Conectou-se o chip da Adafruit ao Raspberry Pi através de sua interface GPIO, conectando os pinos SPI (MOSI, MISO, CLK, CS) correspondentes [6]. Usando um conector *panel-edge SMA*, conectou-se a mesma antena usada no gateway Dragino ao chip da Adafruit [7]. Para software, usou-se como base o código *open source* do projeto Waziup⁶, que usa a distribuição Linux Raspbian OS.

⁵ Adafruit RFM95W LoRa Radio Transceiver: <https://www.adafruit.com/product/3072>

⁶ Waziup: <https://www.waziup.eu/>

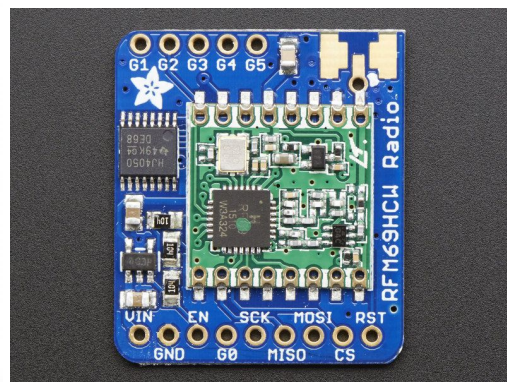


Figura 8. À esquerda, foto ilustrativa do Raspberry Pi 3 Model B utilizado no projeto. À direita, foto ilustrativa do chip LoRa Adafruit RFM95W.

Todos os equipamentos comprados são especificados para operar em banda de frequência LoRa de 915 MHz.

Ambos os gateways foram conectados à internet através de Wi-Fi. Como servidor para comunicação com o gateway pela internet, utilizou-se a plataforma IoT da Konker⁷, sendo a comunicação feita através do protocolo MQTT, como ilustra a Figura 9.

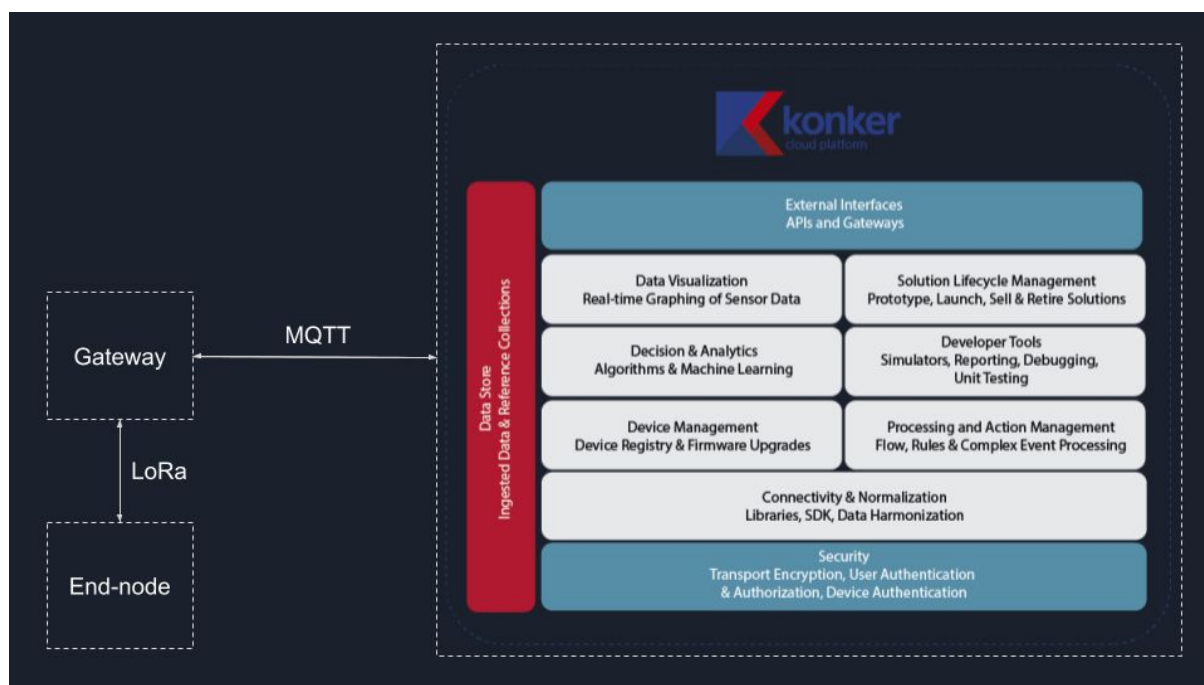


Figura 9. Ilustração da arquitetura de rede utilizada, incluindo o terminal, gateway e servidor.

⁷ Konker IoT Platform: <http://demo.konkerlabs.net>

3.1.2. Cenário dos Experimentos

Os testes foram realizados no campus da Unicamp. Foram realizados testes em três ambientes diferentes. Um deles é um ambiente *indoor*, onde o gateway foi colocado, fixo, dentro de uma sala. Os outros dois ambientes são *outdoor*: um em região povoada por prédios e demais obstáculos e outro em região mais isolada, alta e com menos obstáculos ao redor.

O primeiro ambiente (cenário 1), *indoor*, trata-se de uma sala no interior do prédio IC-3,5 do Instituto de Computação (IC) da Unicamp. O gateway permaneceu fixo neste lugar, enquanto o terminal enviava constantemente uma mensagem a cada 2 segundos e era movido do lado externo do prédio, afastando-se cada vez mais do gateway até a perda de sinal ultrapassar 50%, demarcando um perímetro máximo de alcance. Os testes foram repetidos em três dias diferentes, todos entre 12h e 15h e em dias de sol.

O segundo ambiente (cenário 2), *outdoor*, trata-se de uma área externa do prédio IC-3,5 com muitas árvores, apelidada de “bosque do IC”. É um ponto mais alto do que o centro da Unicamp (ciclo básico), cerca de 20 metros mais alto. O mesmo processo foi aplicado e com o mesmo número de repetições: gateway fixo neste lugar, enquanto o terminal movia-se livremente a seu redor e afastando-se, repetido em 3 dias diferentes com as mesmas condições.

O terceiro ambiente (cenário 3), *outdoor*, trata-se de um dos pontos mais altos da Unicamp (cerca de 55 metros mais alto do que o ciclo básico, ponto central da Unicamp), com um menor número de obstáculos ao redor, em frente ao Museu Exploratório de Ciências da Unicamp. O mesmo processo foi aplicado e com o mesmo número de repetições.

A localização fixa do gateway em cada cenário pode ser observada na Figura 10.



Figura 10. Posição do gateway em cada cenário: ponto 1 (vermelho) referente ao cenário 1, ponto 2 (azul) ao cenário 2 e ponto 3 (verde) ao cenário 3.

Os testes em cada um dos dos dois primeiros cenários foram feitos utilizando os dois gateways: Dragino e Raspberry Pi. O terceiro cenário foi testado apenas com o gateway Dragino. Em todos, utilizou-se os mesmos terminais.

3.2. Resultados

3.2.1. Cenário 1: Indoor

3.2.1.1. Gateway Dragino

Configurou-se o gateway Dragino e o terminal para transmissão e recepção LoRa com os seguintes parâmetros: Spreading Factor (SF) 7, Code Rate (CR) 5, Bandwidth (BW) 125 kHz e potência de transmissão 20 dBm. O valor máximo de potência para transmissão é 14 dBm, o valor é configurado acima disso, pois existe atenuação interna do sinal até a saída.

Na Tabela 2, para cada repetição do teste, encontram-se valores de RSSI mínimo e máximo detectados e alcance máximo (distância máxima entre gateway e terminal até a perda de pacotes ultrapassar 50%).

