

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Matheus Piotroski Neis

**IMPLEMENTAÇÃO DE REDE LORA NO SISTEMA DE
TRANSPORTE INTRACAMPUS DA UFSM**

Santa Maria, RS
2017

Matheus Piotroski Neis

**IMPLEMENTAÇÃO DE REDE LORA NO SISTEMA DE TRANSPORTE
INTRACAMPUS DA UFSM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Com-
putação da Universidade Federal de Santa Ma-
ria (UFSM, RS), como requisito parcial para
obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Computação.

ORIENTADOR: Prof. Carlos Henrique Barriquello

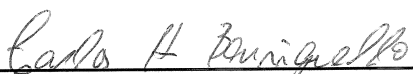
Santa Maria, RS
2017

Matheus Piotroski Neis

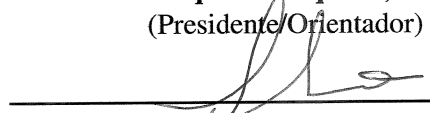
**IMPLEMENTAÇÃO DE REDE LORA NO SISTEMA DE TRANSPORTE
INTRACAMPUS DA UFSM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Com-
putação da Universidade Federal de Santa Ma-
ria (UFSM, RS), como requisito parcial para
obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Computação.

Aprovado em 11 de dezembro de 2017:



Carlos Henrique Barriquello, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Marcelo Serrano Zanetti, Dr. (UFSM)



Renato Machado, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2017

RESUMO

IMPLEMENTAÇÃO DE REDE LORA NO SISTEMA DE TRANSPORTE INTRACAMPUS DA UFSM

AUTOR: Matheus Piotroski Neis

ORIENTADOR: Carlos Henrique Barriquello

Este trabalho tem como objetivo efetuar uma breve análise das necessidades que a internet das coisas (IoT) está trazendo para o mundo das LPWANs. Verificar as tecnologias existentes e comparar os métodos que cada organização/empresa utiliza para se encaixar no mercado das redes de longo alcance e baixo consumo. Após a descrição de características das principais tecnologias atuais, um estudo de caso apresenta a implementação da tecnologia LoRa, desenvolvida pela Semtech, juntamente com seu protocolo LoRaWAN, que é mantido pela LoRa Alliance. O referido estudo de caso é composto por um sistema de localização do ônibus interno da UFSM, que permite aos usuários saber exatamente o horário que seu transporte está chegando na parada desejada.

Palavras-chave: Comunicação sem fio. Chirp Spread Spectrum. Segurança. Escalabilidade. Longo Alcance. Baixo Consumo

ABSTRACT

IMPLEMENTATION OF LORA NETWORK IN THE UFSM INTRACAMPUS TRANSPORT SYSTEM

AUTHOR: Matheus Piotroski Neis

ADVISOR: Carlos Henrique Barriquello

This work aims to make a brief analysis of the needs that the internet of things (IoT) is bringing to the world of LPWANs. In addition, we study the existing technologies and we compare the methods that each organization/company uses to fit the market of low power wide area networks. After describing the features of the main current technologies, a case study presents an implementation of the LoRa technology, developed by Semtech, together with the LoRaWAN protocol, sustained by LoRa Alliance. The referred study is composed by an UFSM internal bus location system, which allows users to know exactly the moment their transportation is arriving at the bus stop.

Keywords: Wireless Communication. Chirp Spread Spectrum. Security. Scalability. Long Range. Low Power

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de FHSS	14
Figura 2.2 – Exemplo de <i>Chirp</i>	14
Figura 2.3 – Exemplo de modulações ASK/OOK, FSK e PSK.	15
Figura 2.4 – Exemplos de topologias de rede.	16
Figura 2.5 – Padrões LPWAN e suas organizações desenvolvedoras.	18
Figura 2.6 – Mapa das tecnologias de comunicação sem fio.	19
Figura 2.7 – Trilateração entre um dispositivo e seus nós âncora.	21
Figura 2.8 – Modulação <i>LoRa Spread Spectrum</i>	24
Figura 2.9 – Demodulação <i>LoRa Spread Spectrum</i>	24
Figura 2.10 – Demodulação <i>LoRa Spread Spectrum</i> com ruído.	24
Figura 2.11 – Representação do comportamento de diversos SFs.	25
Figura 2.12 – Arquitetura de rede LoRaWAN.	28
Figura 2.13 – Segurança LoRaWAN.	31
Figura 2.14 – Fluxo para geolocalização LoRaWAN.	32
Figura 3.1 – Pontos de teste estático com distância em relação ao <i>gateway</i>	43
Figura 3.2 – Rota do ônibus interno da UFSM	44
Figura 3.3 – Mapa de cobertura linha do ônibus UFSM utilizando DR0	49
Figura 3.4 – Mapa de cobertura linha do ônibus UFSM utilizando DR2	50
Figura 3.5 – Mapa de cobertura linha do ônibus UFSM utilizando DR5	51
Figura 3.6 – Mapa de cobertura completa do campus e arredores.	52
Figura 3.7 – Mapa destacando regiões críticas para transmissão de dados pela rede LoRa	53
Figura 3.8 – Teste de abrangência do sinal LoRa	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 – Intensidades de sinal recebidas em relação à distância nos testes estáticos . .	46
Gráfico 3.2 – Desvio padrão das intensidades de sinal recebidas em relação à distância nos testes estáticos	47
Gráfico 3.3 – Razões sinal-ruído recebidas associadas à distância nos testes estáticos	47
Gráfico 3.4 – Desvio padrão das razões sinal-ruído recebidas associadas à distância nos testes estáticos	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Comparação entre SFs.	26
Quadro 2.2 – Comparação entre <i>Coding Rates</i>	27
Quadro 2.3 – Pacote <i>Uplink</i>	29
Quadro 2.4 – Pacote <i>Downlink</i>	29
Quadro 2.5 – PHY <i>payload structure</i>	29
Quadro 2.6 – MAC <i>payload structure</i>	29
Quadro 2.7 – <i>Frame Header Structure</i>	30
Quadro 2.8 – <i>Data Rates</i> parâmetros regionais AU915.	34
Quadro 3.1 – Média e desvio padrão da SNR e RSSI alcançados a 352 metros do <i>gateway</i> em 4 horas de teste variando a frequência.	45
Quadro 3.2 – Média e desvio padrão da SNR e RSSI alcançados a 352 metros do <i>gateway</i> em 4 horas de teste variando o Data Rate.	45
Quadro 3.3 – Média e desvio padrão da SNR e RSSI alcançados a 352 metros do <i>gateway</i> em 4 horas de teste variando a potência de transmissão.	46
Quadro 4.1 – Custos médios de Hardware - Energia e aquisição	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>3GPP</i>	3rd Generation Partnership Project
<i>ABP</i>	Activation-by-personalization
<i>ADR</i>	Adaptive Data Rate
<i>AES</i>	Advanced Encryption Standard
<i>API</i>	Application Programming Interface
<i>ASK</i>	Amplitude Shift Keying
<i>BPSK</i>	Binary Phase Shift Keying
<i>CSS</i>	Chirp Spread Spectrum
<i>DR</i>	Data Rate
<i>FDOA</i>	Frequency Difference of Arrival
<i>FFT</i>	Fast Fourier Transform
<i>FHSS</i>	Frequency-Hopping Spread Spectrum
<i>FSK</i>	Frequency Shift Keying
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>ID</i>	Identificador / Identifier
<i>ISM</i>	Industrial, Scientific and Medical radio bands
<i>JSON</i>	JavaScript Object Notation
<i>LAN</i>	Local Area Network
<i>LoRa</i>	Long Range
<i>LPWAN</i>	Low Power Wide Area Network
<i>LTE</i>	Long-Term Evolution
<i>MAC</i>	Medium Access Control
<i>M2M</i>	Machine-to-Machine
<i>MAN</i>	Metropolitan Area Network
<i>OOK</i>	On-Off Keying
<i>OTA</i>	Over-the-air activation
<i>PAN</i>	Personal Area Network