Teste	RSSI mínimo	RSSI máximo	Alcance máximo
1	-22 dBm	-100 dBm	289 metros
2	-22 dBm	-101 dBm	312 metros
3	-21 dBm	-103 dBm	301 metros

Tabela 2. Teste Gateway Dragino Cenário 1 (SF=7, CR=5, BW=125kHz).

A partir da totalidade de dados obtidos ao longo dos testes, estima-se que o raio de alcance do gateway nas circunstâncias descritas nestes testes é de, aproximadamente, 300 metros, desenhando um perímetro de alcance como o ilustrado na Figura 11.



Figura 11. Ilustração de raio de alcance do gateway Dragino no cenário de testes 1.

3.2.1.2. Gateway Raspberry Pi

Configurou-se o gateway e o terminal para transmissão e recepção LoRa segundo os seguintes parâmetros: Spreading Factor (SF) 10, Code Rate (CR) 5, Bandwidth (BW) 125 kHz e potência de transmissão 20 dBm.

Na Tabela 3, para cada repetição do teste, encontram-se valores de RSSI mínimo e máximo e alcance máximo.

Teste	RSSI mínimo	RSSI máximo	Alcance máximo
1	-28 dBm	-128 dBm	445 metros
2	-38 dBm	-120 dBm	435 metros
3	-34 dBm	-127 dBm	460 metros

Tabela 3. Teste Gateway Raspberry Cenário 1 (SF=10, CR=5, BW=125kHz).

A partir da totalidade de dados obtidos ao longo dos testes, estima-se que o raio de alcance do gateway nas circunstâncias descritas nestes testes é de, aproximadamente, 450 metros, desenhando um perímetro de alcance como o ilustrado na Figura 12.



Figura 12. Ilustração de raio de alcance do gateway Raspberry no cenário de testes 1.

3.2.2. Cenário 2: Outdoor, IC

3.2.2.1. Gateway Dragino

Configurou-se o gateway Dragino e o terminal para transmissão e recepção LoRa segundo os seguintes parâmetros: Spreading Factor (SF) 7, Code Rate (CR) 5, Bandwidth (BW) 125 kHz e potência de transmissão 20 dBm.

Na Tabela 4, para cada repetição do teste, encontram-se valores de RSSI mínimo e máximo e alcance máximo.

Teste	RSSI mínimo	RSSI máximo	Alcance máximo
1	-19 dBm	-105 dBm	530 metros
2	-20 dBm	-100 dBm	515 metros
3	-22 dBm	-103 dBm	530 metros

Tabela 4. Teste Gateway Dragino Cenário 2 (SF=7, CR=5, BW=125kHz).

A partir da totalidade de dados obtidos ao longo dos testes, estima-se que o raio de alcance do gateway nas circunstâncias descritas nestes testes é de, aproximadamente, 525 metros, desenhando um perímetro de alcance como o ilustrado na Figura 13.



Figura 13. Ilustração de raio de alcance do gateway Dragino no cenário de testes 2.

3.2.2.2. Gateway Raspberry Pi

Configurou-se o gateway e o terminal para transmissão e recepção LoRa segundo os seguintes parâmetros: Spreading Factor (SF) 10, Code Rate (CR) 5, Bandwidth (BW) 125 kHz e potência de transmissão 20 dBm.

Na Tabela 5, para cada repetição do teste, encontram-se valores de RSSI mínimo e máximo e alcance máximo.

Teste	RSSI mínimo	RSSI máximo	Alcance máximo
1	-36 dBm	-122 dBm	750 metros
2	-35 dBm	-125 dBm	760 metros
3	-35 dBm	-126 dBm	800 metros

Tabela 5. Teste Gateway Raspberry Cenário 2 (SF=10, CR=5, BW=125kHz).

A partir da totalidade de dados obtidos ao longo dos testes, estima-se que o raio de alcance do gateway nas circunstâncias descritas nestes testes é de, aproximadamente, 750 metros, desenhando um perímetro de alcance como o ilustrado na Figura 14.

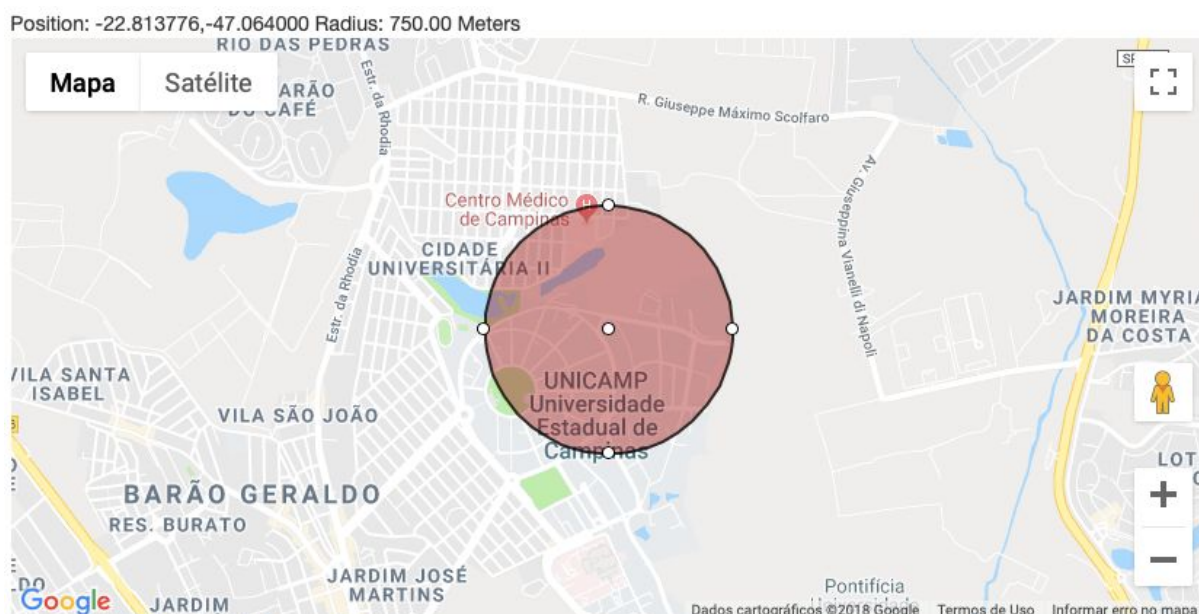


Figura 14. Ilustração de raio de alcance do gateway Raspberry no cenário de testes 2.

3.2.3.Cenário 3: Outdoor, Museu Exploratório de Ciências

3.2.3.1. Gateway Dragino

Para este cenário, utilizou-se apenas o gateway Dragino configurado segundo os seguintes parâmetros: Spreading Factor (SF) 10, Code Rate (CR) 5, Bandwidth (BW) 125 kHz e potência de transmissão 20 dBm.

Na Tabela 6, para cada repetição do teste, encontram-se valores de RSSI mínimo e máximo e alcance máximo.

Teste	RSSI mínimo	RSSI máximo	Alcance máximo
1	-20 dBm	-105 dBm	1.250 metros
2	-20 dBm	-112 dBm	1.350 metros
3	-19 dBm	-110 dBm	1.325 metros

Tabela 6. Teste Gateway Dragino Cenário 3 (SF=10, CR=5, BW=125kHz).

A partir da totalidade de dados obtidos ao longo dos testes, estima-se que o raio de alcance do gateway nas circunstâncias descritas nestes testes é de, aproximadamente, 1.300 metros, desenhando um perímetro de alcance como o ilustrado na Figura 15.

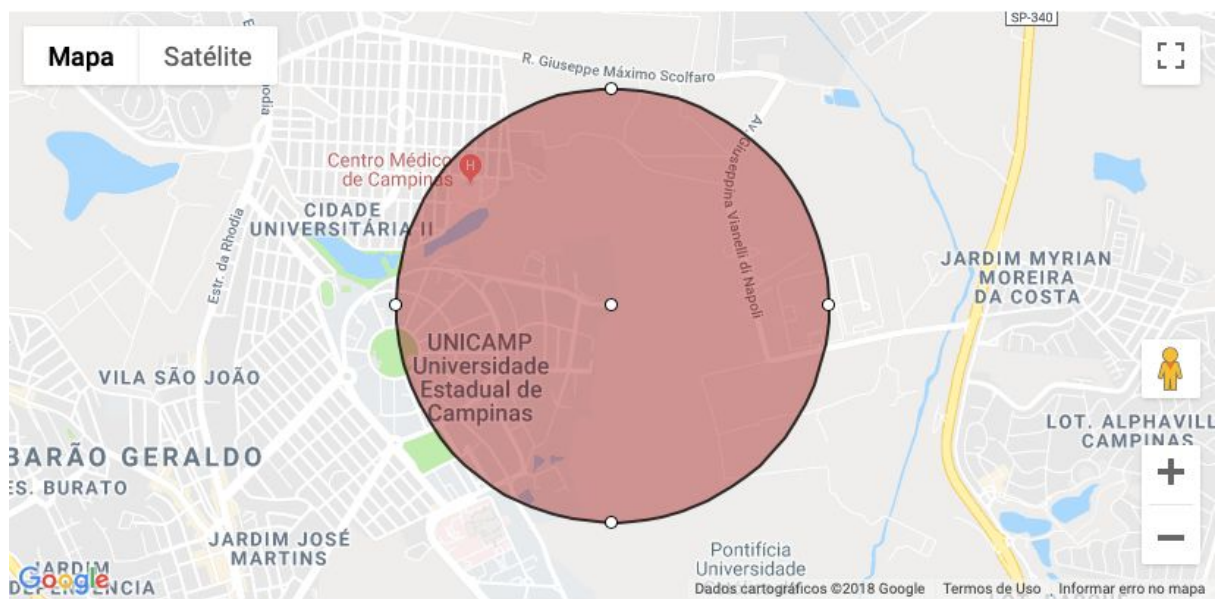


Figura 15. Ilustração de raio de alcance do gateway Dragino no cenário de testes 3.

3.3. Discussão dos Resultados

Através dos resultados obtidos, é possível avaliar o desempenho de um gateway LoRa e sua comunicação com terminais em um campus universitário.

Primeiramente, observa-se a diferença entre ambientes indoor e outdoor. Tendo a barreira de paredes do prédio ao qual está confinado, o gateway perdeu consideravelmente sua capacidade de alcance. Já em um ambiente outdoor, o desempenho do mesmo gateway com as minhas configurações melhorou, chegando a quase que dobrar seu alcance máximo e médio.

Do cenário 2 para o cenário 3, observa-se o impacto da visada no alcance da comunicação. No cenário 2, a maior presença de árvores e prédios que se interpõem entre o gateway e o terminal implicam uma perda considerável da potência do sinal durante a transmissão. O cenário 3, com menos obstáculos, apresentou resultados melhores. Outro fator importante do cenário 3 que contribui para seu maior alcance é a altura do local. O gateway ficou posicionado em um ambiente mais aberto e mais alto do que o restante da área de cobertura, provendo melhores resultados.

Outro fator observado como fundamental na determinação do alcance é a configuração de Spreading Factor. Como esperado, um valor maior de SF resulta em tempos maiores de transmissão (*time on air*), porém, provê um alcance maior do gateway ao terminal. Observamos um crescimento alto de alcance ao aumentarmos o SF de 7 para 10, quase dobrando os valores de alcance, como os resultados evidenciam.

Como os dispositivos IoT previstos nos projetos atuais do Smart Campus projetam enviar poucos dados e com grandes intervalos de tempo entre uma transmissão e outra, um SF mais alto é o mais recomendado. Porém, atenta-se ao fato de que o SF 12 não é permitido no Brasil, pois seu *time on air* é demasiadamente grande, a ponto de violar regulamentação imposta pela agência nacional reguladora, Anatel.

O cenário 3 que possui o maior alcance registrado demonstra que é possível cobrir uma área superior à área principal da Unicamp com apenas um gateway LoRa. Porém, os cenários anteriores mostram que a região mais central da Unicamp, onde há mais prédios e obstáculos, apresenta um desafio, sendo necessário, nesta área, instalar o gateway em uma altura superior e usar um SF alto.

Apesar desses aspectos positivos, os resultados reais ainda estão distantes dos alcances possíveis teóricos. Uma proposta de melhoria para o gateway é a utilização de antenas melhores, com menor perdas na transmissão e recepção, que auxiliem na melhora da sensibilidade do gateway.

Ao longo dos testes, também foi possível avaliar a facilidade de uso de cada um dos modelos de gateway. O gateway Dragino apresentou erros de funcionamento básico em operação normal e falhas em tentativas de configuração, necessitando reinício do equipamento. O gateway Raspberry apresentou um desempenho geral superior.

4. Testes de Desempenho LoRaWAN

4.1 Metodologia

4.1.1 Seleção e Configuração de Componentes de Hardware e Software

Para testes LoRaWAN, necessita-se de terminais e gateway. Utiliza-se para isso o mesmo material utilizado no teste de LoRa descrito no tópico 3 deste documento, consistindo, resumidamente, em 1 Gateway LoRa Dragino LG01-P e dois terminais compostos por 2 Arduinos UNO conectados com um dos dois shields disponíveis: 1 LoRa Shield e 1 LoRa Shield com GPS.

O gateway em questão é do tipo "*single-channel*", ou seja, é capaz de transmitir e receber mensagens LoRa em apenas um canal por vez. LoRaWAN em sua definição original espera que o gateway seja capaz de transmitir e receber em mais de um canal simultaneamente, dando liberdade para que os terminais variem o uso dos canais, explorando amplamente a banda. Logo, para os teste realizados, define-se o uso fixo de apenas um canal de transmissão e recepção, mantendo as demais definições de LoRaWAN.

Essa restrição é aplicada ao software que foi desenvolvido na IDE do Arduino para o gateway Dragino ser compatível com as demais especificações de LoRaWAN, usando como base um exemplo de código fornecido pela Dragino. Como identificação única do gateway acertada entre ele e o servidor, usa-se o MAC Address do próprio gateway seguido de 4 letras "F" para completar o tamanho exigido.

Também foi adaptado código para os terminais Arduino, provendo os parâmetros LoRaWAN necessários. Utiliza-se o método de ativação ABP, pois o procedimento de *join* do método OTAA exige que o gateway use mais de um canal simultaneamente. Assim, gera-se no servidor as chaves AppSKey e NwksKey e a identificação única do dispositivo (DevAddr) que são inseridas nos terminais. Estes códigos estão disponíveis no repositório GitHub deste projeto⁸.

O principal novo componente utilizado neste teste é o *network server* e o *application server* proveniente do projeto LoRa Server⁹, um projeto *open-source* que provê um conjunto de aplicações e ferramentas para composição de redes LoRaWAN. A Figura 16 apresenta uma visão da arquitetura desta solução de servidor que utiliza-se para construção de uma rede LoRaWAN nesta etapa.

Na arquitetura, nota-se que LoRa Server também é o nome do *network server* provido pelo projeto e LoRa App Server, o servidor de aplicações. Nosso gateway Dragino possui uma implementação de um *packet-fowarder*, enviando em UDP os pacotes recebidos dos

⁸ GitHub Konker: <https://github.com/KonkerLabs>

⁹ LoRa Server: <https://www.loraserver.io>

terminais ao servidor. O componente LoRa Gateway Bridge do servidor transforma em MQTT os pacotes recebidos do gateway em UDP e o mesmo em sentido oposto, permitindo a comunicação com o LoRa Server que, por sua vez, se comunica com o LoRa App Server. LoRa Geo Server é um componente opcional que provê serviços de geolocalização (não utilizado neste projeto) [8].