<i>PSK</i>	Phase Shift Keying
<i>QoS</i>	Quality of Service
<i>RSSI</i>	Received Signal Strength Indication
<i>SBC</i>	Single Board Computer
<i>SF</i>	Spreading Factor
<i>SNR</i>	Signal to Noise Ratio
<i>SO</i>	Sistema Operacional
<i>SPI</i>	Serial Peripheral Interface Bus
<i>SSID</i>	Service Set Identifier
<i>SSM</i>	Spread Spectrum Modulation
<i>TDOA</i>	Time Difference of Arrival
<i>TTN</i>	The Things Network
<i>USB</i>	Universal Serial Bus
<i>UTC</i>	Coordinated Universal Time
<i>WAN</i>	Wide Area Network

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	CONCEITOS TEÓRICOS	13
2.1	COMUNICAÇÃO SEM FIO	13
2.1.1	Modulação por espalhamento espectral	13
2.1.2	Topologias de redes de comunicação	16
2.2	LPWAN + IOT	17
2.2.1	Definição	17
2.2.2	Aplicações	19
2.2.3	Implicações	20
2.3	GEOLocalIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS	20
2.3.1	Método de multilateração	20
2.3.2	Geolocalização por análise de sinal	21
2.3.3	Geolocalização por <i>hardware</i> dedicado	22
2.4	LORA	23
2.4.1	Modulação <i>LoRa Spread Spectrum (LSS)</i>	23
2.4.2	Arquitetura rede LoRa	25
2.4.3	Spreading Factor	25
2.4.4	Coding Rate	26
2.4.5	LoRaWAN	27
2.4.6	Formato do pacote LoRaWAN	28
2.4.7	Segurança	30
2.4.8	Geolocalização	31
2.4.9	Servidor de aplicação	32
2.4.10	Configurações regionais	33
2.4.11	Principais aplicações	35
3	ESTUDO DE CASO	36
3.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	36
3.2	SELEÇÃO DO HARDWARE	36
3.2.1	Módulos de comunicação LoRa	36
3.2.2	Módulos GPS	37
3.2.3	Controladores	37
3.2.4	Projeto dispositivo de rastreamento	38
3.2.5	Gateways	38
3.3	DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO LORAWAN	38
3.3.1	LMIC	38
3.3.2	Implementação das configurações regionais	38
3.3.3	Modificação das janelas de recepção	39
3.4	EXPERIMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS	39
3.4.1	Uso de APIs da TTN - Aquisição de dados	40
3.4.2	Definição dos métodos de teste	40
3.4.3	Definição dos locais de teste	42
3.5	ANÁLISE DE DADOS	44
3.5.1	Determinação de padrões	44
3.5.2	Mapeamento da região de cobertura	52
4	RESULTADOS	55

4.1	RESULTADOS OBTIDOS.....	55
4.2	TRABALHOS FUTUROS	57
5	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO RASTREADOR DO ÔNIBUS	63

1 INTRODUÇÃO

Entre os anos de 2010 e 2011, Hans Vestburg - CEO da Ericsson na época - e Dave Evans - Chefe de Futurismo da Cisco na época - afirmaram que para 2020, seria alcançado o marco de 50 Bilhões de dispositivos conectados. Em 2016 a meta baixou um pouco, especulando-se pelos mesmos, algo em torno de 30 Bilhões de dispositivos conectados (Spectrum IEEE, 2016). Independente da previsão que se concretize, a quantidade de dispositivos é assombrosa.

Os dispositivos que caracterizam a internet das coisas (IoT - Internet of Things) precisam necessariamente de conexão para terem algum valor nesse mundo, caso contrário, não serviriam nem como peso de porta, devido seus às suas dimensões reduzidas. Talvez servissem como chaveiros, mas chaveiros conectados podem ser usados como chaves, logo, os chaveiros se tornam obsoletos. Parece confuso, mas é lógico, a internet das coisas está mudando o mundo e toda mudança tecnológica requer novas definições.

Para mudança acontecer, é preciso de conexão e que seja sem fio. Desse modo, o meio é compartilhado e logo aparecem questões de segurança e organização, para que tudo funcione de forma ordenada e sem intrusos. Após a solução desses problemas chega-se ao passo que praticamente contrapõe os pontos anteriores: a energia. Dispositivos conectados por tempo integral, pequenos e sem fio, precisam de baterias (na maior parte das vezes) que não podem ter dimensões muito grandes e devem ser capazes de alimentar o dispositivo por anos. Por esse motivo um projeto eficiente que conte com componentes de baixíssima potência e cumpra com o compromisso da segurança e organização da rede é fundamental no ramo da internet das coisas.

Seguindo o caminho da conexão, já que todos dispositivos estão conectados, porque não saber a localização de cada um deles? É isso que se entende, a partir do texto publicado pela Semtech em 2016 (Semtech, 2016b), no qual afirma que segundo Emil Berthelsen, “15 Bilhões de dispositivos estarão conectados até 2020 sendo que metade deles terá informações de localização e um terço dependerá criticamente dessa informação”. É uma previsão mais tímida quanto ao número de dispositivos, mas revela mais um problema a ser solucionado.

Diversas organizações apostam na área da internet das coisas, seguindo as necessidades do mercado e empregando suas próprias soluções, algumas colocando suas tecnologias a disposição de outras empresas para a formação de produtos, outras regendo padrões, algumas criando e disponibilizando redes pelo do mundo para serem utilizadas através de contratos e outras adaptando as tecnologias existentes para aproveitar a rede de telefonia celular já instalada. Muitas dessas organizações já introduziram suas tecnologias na área das LPWANs (*Low Power Wide Area Networks*) que possuem grande capacidade de alcance, baixa transmissão de dados e protocolos de comunicação que permitem um baixo consumo de energia. Devido a sua simplicidade, as LPWANs não se encaixam em todos os aspectos da internet das coisas, mas preenchem uma lacuna ainda pouco explorada nesse campo. Nessa linha de raciocínio a

Semtech apresentou a tecnologia LoRa, que possui técnicas de modulação e comunicação avançadas, objetivando a baixa taxa de dados e alta capacidade de transmissão a longas distâncias, imunidade a ruído, alta sensibilidade na recepção e baixo consumo de energia, além de oferecer uma característica competitiva que é a geolocalização. Através da LoRa Alliance, a Semtech vem disseminando sua tecnologia com empresas parceiras que transformam seus rádios transceptores em produtos.

Neste presente trabalho são abordadas as principais tecnologias LPWAN existentes, desenvolvidos testes com dispositivos que utilizam o protocolo LoRaWAN e tecnologia LoRa para verificar a efetividade do seu funcionamento e de suas características. O objetivo final é proporcionar um dispositivo de baixo custo de hardware e baixo consumo de energia para monitoração da posição geográfica do transporte intracampus da UFSM. Para isso são levantadas questões sobre propagação de sinais sem fio, redes de comunicação, geolocalização de dispositivos - inclusive através da própria rede LoRaWAN -, área de cobertura de redes, implementação da comunicação LoRa e protocolo LoRaWAN em controladores.

2 CONCEITOS TEÓRICOS

2.1 COMUNICAÇÃO SEM FIO

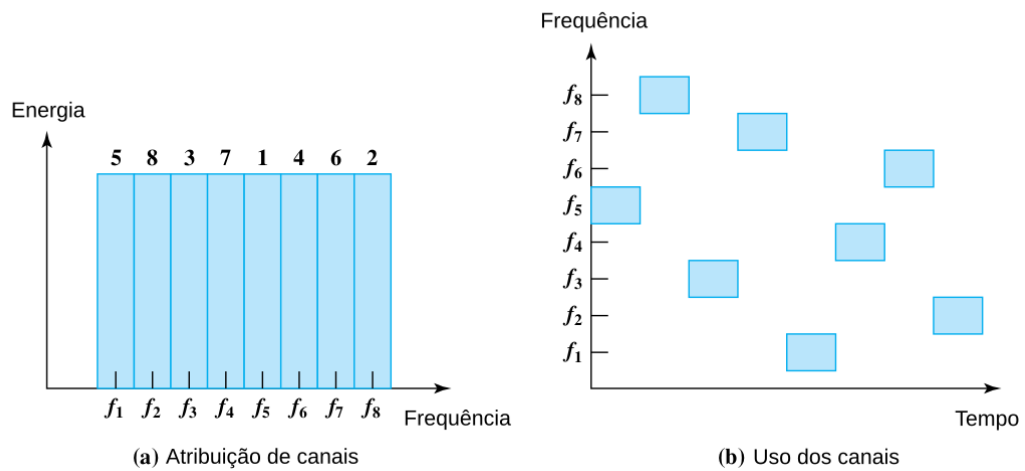
A comunicação sem fio, utiliza da irradiação eletromagnética para a propagação do sinal emitido pelo transmissor até seus possíveis receptores. O caminho deste sinal, pode ser bastante afetado por obstáculos ou pelas propriedades de difração e reflexão das ondas eletromagnéticas. Caminhos sem visada direta são de difícil análise, tornando seu comportamento quase aleatório, sendo possível apenas previsões de perdas, utilizando métodos estatísticos.