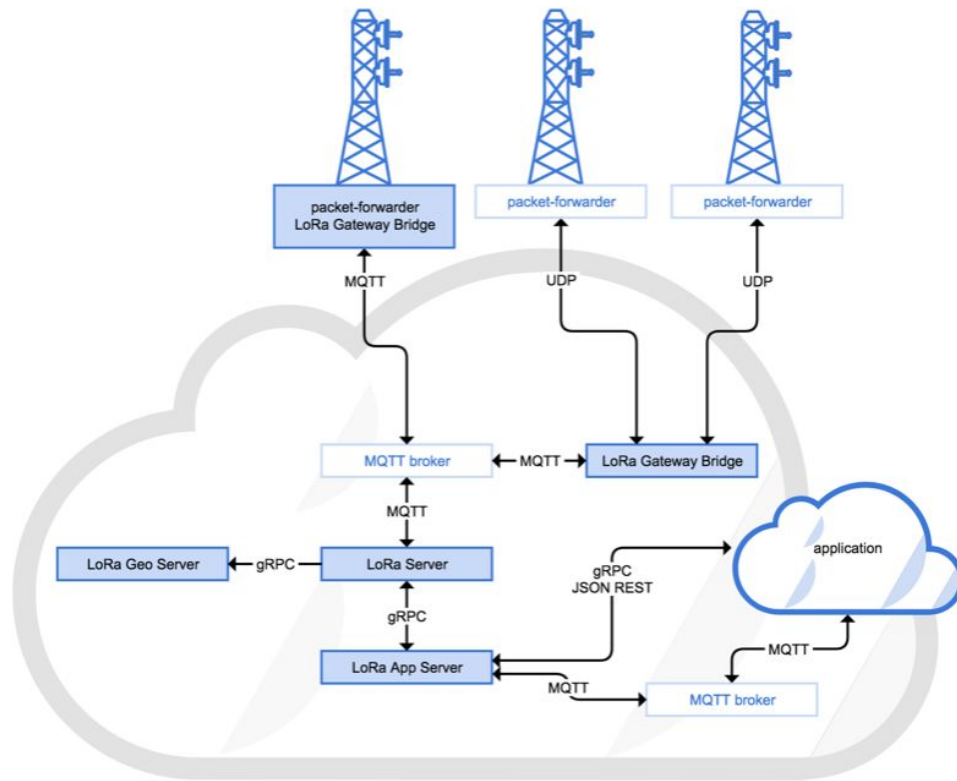


Figura 16. Arquitetura do projeto LoRa Server [8].

Para a realização dos testes desejados, a plataforma da Konker é integrada ao sistema assumindo o papel de aplicação na arquitetura exposta na Figura 16 através da API para integração HTTP REST disponibilizada no servidor. Desta forma, todos os pacotes provenientes dos terminais e que não possuem erro são encaminhados para a plataforma Konker, onde podem ser visualizados, manipulados e extraídos para análises.

4.1.2. Cenário dos Experimentos

Os testes foram todos realizados no campus da Unicamp em dois cenários diferentes. O primeiro cenário é estático, isto é, sem movimento do terminal. O segundo cenário é em movimento, com o terminal mudando de posição física ao longo do tempo.

Para ambos os cenários, o gateway Dragino permaneceu fixo no mesmo local, instalado no Museu Exploratório de Ciências, assim como no último cenário do teste anterior com LoRa do tópico 3 deste documento.

No cenário estático (cenário 1), utiliza-se como terminal o Arduino com LoRa Shield instalado dentro da sala denominada LMCAD do prédio IC-3 no Instituto de Computação (IC) na Unicamp, destacado com um ponto circular vermelho na Figura 17. A localização do gateway está destacada com um ponto verde na mesma figura. A distância entre eles é de aproximadamente 650 metros.



Figura 17. Posição do gateway demarcada pelo ponto verde e posição do terminal demarcada pelo ponto vermelho.

O primeiro teste neste cenário (teste 1), consiste no terminal configurado com os seguintes parâmetros: frequência 916,8 MHz, DR 5 (Spreading Factor SF 7 e Bandwidth BW 125 kHz), Code Rate (CR) 5 e potência de transmissão 20 dBm. O dispositivo permaneceu ligado e em observação durante 7 dias enviando constantemente pacotes ao gateway. O intervalo de tempo entre cada envio é de 15 segundos, aproximadamente (pequenas variações de tempo podem ocorrer devido a variações no processo de envio no hardware).

No segundo teste deste cenário (teste 2), altera-se o data rate do terminal para DR 2 (Spreading Factor SF 10 e Bandwidth BW 125 kHz) com o gateway ajustado de acordo. Repete-se o mesmo teste durante 7 dias.

No cenário em movimento (cenário 2), são realizados três testes. Em todos eles, o terminal utilizado é o Arduino com GPS Shield. O conteúdo da mensagem enviada por este consiste da sua localização em coordenadas GPS. Os parâmetros de configuração são os mesmos do anterior, apenas alterando o intervalo de tempo de envio entre pacotes para 5 segundos.

No primeiro (teste 1) e segundo (teste 2) teste, o terminal permanece dentro de um ônibus circular interno da Unicamp. Este ônibus percorre o trajeto da linha "Museu", cobrindo uma larga extensão do campus. Seu trajeto pode ser observado na Figura 18. O terminal permanece ativo durante todo o percurso do trajeto. A diferença no segundo teste é que o percurso é percorrido duas vezes: uma vez igual ao teste 1 e outra vez com o dispositivo Arduino LoRa Shield em operação simultaneamente, disputando o mesmo canal no gateway. O dispositivo concorrente envia pacotes com maior frequência, uma vez que seu intervalo de tempo entre cada envio é de 4 segundos.

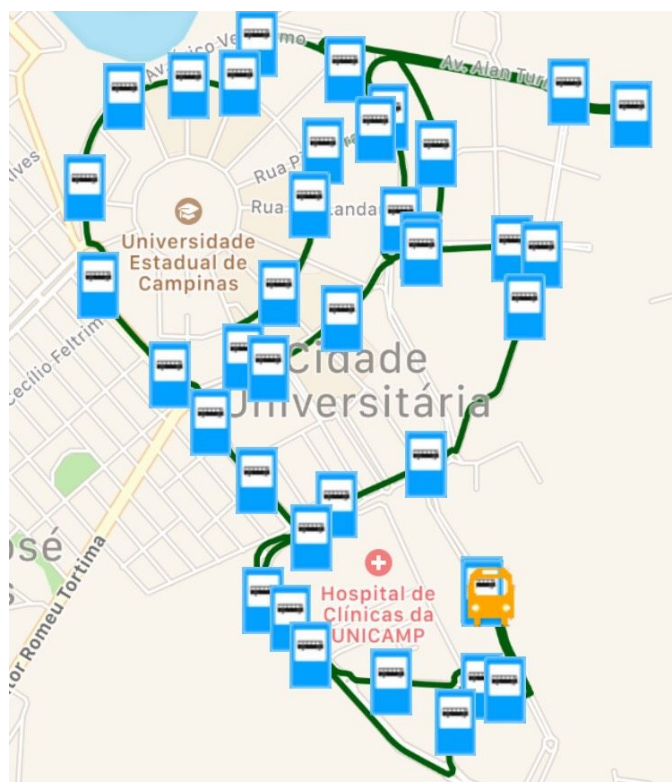


Figura 18. Trajeto do ônibus circular interno da Unicamp na linha "Museu".