2.1.1 Modulação por espalhamento espectral

A técnica de modulação por espalhamento espectral (*Spread Spectrum Modulation - SSM*) foi desenvolvida inicialmente para uso militar e de inteligência. Seu intuito era através de uma maior largura de banda tornar mais difícil o bloqueio e a interceptação das comunicações (STALLINGS, 2007). Sua invenção aconteceu em 1940 e patenteada por George e Kiesler (1942).

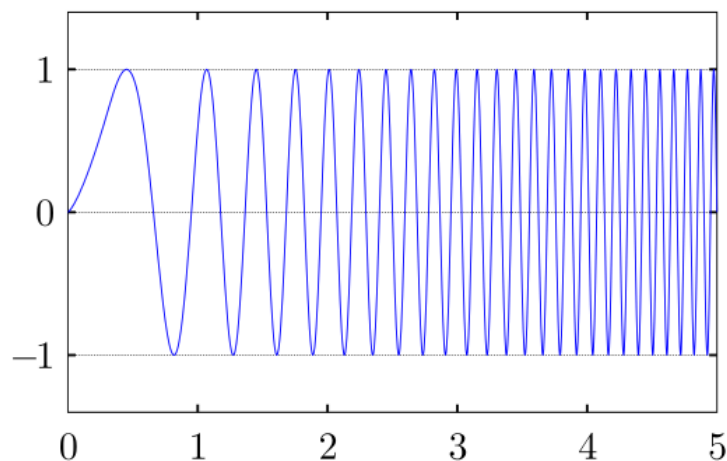
Um formato de modulação que utiliza espalhamento espectral é o *Frequency-hopping spread spectrum* (FHSS). A modulação funciona através da troca de canais de forma pseudo-aleatória, onde transmissor e receptor devem estar sincronizados e devem conhecer a sequência de trocas um do outro. A Figura 2.1 exemplifica a modulação. Este foi o primeiro formato utilizado das modulações por espalhamento espectral.

Figura 2.1 – Exemplo de FHSS



Fonte: Adaptado de Stallings (2007)

Uma modulação menos comum é a *Chirp*¹ *Spread Spectrum* (CSS) que foi desenvolvida para aplicações de radar em 1940. Nos últimos vinte anos, vem recebendo mais atenção devido a sua robustez, que sofre menos com a ação do fenômeno de multipercurso, desvanecimento, efeito Doppler e bloqueios por outros dispositivos na mesma banda (Semtech, 2015). Ao contrário do FHSS, não há um código pseudo-aleatório para codificar a mensagem, a modulação varre periodicamente todo o espectro. A Figura 2.2 apresenta o comportamento de um símbolo *Chirp* no tempo.

Figura 2.2 – Exemplo de *Chirp*

Fonte: Sghosly (2017)

A transmissão de dados binários necessita de uma codificação digital/analógica que deve

¹Chirp se refere a um sinal que cresce ou decresce em frequência através do tempo.

ser empregada antes do modulador. Estas codificações podem seguir diversos padrões, como por exemplo:

Amplitude Shift Keying (ASK) - Na codificação ASK, os diferentes bits são representados em diferentes amplitudes de sinal. Esta codificação é bastante afetada por ruídos.

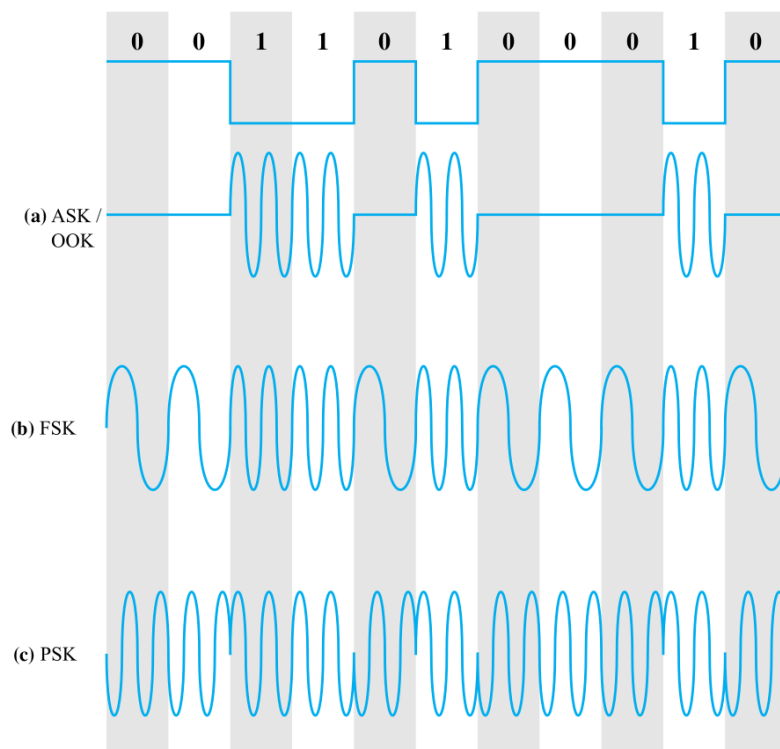
Frequency Shift Keying (FSK) - Na codificação FSK, a diferenciação de bits é feita pela seleção de diferentes frequências pré-definidas, onde cada uma pode representar um valor de bit ou de símbolo.

Phase Shift Keying (PSK) - Nessa codificação, a fase do sinal é alterada em determinados ângulos para indicar os bits ou símbolos que estão sendo transmitidos.

On-Off Keying (OOK) - Na codificação OOK, em geral, o bit 1 é representado pela presença de portadora e o bit 0 pela falta da mesma. Essa modulação pode ser considerada uma ASK com apenas um nível e dois estados.

A Figura 2.3 demonstra exemplos de aplicação das modulações ASK, OOK, FSK e PSK.

Figura 2.3 – Exemplo de modulações ASK/OOK, FSK e PSK.



2.1.2 Topologias de redes de comunicação

As redes de comunicação de dados podem ser divididas de acordo com sua área de abrangência:

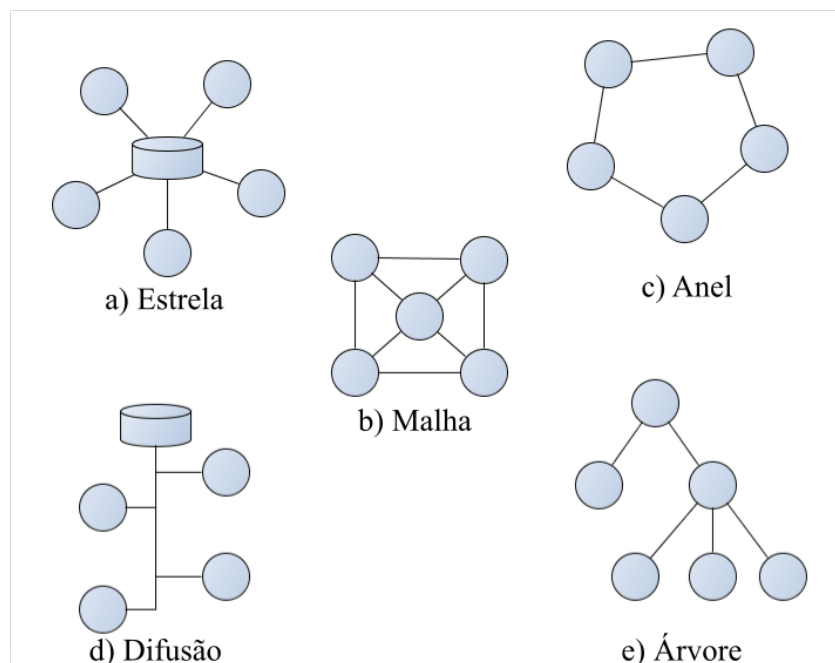
- Redes Pessoais (Personal Area Networks - PANs);
- Redes Locais (Local Area Networks - LANs);
- Redes Metropolitanas (Metropolitan Area Networks - MANs);
- Redes de Grande Área (Wide Area Networks - WANs).

Mas também existem redes mais específicas que são denominadas por algumas características especiais, como por exemplo:

- Redes de Grande Área e Baixa Potência (Low Power Wide Area Networks - LPWANs)

Tais redes podem ser distribuídas em formatos diferentes e a conectividade entre os nós da rede caracteriza a topologia, dando seu nome. A Figura 2.4 mostra as principais topologias e seus nomes.

Figura 2.4 – Exemplos de topologias de rede.



2.2 LPWAN + IOT

2.2.1 Definição

A disseminação dos sensores e transceptores pelo mundo ocasionou o aparecimento de um novo nicho que está sendo chamado de “Internet das Coisas” (IoT - *Internet of things*) que promete revolucionar o mundo em uma quantidade de fatores quase inimaginável (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017), conectando tudo e todos à internet e gerando uma gigantesca quantidade de pequenos pacotes de informação. Essa rede massiva nos leva a alguns questionamentos sobre a tecnologia de comunicação que deve ser empregada para que esse dado chegue íntegro à internet. Muitos destes sensores tem necessidades em comum:

- Baixo consumo de energia;
- Operados por bateria;
- Permitem alta latência;
- Baixa transmissão de dados;
- Baixo custo;
- Capacidade de transmissão a longas distâncias.

Tais necessidades foram percebidas por uma startup chamada SIGFOX² que em 2009 iniciou a construção da primeira rede LPWAN "atual"(Link Labs, 2017b). Após a entrada da rede SIGFOX no mercado, diversas outras organizações desenvolveram suas próprias soluções em redes LPWAN. Uma das principais é a LoRa Alliance³ que diferentemente da SIGFOX, desenvolveu a rede e licencia empresas para vender seus gateways e transdutores mas não cobra pelo uso da rede. Já a SIGFOX fornece a infraestrutura de rede, vende os transdutores e cobra pelo uso da rede. Outras organizações que operam em faixas de frequência não licenciada estão esforçando-se para emergir suas soluções no mundo das LPWANs, sendo algumas dessas organizações: Ingenu, Weightless, ETSI. Em contrapartida, as empresas de telefonia celular movem grandes esforços para tornar possível a sua participação nesse mercado, através do desenvolvimento dos padrões LTE-M e NB-IoT pela 3GPP. O padrão LTE-M poderia ser utilizado através de uma atualização no *firmware* nos rádios LTE (4G) (Link Labs, 2017c) e o padrão NB-IoT que poderia ocupar uma das faixas dos rádios GSM também utilizados atualmente (Link Labs, 2017a). A grande variedade de redes LPWAN sendo desenvolvidas traz a necessidade de uma padronização, para evitar o caos entre as tecnologias que estão emergindo e com as atuais também. Com os olhos nisso, a IEEE vem desenvolvendo novas especificações para as camadas

²www.sigfox.com

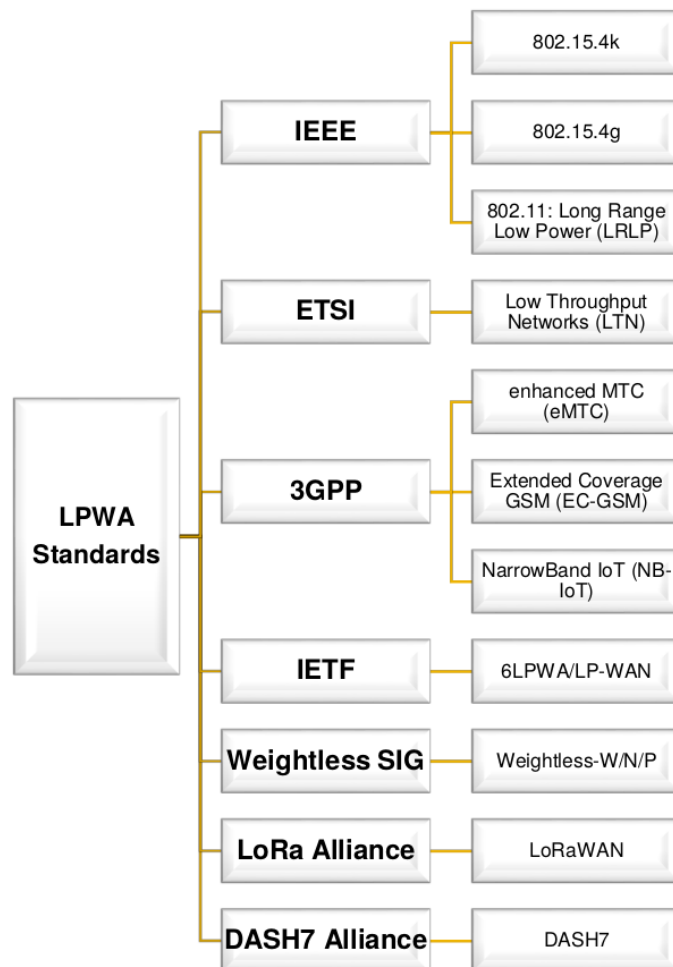
³www.lora-alliance.org

MAC dos padrões 802.15.4 e 802.11 com o intuito de estender a capacidade de transmissão a longas distâncias e reduzir o consumo. Mais especificamente, a IEEE está regulamentando os seguintes padrões:

- 802.15.4k - Voltado ao baixo consumo de energia, estruturas mínimas de rede, médio/grande alcance e banda ISM Sub-GHz e 2.4 GHz;
- 802.11ah - Adaptação direta do padrão WLAN com redução no tamanho dos *frames*, *headers*, *beacons* e a possibilidade de operar na banda Sub-GHz. Alcance médio/pequeno para o padrão LPWAN.

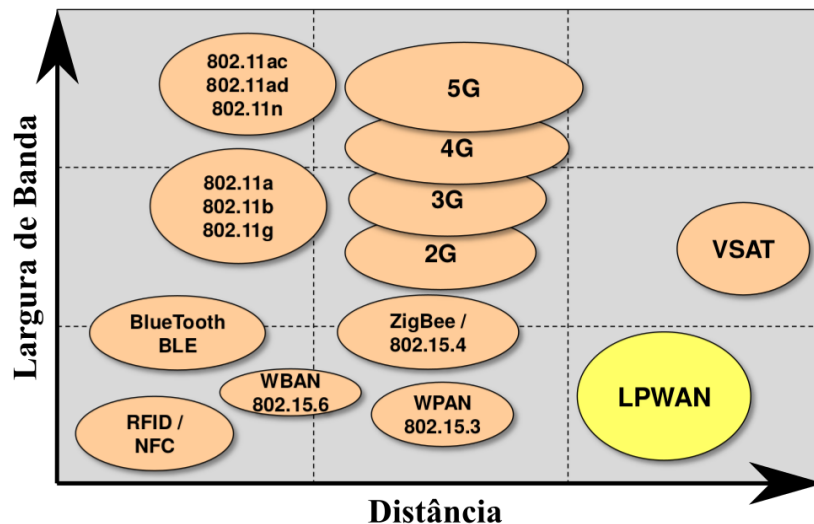
A Figura 2.5 mostra os principais padrões LPWAN desenvolvidos e em desenvolvimento juntamente com suas organizações.