Ainda no cenário em movimento, o terceiro teste (teste 3) consiste em percorrer um grande número de ruas entre as Avenidas Oswaldo Cruz e Alan Turing da Unicamp. O objetivo deste percurso é obter dados da recepção de sinal em ruas não avaliadas nos testes de ônibus. O trajeto pode ser observado em laranja na Figura 19.



Figura 19. Trajeto realizado na execução do teste 3 do cenário 2.

4.2. Resultados

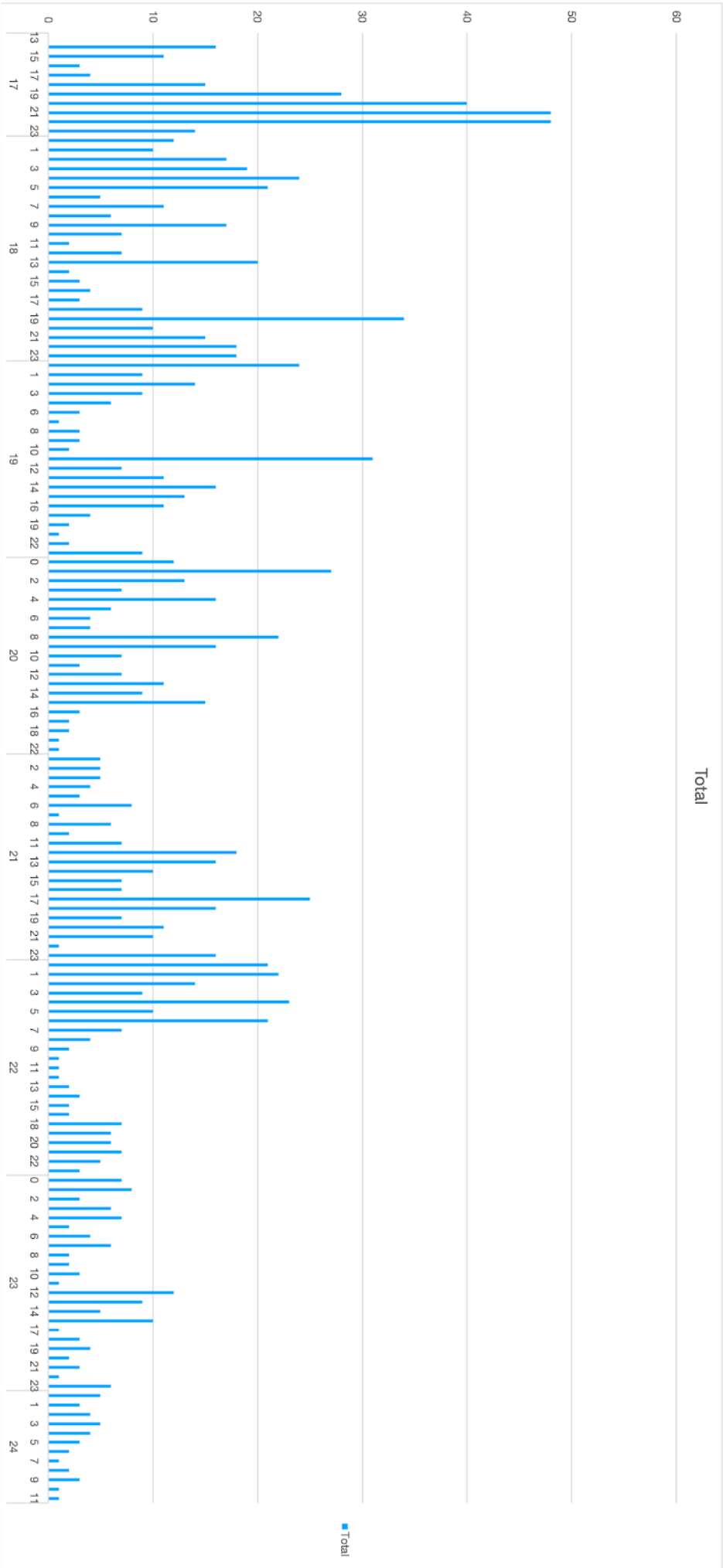
4.2.1. Cenário 1: Estático

4.2.1.1. Teste 1: SF 7

Na plataforma Konker, extraiu-se em formato CSV uma tabela com todos os pacotes recebidos do LoRa Server para o dispositivo no período de 17 de abril de 2019 às 13h até 24 de abril às 11h. Observa-se que foram computados 1476 pacotes no período de 166 horas ou 9960 minutos. Os pacotes eram programados para serem enviados a cada 15 segundos. Logo, espera-se 4 pacotes por minuto, com uma expectativa de 240 pacotes em uma hora. Ao computar por períodos de uma hora, as que possuem o maior número de recebimento aproximam-se de 20% desta expectativa.

A Figura 20 na próxima página apresenta um gráfico onde cada barra apresenta o número de pacotes recebidos para cada hora de cada dia do período de teste. É possível observar uma grande variação: horas com um número de pacotes expressivo em mais de 40 e outras horas com 1, 2 ou 3 pacotes recebidos. Há alguns momentos, em que nenhum pacote é recebido no período da hora. Ao comparar os dias no gráfico, nota-se que não parece haver relação entre o período do dia ou faixa de horário e o número de pacotes recebidos. Também, é notável que o número decresce gradativamente, sendo que o último dia analisado possui consideravelmente menos pacotes ao longo de seu período do que o primeiro dia. O gráfico também apresenta a característica de ter os picos isolados, ou seja, as horas que possuem maior recebimento costumam ser seguidas e precedidas por horas com recebimentos consideravelmente menores.

Figura 20. Gráfico do número de pacotes recebidos por hora por dia no teste 1



4.2.1.1. Teste 2: SF 10

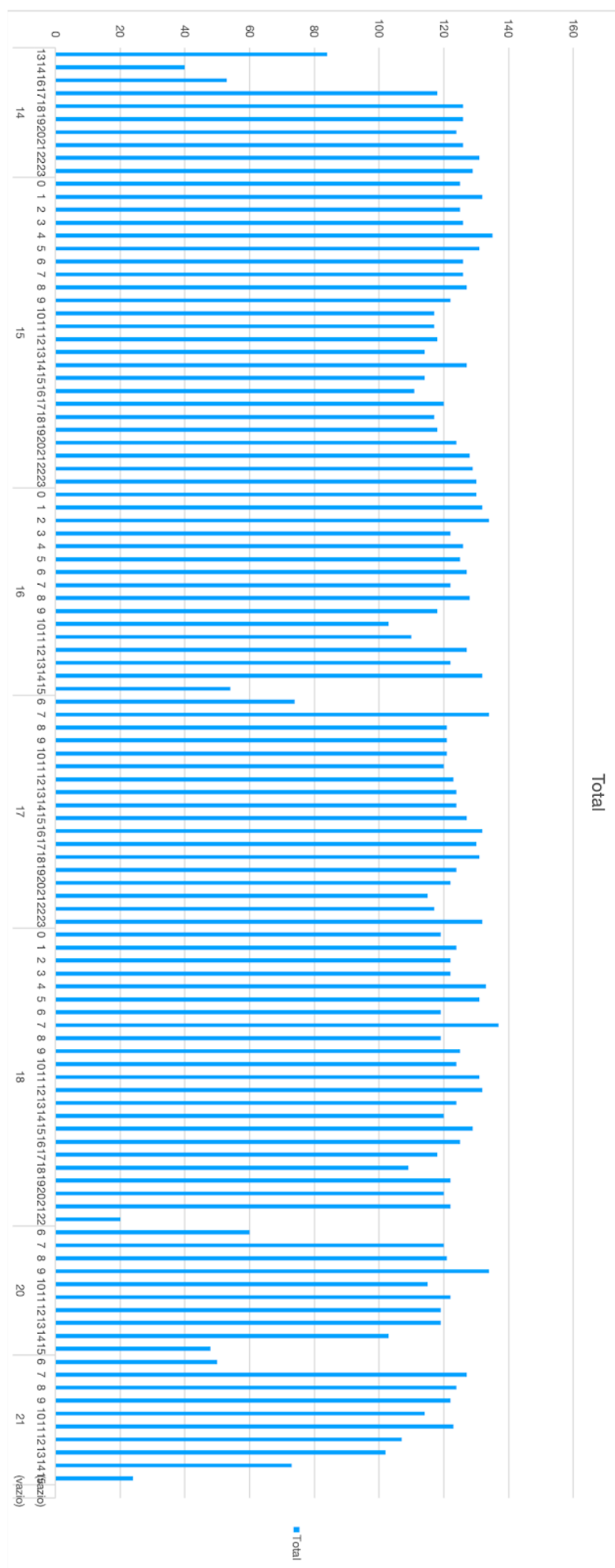
Na plataforma Konker, extraiu-se em formato CSV uma tabela com todos os pacotes recebidos do LoRa Server para o dispositivo no período de 14 de maio de 2019 às 13h até 21 de maio às 14h. Observa-se que foram computados 12894 pacotes no período de 168 horas ou 10080 minutos. Os pacotes eram programados para serem enviados a cada 15 segundos. Logo, espera-se 4 pacotes por minuto, com uma expectativa de 240 pacotes em uma hora. Ao computar por períodos de uma hora, as que possuem o maior número de recebimento aproximam-se de 60% desta expectativa.

A Figura 21 na próxima página apresenta um gráfico onde cada barra apresenta o número de pacotes recebidos para cada hora de cada dia do período de teste. Observa-se que, ao contrário do teste anterior, este apresenta um comportamento mais constante e linear, com variações significativamente menores.

É preciso considerar que os vales dos menores valores, isto é, dia 14 às 14h, dia 16 às 15h e dia 18 às 22h, são resultados de problemas comprovados na rede Wi-Fi ao qual o gateway estava conectado. Apesar de mantidos no gráfico, podem ser desconsiderados. As demais horas faltantes no gráfico foram removidas pela mesma justificativa.

Considerando que temos 111 períodos de 1 hora computados e que a distribuição é coerente e apresenta certa constância, é válida a métrica da média de pacotes por hora: aproximadamente 166, correspondendo a 48,5% da expectativa teórica inicial por hora.

Figura 21. Gráfico do número de pacotes recebidos por hora por dia no teste 2



4.2.1. Cenário 2: Em movimento

4.2.1.1. Teste 1

Assim como nos testes anteriores, os dados resultantes do envio de pacotes pelo terminal ao longo do percurso foram extraídos em formato CSV da plataforma da Konker. Foram obtidos 246 pacotes com coordenadas GPS que podem ser visualizadas em um mapa na Figura 22.



Figura 22. Posição do terminal para pacotes recebidos no teste 1 cenário 2.

Com estes dados, pode-se observar pontos de concentração onde o sinal é visivelmente melhor e pontos cegos onde nenhum pacote é recebido. Com isso, pode-se formular um mapa de calor como o da Figura 23.

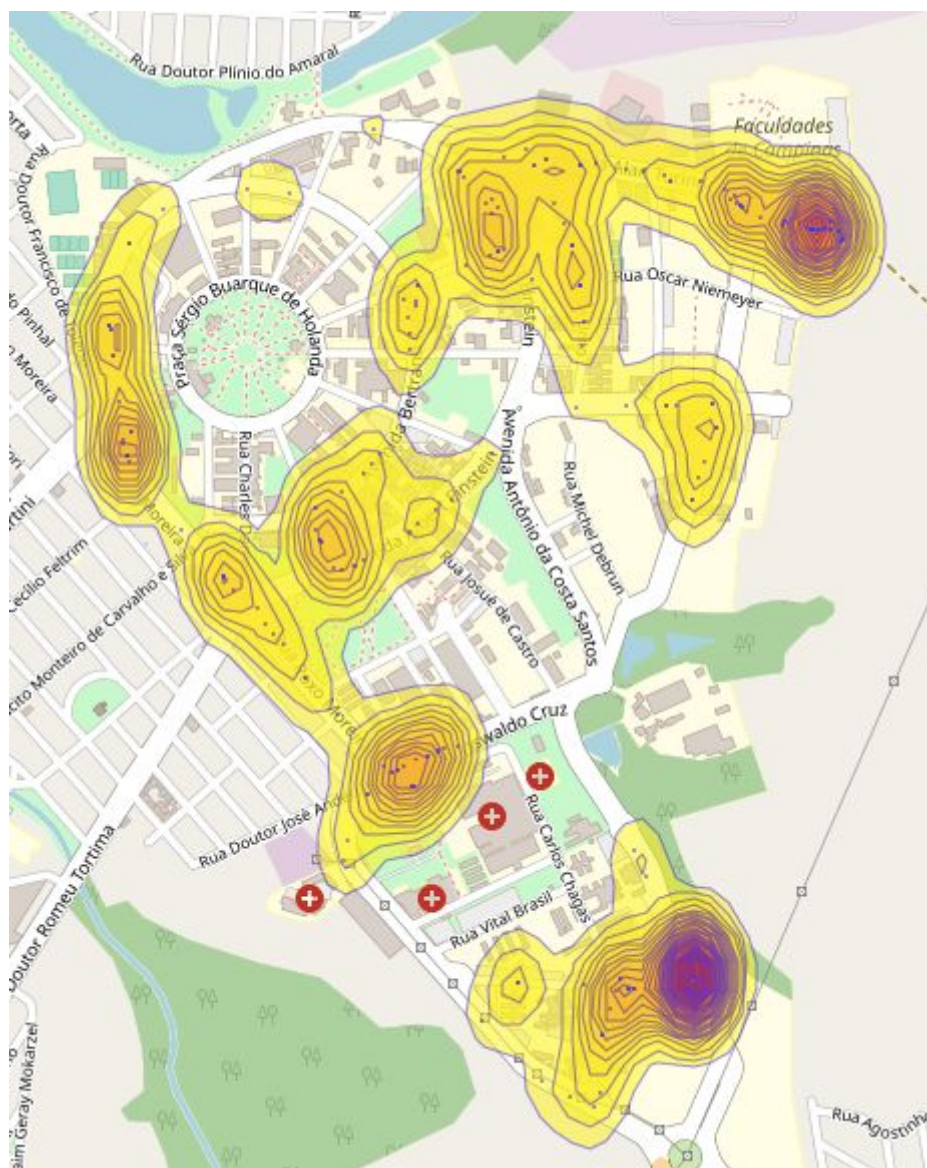


Figura 23. Ilustração de mapa de calor de pacotes recebidos no teste 1 cenário 2 considerando número de pontos por área.

Ao comparar os pontos obtidos neste teste com o trajeto original da Figura 18, conclui-se a presença de áreas com sinal muito bom mesmo que distantes. As duas regiões com maior concentração de pontos e onde o sinal estava melhor, com menores perdas, são as destacadas em cores mais fortes no mapa de calor da Figura 23. Uma delas é na própria região do museu. A outra é na região do hospital universitário há aproximadamente 2 km de distância, sendo o ponto mais distante do teste.

Atualmente, existe um sistema chamado "Circulino" que capta a localização GPS através de comunicação celular (3G) do mesmo ônibus no mesmo trajeto que o teste realizado. Foram obtidos os dados correspondentes do Circulino para o mesmo dia, horário e trajeto do teste em questão. Os pontos são apresentados na Figura 24.