Figura 2.5 – Padrões LPWAN e suas organizações desenvolvedoras.



Na Figura 2.6 é mostrada a posição das redes LPWAN em relação às outras tecnologias de comunicação sem fio disponíveis no mercado.

Figura 2.6 – Mapa das tecnologias de comunicação sem fio.



Fonte: Adaptado de Egli (2015)

De forma geral, todas as tecnologias LPWAN utilizam protocolos e modulações simples, que não demandam grande processamento e hardware de alta qualidade/precisão. Para caracterizar módulos LPWAN, estão sendo usadas como características mínimas potência de transmissão em torno de 10 dBm, ter a capacidade de transmitir dados por dezenas de quilômetros e ter uma vida útil de até 10 anos com pilhas do tipo “AA” (ROBERT, 2016). As estações de recepção (*gateways*) também possuem restrições, devendo ter sua sensibilidade de recepção elevada (≈ -140 dBm) e capacidade para comportar milhares de dispositivos conectados, pois preponderantemente as redes são de topologia estrela, onde apenas uma estação (mais cara) fica responsável por uma grande área e por todos dispositivos que estão nessa área de cobertura.

2.2.2 Aplicações

As redes LPWANs surgiram para melhorar as soluções de monitoração de cidades inteligentes, aplicações pessoais de IoT, *Smart Grids*, patrimônios industriais, agricultura, automação residencial, logística, monitoramento da vida selvagem e localização em geral (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017); que são exemplos de aplicações nas quais não são necessários grandes quantidades de dados enviados, mas que em algumas situações necessitam de módulos de comunicação com grande vida útil, baixíssimo consumo de energia e por vezes localização do dispositivo.

Um exemplo claro é o uso de dispositivos LPWAN na logística, onde uma carga específica precisa ser transportada e armazenada; deve ser mantida em uma temperatura constante e esse transporte/armazenamento pode levar vários dias. Para uma situação dessas, considerando que há cobertura na região, seria completamente plausível utilizar um sistema LPWAN, onde por uma central seria possível verificar o andamento do processo de transporte, verificar a temperatura que a carga está sendo submetida (com certa latência), além de possibilitar a verificação de possíveis violações da carga e a posição de onde cada passo aconteceu.

2.2.3 Implicações

Naturalmente, em decorrência dos benefícios alcançados pelas redes LPWANs, existem limitações recorrentes na maioria dessas redes. Para gastar menos energia, essencialmente os dispositivos da rede ficam desconectados na maior parte do tempo, dificultando e causando latência no *downlink* de dados. Os métodos de modulação e codificação são simplificados, a fim de diminuir os custos em energia e *hardware*, o que leva a grandes restrições de taxa de dados transmitidos para permitir uma maior escalabilidade do sistema. Algumas das tecnologias têm restrições de tempo de transmissão ou de quantidade de dados por hora, o que pode causar latência de comunicação no *uplink* dependendo da quantidade de dados. Aplicações com exigência de *QoS*, devido às questões de latência não são necessariamente bem vindas para esse tipo de tecnologia. A escalabilidade do sistema, mesmo que de forma teórica, é garantida pela maioria das organizações, mas diversas discussões colocam em dúvida essa *feature*, principalmente devido às simplificações na modulação e codificação do sinal (LoRa Alliance, 2015; RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017; GEORGIU; RAZA, 2017; INGENU, 2017).

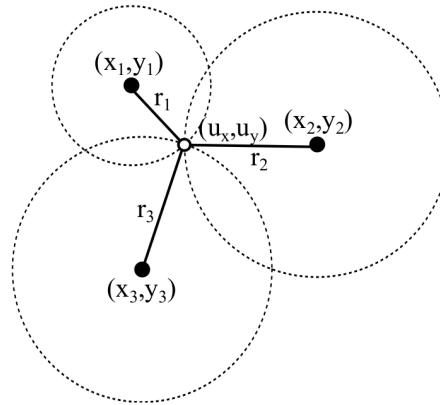
2.3 GEOLOCALIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS

2.3.1 Método de multilateração

Multilateração é um método de localização que parte de parâmetros retirados da transmissão de dados entre dispositivos sem fio. Através do conhecimento prévio da localização de pelo menos 3 (mais especificamente trilateração nesse caso) dispositivos chamados nós âncora (MÜLLER et al., 2014), é possível determinar a posição de um quarto dispositivo em meio a rede. Os parâmetros utilizados podem variar de acordo com a aplicação, o que leva a diferentes cálculos para determinação da relação entre os nós âncora e o dispositivo. A Figura 2.7 mostra a definição dos raios da circunferência formada entre cada nó âncora e o dispositivo. Com essa informação é possível, através da trigonometria, determinar a posição real do dispositivo em

questão.

Figura 2.7 – Trilateração entre um dispositivo e seus nós âncora.



Fonte: Müller et al. (2014)

2.3.2 Geolocalização por análise de sinal

Os parâmetros utilizados na determinação da posição de dispositivos tem diversas fontes e dependem do hardware disponível (WND Brasil, 2017). São eles:

RSSI - *Received Signal Strength Indicator* (indicador de potência de sinal recebida) é o mais simples de todos, sendo que a maioria dos dispositivos transdutores têm a capacidade de determinar a potência de sinal recebida. Se relacionarmos essa potência recebida com modelos de propagação podemos prever com certa precisão qual a distância entre o transmissor e receptor. O grande problema dessa abordagem é a sensibilidade que esse parâmetro tem com qualquer obstáculo no caminho. Esse parâmetro varia demasiadamente com a difração e o fenômeno de multipercurso. Mapas de predição podem ser montados para indicar a possibilidade do dispositivo estar em determinada localização, mas a precisão ainda é baixa.

TDoA - *Time Difference of Arrival* (diferença de tempo de chegada) é o método mais utilizado. Possui algumas exigências bem específicas, mas permite uma grande precisão na determinação da posição. Das exigências, é necessária uma precisão na ordem dos nanosegundos e uma ótima sincronização entre os dispositivos. Essas necessidades, quando garantidas, permitem uma precisão de poucos metros na localização. A precisão da posição encontrada neste método depende da largura de banda do sinal (BW), que na presença de multipercurso é limitada em $1 / BW$, logo, para um sinal de 1 MHz a precisão estaria em 300 metros (KRIZMAN; BIEDKA; RAPPAPORT, 1997).

FDoA - *Frequency Difference of Arrival* (diferença de frequência de chegada) (HO; CHAN, 1997) é um método pouco utilizado, que é equivalente ao TDOA e se baseia no movimento relativo entre transmissor e receptor. A partir do conhecimento do vetor de velocidade e dos pontos de observação é possível prever o deslocamento *Doppler* e assim determinar a posição estimada do emissor. A necessidade de grandes quantidades de dados para os cálculos, deixa pouco interessante essa abordagem.

AoA - *Angle of Arrival* (ângulo de chegada) é um método com boa precisão, mas com um desafio técnico grande em relação as antenas, que devem ser muito bem posicionadas e não podem perder sua referência. O dispositivo responsável por receber o dado e determinar o ângulo de chegada deve possuir um conjunto de antenas direcionais ou utilizar de antenas com feixe de onda estreito controlados de forma eletro-mecânica, permitindo a discriminação do ângulo em que o dado está chegando (KRIZMAN; BIEDKA; RAPPAPORT, 1997). Esse tipo de abordagem sofre com o fenômeno do multipercurso e geralmente é utilizada de forma conjunta com outros métodos.