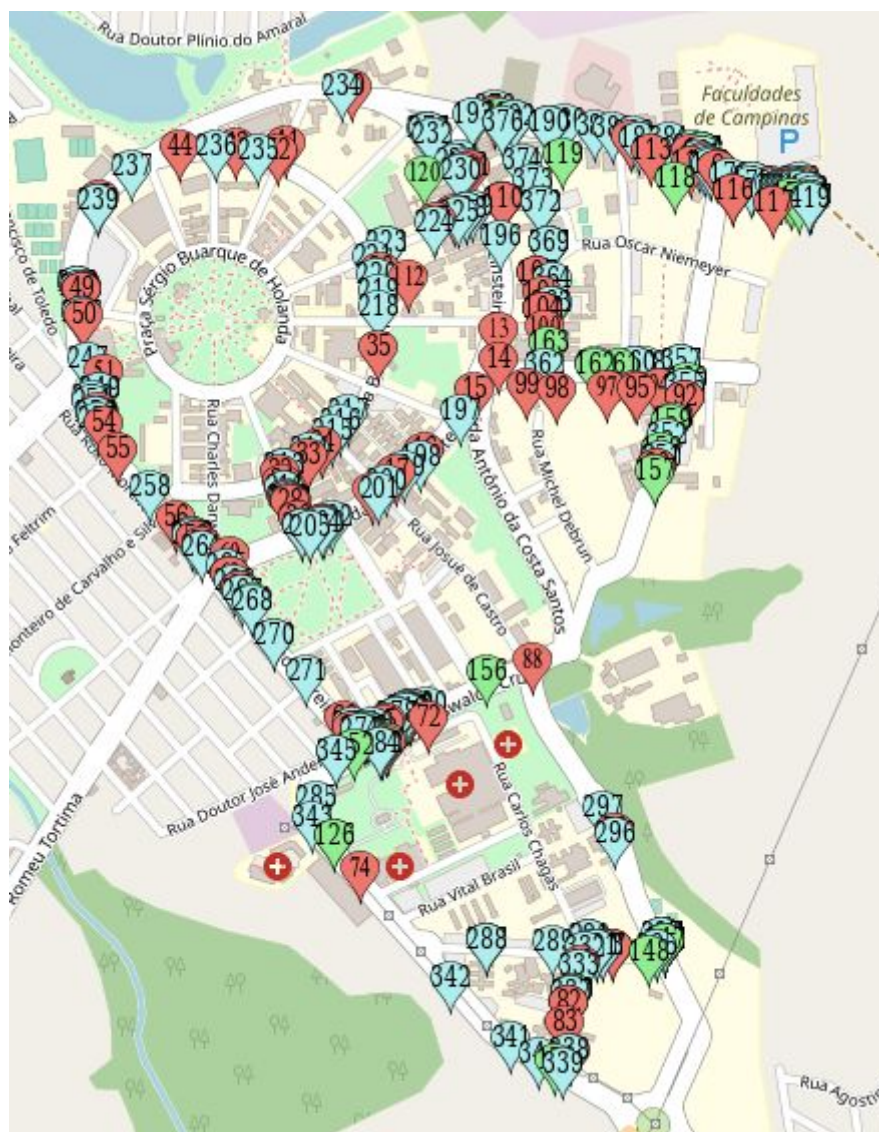


Figura 26. Comparação de pontos do teste 1 (azul) com pontos do teste 2 (vermelho e verde).

Fica evidente, ao considerar os pontos verdes, o baixo desempenho ao competir com outro dispositivo, sendo que apenas 55 pacotes foram recebidos em todo o percurso. Como utilizamos um gateway single-channel, ou seja, capaz de processar apenas um canal, é de esperar que a disputa por ele gere descartes e perdas significativas.

No percurso sem concorrência, foram obtidos 117 pontos, tendo um desempenho inferior ao teste 1. Observando e comparando os mapas, confirma-se as presenças de sombras, regiões onde nenhum pacote é recebido, assim como as regiões com melhor sinal que permanecem as mesmas.

4.2.1.1. Teste 3

Assim como nos testes anteriores, obtemos os pontos de coordenadas deste teste: 184 pontos no total. Sua distribuição no mapa pode ser observada na Figura 27.

4.3. Discussão dos Resultados

Os testes do cenário 1 permitem comparar o desempenho de dois *data rates* diferentes da banda de LoRaWAN utilizada com obstáculos entre o terminal e o gateway e uma distância pequena quando comparada a aplicações gerais de LPWAN. A comparação se torna mais específica ainda dado que a alteração de *data rates* avaliada implica somente uma alteração de fator de espalhamento.

Os resultados observados no uso de SF 7 demonstram uma grande perda de pacotes e inconsistência no recebimento. Evidencia alta perda de sinal. É digno de nota que os experimentos com LoRa (tópico 3 deste documento) já evidenciam baixo desempenho em ambientes *indoor* quando comparados com *outdoor*. Os resultados deste agora também indicam não haver relação entre o horário e o nível de qualidade do sinal, seja em períodos da manhã, tarde ou noite, durante horas de grande movimento no local ou com o local fechado. Sugere uma baixa confiabilidade de uso. Em geral, os resultados são muito abaixo do esperado e sua aplicação real não recomendada.

Os resultados com SF 10 contrastam com o anterior. O recebimento assume uma característica mais constante, com variações muito inferiores e menor perda de pacotes. Indica que o uso de um SF maior é recomendado para superação de barreiras impostas por ambientes *indoor* e aumentam a confiabilidade do sistema. A desvantagem de uso de um SF maior neste cenário é o aumento do tempo de envio dos pacotes. Porém, para aplicações que não necessitam de atualizam em tempo real com taxa inferior a 1 pacote a cada 5 segundos, LoRaWAN poderá ser uma opção real de solução.

Os testes do cenário 2 permitem avaliar o desempenho de LoRaWAN com terminais em movimento e, ao mesmo tempo, avaliar o alcance em diferentes áreas e distâncias.

O primeiro destaque é a observação de sombras de sinal. Por exemplo, o término da Avenida Cândido Rondon é consistente em todos os testes ao não apresentar recebimento nenhum de pacotes LoRaWAN. Ao observar o sistema Circulino que utiliza outra tecnologia, vê-se o mesmo ponto de sombra, apesar de serem tecnologias muito distintas. Destaca-se como um possível motivo para isso o relevo do local. O término desta avenida constitui o término de uma grande descida de um morro e a formação de um pequeno vale, dado que os arredores são mais altos. Segue no mesmo nível a Avenida Antônio de Costa Santos, onde também foi evidenciada uma sombra de sinal LoRaWAN.

O gateway está localizado em um dos pontos mais altos da região da Unicamp, com elevação de 656 metros. Os dois pontos de sombra comentados no parágrafo anterior estão, aproximadamente, 50 metros abaixo disso.

Um fenômeno similar é observado nas ruas paralelas que cruzam os círculos da Unicamp desde o ciclo básico. Estas são descidas até o ponto mais baixo ao interligar com a Rua Bertrand Russel, com altitude de 592 metros, que as cruza. Todas essas apresentam baixo desempenho, enquanto o ciclo básico, levemente mais elevado do que todas estas (610 metros) e constituindo o ponto mais alto de seu arredor, acima inclusive de muitos prédios e,

por isso, com menos obstáculos em seu nível, apresenta bom desempenho com perdas menores de pacotes.

A primeira região com melhor nível de sinal constitui os arredores do gateway. Porém, a segunda região que apresenta nível de sinal similar com baixas perdas é a região do hospital universitário que é a mais distante, há aproximadamente 2 km de distância do gateway. Esta região possui elevação média de 667 metros, estando acima do próprio gateway e provendo linha de visada muito favorável, uma vez que o terreno entre o gateway e esta área possuem altitudes menores. As medições nesta região apontam um excelente alcance para LoRaWAN, mas que pode ser profundamente prejudicada pelo relevo, presença de obstáculos e ausência de visada.