2.3.3 Geolocalização por *hardware* dedicado

A localização pode ser feita pelo próprio dispositivo através de *hardwares* adicionais, mas em contrapartida o dispositivo tem seu consumo e custo aumentados (WND Brasil, 2017). O principal meio para auto-localização é o uso de um GPS integrado ao dispositivo. O uso de um módulo GPS causa um considerável aumento de custo e aumento de consumo de energia, porém o próprio dispositivo tem informações sobre sua localização, velocidade, hora e sentido de movimento; informações que podem ser úteis para algumas aplicações. Outro *hardware* que pode ser utilizado para localização do dispositivo é um módulo de comunicação *Wi-Fi* que não traz um custo tão elevado em energia nem em preço. Basicamente a operação do sistema consiste em efetuar uma varredura das redes *Wi-Fi* próximas e salvar todos SSIDs encontrados com suas respectivas forças de sinal. Com essa tabela salva, é possível descobrir a localização aproximada através de serviços específicos, como a API de geolocalização do Google (Google Maps APIs, 2017). Por ser necessária conexão com a internet para terminar o processo de localização, há basicamente 3 opções para ser seguidas:

1. Conectar-se às redes *Wi-Fi* próximas - O que se torna inviável pois seria necessário ter em um banco de dados os SSIDs e senhas de todas redes na área de abrangência desejada e estabelecer conexão com um deles, provavelmente em movimento, o que demandaria um grande custo em energia.
2. Possuir um hardware GPRS - Além de elevar o custo de hardware, o custo em energia é

muito elevado e a necessidade de um plano de dados, leva a outro custo recorrente para manter a conexão com a internet. Exceto por esse pontos, essa é a uma opção para que o dispositivo tenha sua localização atualizada na sua memória.

3. Enviar a tabela através de uma rede LPWAN - O uso de uma rede LPWAN para enviar a tabela gerada a partir da Wi-Fi, torna o custo em hardware nulo, se considerarmos que esse dispositivo deve possuir um meio de comunicação com o mundo externo além do hardware *Wi-Fi*. Em relação a energia o custo de uma LPWAN é mínimo perante a operação do módulo *Wi-Fi*.

A precisão desta abordagem é pior que o GPS, porém é satisfatória na maioria dos casos. Em casos de localização dentro de edificações, a precisão com o uso de *Wi-Fi* pode inclusive superar a do GPS.

2.4 LORA

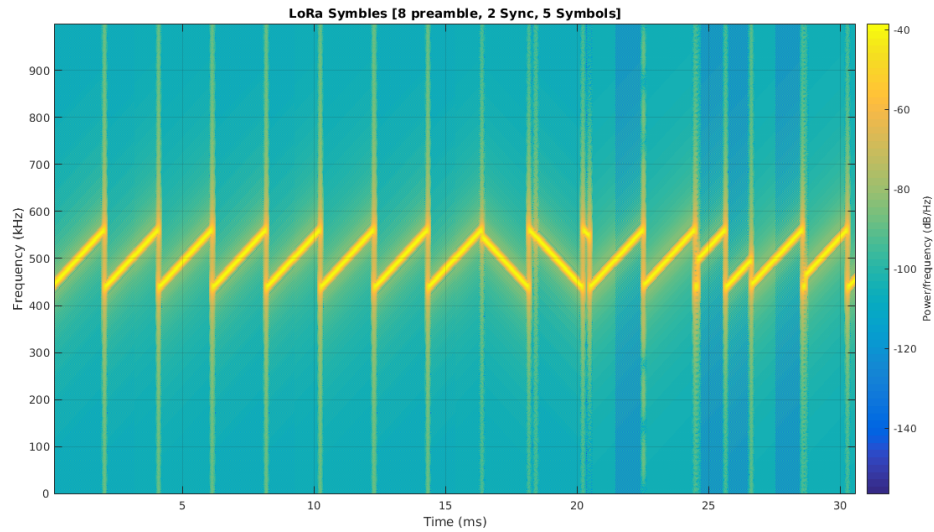
LoRa é a camada física da rede de longa distância criada pela Semtech. O nome LoRa provém de “*Long Range*” (Longo Alcance). Essa tecnologia sem fio se encaixa na categoria de LPWAN tendo grande alcance, baixo consumo de energia e baixo custo. Opera nas frequências livres de licença (ISM - Industrial Scientific and Medical).

2.4.1 Modulação *LoRa Spread Spectrum* (LSS)

A modulação utilizada na tecnologia LoRa é uma variação da *Chirp Spread Spectrum*, o que a diferencia de todas outras redes presentes no mercado atualmente (LoRa Alliance, 2015). A modulação foi desenvolvida inicialmente por uma empresa francesa chamada Cycleo que foi comprada pela Semtech, sendo então nomeada como *LoRa Spread Spectrum*. Essa modulação possui características diferenciadas das outras alternativas tradicionais de comunicação por espalhamento espectral (Semtech, 2015), em especial, como pode ser visto na Figura 2.8, utiliza-se *Chirps* inversos para sincronização e defasagem de *Chirps* para codificar os símbolos. Essa modulação, tem como característica a grande capacidade de transmissão e recepção, mesmo com uma baixa potência. Sua capacidade de superar ruído permite que mesmo com uma razão sinal-ruído negativa, sendo a potência do ruído maior que do sinal recebido, o receptor ainda tem a capacidade de decodificar a mensagem enviada.

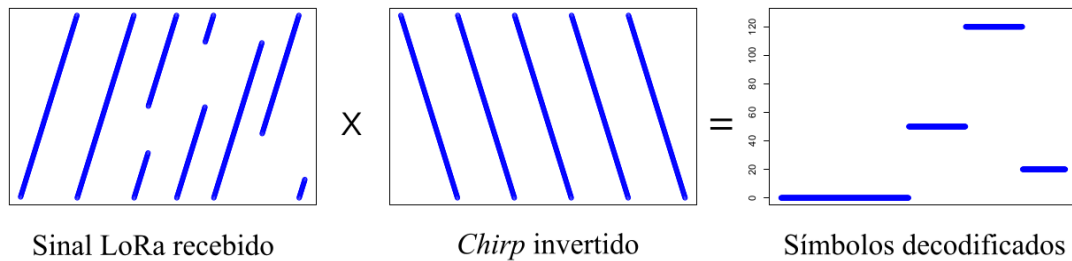
A modulação do sinal, como citado anteriormente, utiliza a defasagem dos *Chirps* para identificação dos símbolos. Essa técnica simplifica a atuação do demodulador, que deve gerar *Chirps* inversos, multiplicar os dois sinais e analisar a FFT do resultado para poder identificar os símbolos decodificados. A Figura 2.9 apresenta como ocorre a demodulação do sinal.

Figura 2.8 – Modulação *LoRa Spread Spectrum*.



Fonte: Sghosly (2017)

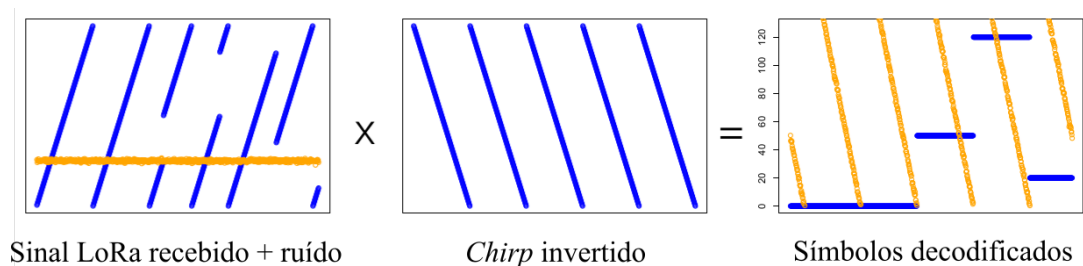
Figura 2.9 – Demodulação *LoRa Spread Spectrum*.



Fonte: Adaptado de Telkamp (2015)

O demodulador sofre pouco com interferências de sinais com largura de banda estreita pois após a demodulação esses sinais são facilmente diferenciados dos símbolos referentes a comunicação LoRa conforme apresenta a Figura 2.10.

Figura 2.10 – Demodulação *LoRa Spread Spectrum* com ruído.



Fonte: Adaptado de Telkamp (2015)

Os benefícios da modulação LoRa giram entorno da simplicidade de modulação e demodulação, alta resistência às interferências dentro e fora da sua banda, com alta imunidade ao multipercorso e desvanecimento do sinal, resistência ao efeito Doppler que permite o uso em dispositivos móveis e com grande variação nos cristais de *clock*, além de possuir alta sensibilidade na recepção.

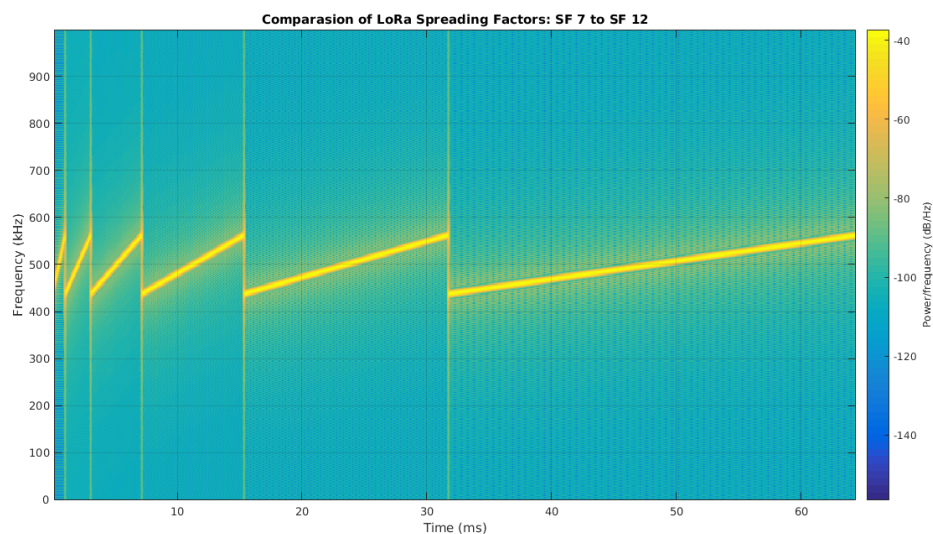
2.4.2 Arquitetura rede LoRa

A rede LoRa é voltada ao baixo consumo, longo alcance e baixa transferência de dados. A frequência de operação depende da região na qual o dispositivo está situado, mas de forma geral as bandas utilizadas pela rede LoRa são sub-GHz dentro da ISM (434 MHz, 868 MHz e 915 MHz) (BAHARUDIN; YAN, 2016). A potência de transmissão e a transferência máxima de dados dependem do *Data Rate* e da região de operação.

2.4.3 Spreading Factor

Spreading Factor - SF (fator de espalhamento) corresponde ao período que a modulação leva entre cada varredura completa do espectro. Quanto maior o fator de espalhamento, mais lenta é a varredura da largura de banda que está sendo usada. Os valores de SF podem variar entre 7 e 12. Pela Figura 2.11 é possível notar que a cada unidade de SF aumentada o tempo de espalhamento é dobrado.

Figura 2.11 – Representação do comportamento de diversos SFs.



A escolha do SF afeta diretamente o tempo de transmissão e a capacidade de recepção do sinal. Cada bit é composto por diversos *chips*⁴ que tem relação direta com o SF (Semtech, 2013):

$$R_c = 2^{SF} R_b, \quad (2.1)$$

Em que:

R_c = Taxa de *Chips*

R_b = Taxa de bits

Já o tempo de transmissão é afetado também pela largura de banda utilizada (*BW* - *Bandwidth*). A relação entre *BW* e a taxa de *chips* na modulação LoRa é de 1 *chip* por segundo por Hertz, ou seja, para uma largura de banda de 125 kHz tem-se uma taxa de 125 kchip/seg.

Portanto, a taxa de bits transmitidos é dada por (Semtech, 2015):

$$R_b = SF \frac{1}{\frac{2^{SF}}{BW}}, \quad (2.2)$$

Em que:

SF = *Spreading Factor*

BW = Largura de banda (*Hz*)

O Quadro 2.1 mostra as sensibilidade no receptor para cada SF:

Quadro 2.1 – Comparação entre SFs.

Modo	Taxa de bits (kb/s)	Sensibilidade (dBm)	Δ (dBm)
FSK	1,2	-122	-
LoRa SF=12	0,293	-137	+ 15
LoRa SF=11	0,537	-134,5	+12,5
LoRa SF=10	0,976	-132	+10
LoRa SF=9	1757	-129	+7
LoRa SF=8	3125	-126	+4
LoRa SF=7	5468	-123	+1

Fonte: Adaptado de Semtech (2015)

2.4.4 Coding Rate

Os dispositivos LoRa empregam a técnica *Forward Error Correction* - FEC que permite a recuperação de bits em caso de interferência no momento da transmissão. Essa operação

⁴Menor sinal transmitido em um sistema de comunicação sem fio

emprega redundância na mensagem e portanto causa uma sobrecarga na transmissão. A taxa de sobrecarga é exemplificada pelo Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Comparação entre *Coding Rates*.

<i>Coding Rate</i>	Taxa de sobrecarga (bits)
4/5	1,25
4/6	1,5
4/7	1,75
4/8	2

Fonte: Adaptado de SX1272 (2017)

2.4.5 LoRaWAN

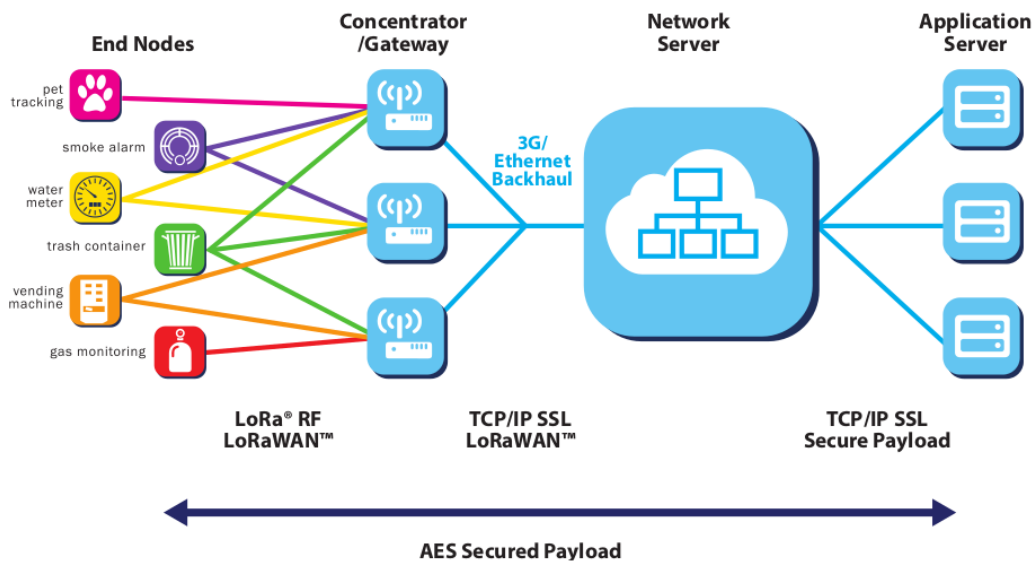
LoRaWAN é o protocolo de comunicação desenvolvido para ser utilizado juntamente com a camada física LoRa. Possui taxa de dados entre 300 bps até 5,5 kbps (com opções de alta velocidade utilizando FSK em 11 kbps e 50 kbps) (TELKAMP, 2016).

Na rede LoRaWAN os dispositivos finais enviam de forma assíncrona pacotes para qualquer *gateway* que esteja na sua área de cobertura. A topologia da rede se baseia numa configuração estrela. O acesso ao meio segue o princípio do protocolo ALOHA, que permite aos dispositivos ficarem em estado de baixa energia pela maior parte do tempo, além de que, por usar bandas de frequência sem licença, o acesso ao meio não pode ser garantido, o que torna complicado o uso de técnicas de múltiplo acesso, além de serem mais custosas energeticamente. Os *gateways* são desenvolvidos para serem simples e com *hardware* barato. Sua função principal é ser apenas uma passagem para o *network server*. Qualquer pacote válido que esteja na sua banda de operação será interceptado pelo *gateway* e enviado para o *network server*, não há distinção nesse nível da rede. Vários *gateways* podem interceptar o mesmo pacote. Para que seja possível o envio dos dados para o *network server*, é necessário que o *gateway* possua conexão com a internet, portanto, cada fabricante propõe as suas soluções que podem ser tanto de *Ethernet* como de telefonia móvel ou satélite. O *network server* é o principal articulador da rede LoRaWAN. Ele é responsável por selecionar os melhores *gateways* para *downlink* (tanto *acknowledgments* quanto dados) e por verificar os dados que um ou mais *gateways* receberam de um dispositivo final, eliminando cópias e direcionando os dados para as respectivas aplicações que estão aptas a receber os pacotes (Semtech Force, 2016b). A Figura 2.12 apresenta a arquitetura completa de uma rede LoRaWAN

Uma das características principais dos dispositivos finais da rede LoRaWAN é a classe na qual eles estão operando. Existem 3 classes e são divididas da seguinte forma:

- Classe A: Essa classe deve ser suportada em todos dispositivos. É a classe mais econômica em energia e somente abre janelas de recepção após seus envios.