A Figura 28 a seguir apresenta, à esquerda, um mapa topográfico da região da Unicamp com a escala de relação cor-elevação [9] e, à direita, um mapa de calor para pacotes LoRaWAN gerado utilizando todos os pontos de todos os testes do cenário 2.

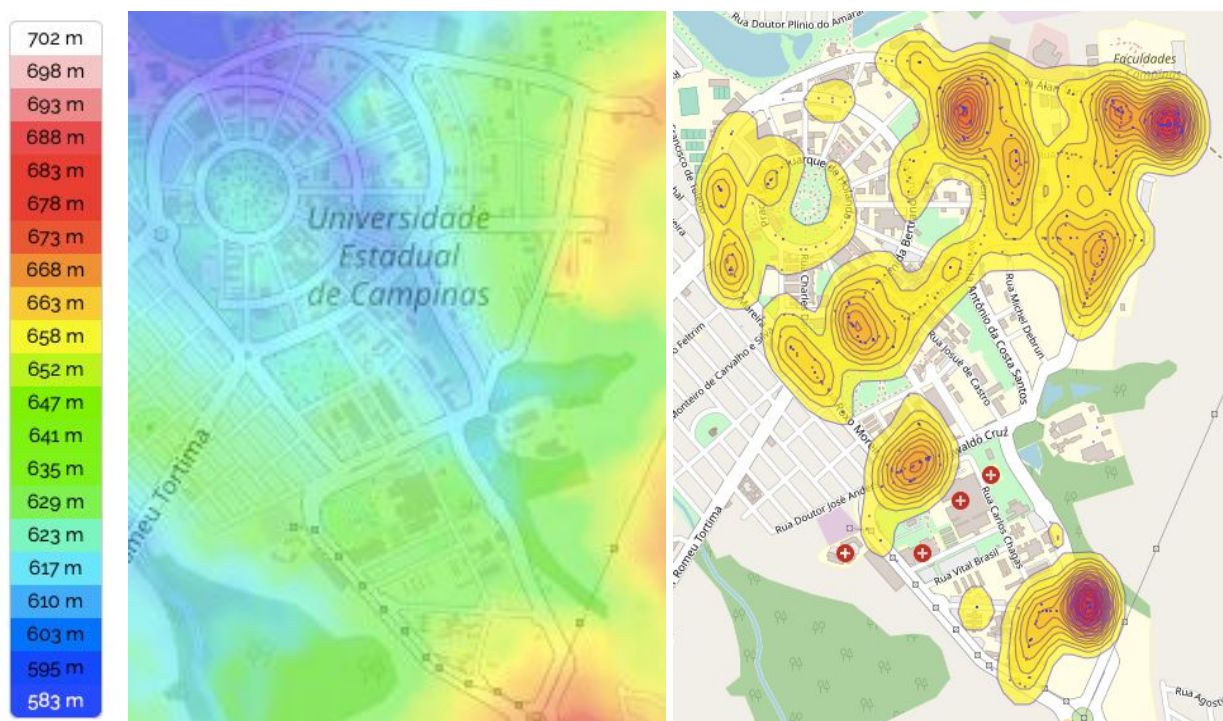


Figura 28. À esquerda, mapa topográfico da Unicamp com escala de elevação [9] e, à direita, mapa de calor com base em todos os testes do cenário 2.

A partir destas análises, conclui-se que o relevo, considerando a diferença de elevação entre terminal e gateway assim como a ausência de visada, é fator muito importante a ser estudado em um projeto de implementação de LoRaWAN, uma vez que afeta diretamente o alcance e qualidade do sinal.

6. Conclusão

Conclui-se, com a primeira etapa deste projeto focada apenas em LoRa, que a tecnologia LoRa apresenta-se como forte e viável candidata na implementação do paradigma de Internet das Coisas (IoT) no campus universitário, dado seu grande alcance, facilidade de configuração e baixo custo. Sua implementação é facilitada pela ampla disponibilidade de material *open source* para Arduino e Raspberry para desenvolvimento em LoRa.

Pelos testes executados, observa-se que um campus do tamanho da Unicamp pode ser coberto com apenas um gateway LoRa. No caso da Unicamp, a instalação simultânea em lugares estratégicos dos dois gateways testados no projeto proveriam conexão à rede LoRa não apenas para a Unicamp, mas também para as redondezas, como a faculdade PUC-Campinas e o Pólo de Tecnologia II, observando a correta configuração de parâmetros.

Com a segunda etapa deste projeto focada em LoRaWAN, observa-se que não há perda de qualidade e alcance com relação ao anterior, mantendo-se as mesmas recomendações. Pelos testes executados nesta segunda etapa, conclui-se que o relevo, em especial, a elevação com presença de obstáculos pode ter grande impacto na qualidade e no alcance da rede.

A padronização em camada mais alta provida pelo LoRaWAN provê mais funcionalidade e consistência para o uso da tecnologia, permitindo uma integração mais fácil com outras aplicações e sistemas, assim como facilidade na expansão da rede e adição de segurança. Configurações específicas de LoRaWAN não são complexas e podem ser aplicadas em uma rede LoRa. A introdução de servidores e aplicações é facilitada também pela presença de projetos *open source*. Por estes motivos, LoRaWAN é recomendável no ambiente do projeto Smart Campus.

7. Referências

- [1] LORA ALLIANCE. "A technical overview of LoRa and LoRaWAN". Disponível online: https://www.tuv.com/media/corporate/products_1/electronic_components_and_lasers/TUeV_Rheinland_Overview_LoRa_and_LoRaWANtmp.pdf. Acessado em dezembro de 2018.
- [2] ORTIZ, FERNANDO MOLANO. "Análise de desempenho de uma rede sem-fio de baixa potência e longo alcance para a Internet das Coisas". Disponível online: <http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2018/2016033228--84/file>. Acessado em dezembro de 2018.
- [3] GHOSLYA, SAKSHAMA. "All about LoRa and LoRaWAN". Disponível online: <https://www.sghosly.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>. Acessado em julho de 2019.
- [4] LORA ALLIANCE. "LoRaWAN 1.1 Regional Parameters". Revisão B. Disponível online: <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawanr-regional-parameters-v11rb>. Acessado em julho de 2019.
- [5] DRAGINO. "LG01 LoRa Gateway User Manual". Versão 1.4. Disponível online: http://www.dragino.com/downloads/downloads/UserManual/LG01_LoRa_Gateway_User_Manual.pdf. Acessado em dezembro de 2018.
- [6] PHAM, CONGDUC. "Low-cost LoRa gateway: a step-by-step tutorial". Disponível online: <https://github.com/CongducPham/tutorials/blob/master/Low-cost-LoRa-GW-step-by-step.pdf>. Acessado em dezembro de 2018.
- [7] ADAFRUIT. "Adafruit RFM69HCW and RFM9X LoRa Packet Radio Breakouts". Disponível online: <https://learn.adafruit.com/adafruit-rfm69hwc-and-rfm96-rfm95-rfm98-lora-packet-radio-breakouts?view=all>. Acessado em dezembro de 2018.
- [8] LORA SERVER. "LoRa Server: System Architecture". Disponível online: <https://www.loraserver.io/overview/architecture>. Acessado em julho de 2019.
- [9] TOPOGRAPHIC-MAP. "Mapa topográfico Universidade Estadual de Campinas, mapa de relevo, mapa de altitude". Disponível online: <https://pt-br.topographic-map.com/maps/97qu/Universidade-Estadual-de-Campinas/>. Acessado em julho de 2019.