Figura 2.12 – Arquitetura de rede LoRaWAN.



Fonte: LoRa Alliance (2015)

- Classe B: Dispositivo com eficiência energética intermediária, possui janelas de recepção pré programadas controladas por sinalizadores (*beacon*) da rede.
- Classe C: Dispositivos fundamentalmente conectados à rede elétrica, não tem latência para recepção e apenas deixam de receber no momento que estão enviando.

O LoRaWAN utiliza o conceito de taxa de dados (DR - *Data Rate*) como configuração para transmissão de dados. Os DRs são definidos pelo *Spreading Factor*, *Bandwidth* e pela configuração regional que o dispositivo está operando (ver 2.4.10 - Configurações Regionais).

Uma otimização criada para melhorar a eficiência energética e de rede é o *Adaptive Data Rate* (ADR) que adapta o DR do dispositivo final através de indicações do *gateway* recebidas via *downlink*. As indicações do *gateway* informam ao dispositivo quando o sinal está chegando muito forte, sendo desnecessário o gasto excessivo em potência ou tempo de transmissão, podendo então, configurar-se para um DR mais alto, ou seja, com maior taxa de transferência e menor tempo de transmissão. Em função do ADR responder de acordo com o histórico de transmissões, não é recomendável aplicar em dispositivos móveis.

2.4.6 Formato do pacote LoRaWAN

Os formatos de pacote para *uplink* e *downlink* são diferentes no protocolo LoRaWAN, sendo eles definidos pelos Quadros 2.3 e 2.4.

Quadro 2.3 – Pacote *Uplink*

Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload	CRC
----------	------	----------	------------	-----

Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2017b)

Quadro 2.4 – Pacote *Downlink*

Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload
----------	------	----------	------------

Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2017b)

Em que:

- PHDR = LoRa *physical header*

O PHYPayload (*PHY payload structure*) pode ser dividido em:

Quadro 2.5 – PHY *payload structure*

MHDR	MACPayload	MIC
ou		
MHDR	Join Rejoin Request	MIC
ou		
MHDR	Join-Accept	

Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2017b)

Em que:

- MHDR = MAC *header*;
- Join/Rejoin Request = Solicitação para entrada na rede;
- Join Accept = Confirmação de entrada na rede;

O MACPayload (*MAC payload structure*) é dividido em:

Quadro 2.6 – MAC *payload structure*

FHDR	FPort	FRMPayload
------	-------	------------

Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2017b)

Em que:

- FPort = 0 indica que FRMPayload possui um comando MAC que deve ser processado, valores de 1 a 223 são específicos para camada de aplicação e devem ser repassados a ela;
- FRMPayload = caso FPort seja diferente de 0, representa o *payload* da mensagem. O tamanho do *payload* depende dos parâmetros regionais e do *Data Rate* utilizados.

O FHDR (*Frame Header Structure*) é dividido em:

Quadro 2.7 – *Frame Header Structure*

DevAddr	FCtrl	FCnt	FOpts
---------	-------	------	-------

Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2017b)

Em que:

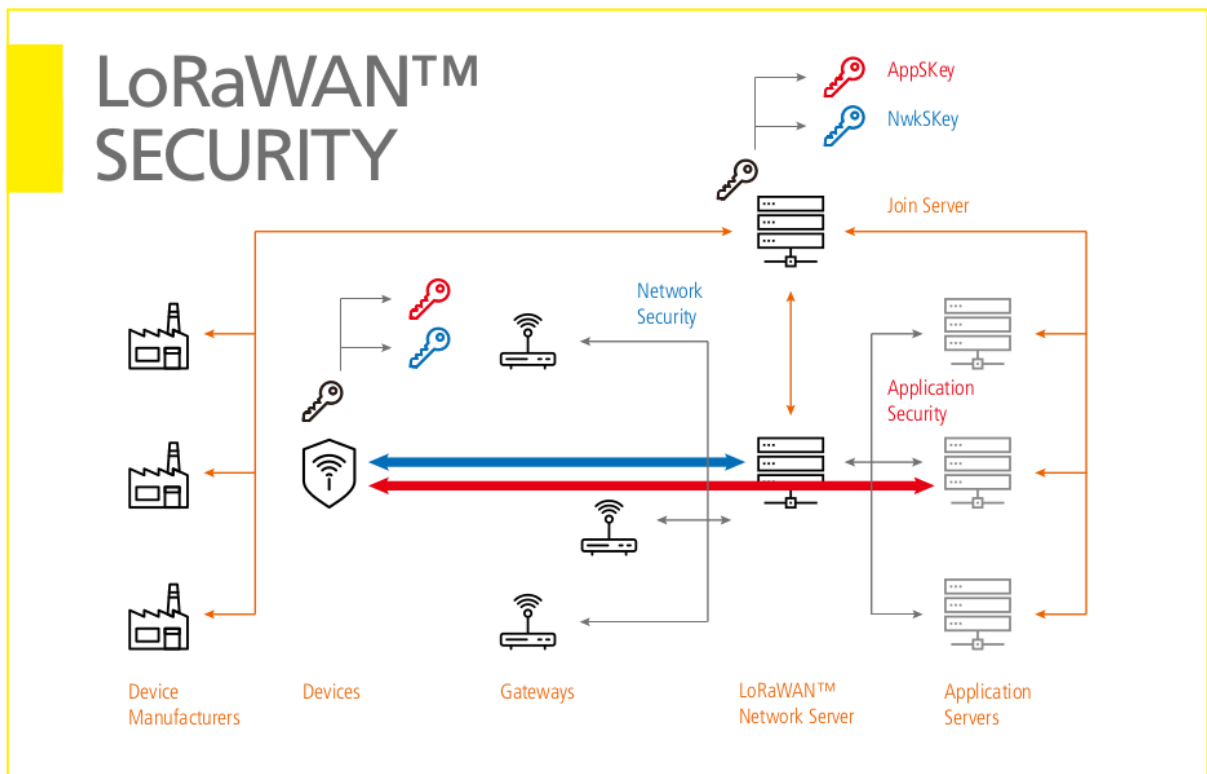
- DevAddr = Identificador do dispositivo na rede;
- FCtrl = Controle da mensagem;
- FCnt = Contador de mensagens enviadas;
- FOpts = Opções de mensagem.

Mais informações sobre os campos dos pacotes podem ser encontradas em LoRa Alliance (2017b).

2.4.7 Segurança

A segurança das informações trocadas entre dispositivos finais e a aplicação é basicamente composta por 3 chaves de autenticação tipo AES chamadas AppKey, AppSkey e NwkSkey. Através do conhecimento da AppKey é possível fazer uma ativação *Over-the-Air* (OTA). No momento da ativação são trocadas as informações de AppSkey e NwkSkey para que o dispositivo final complete a sua ativação na aplicação e comece a enviar dados. Caso o dispositivo perca seu contador de pacotes ou uma das chaves, torna-se necessário fazer uma nova ativação. Uma versão alternativa de ativação, porém menos segura, é a *Activation-by-Personalization* (ABP) onde são geradas AppSkey e NwkSkey para serem salvas no dispositivo final. Esse tipo de ativação é bem menos seguro, já que expõe as chaves de criptografia tanto do *Network Server* (NwkSkey) como da aplicação (AppSkey). O fluxo da segurança no protocolo LoRaWAN é descrito na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Segurança LoRaWAN.



Fonte: LoRa Alliance (2017c)

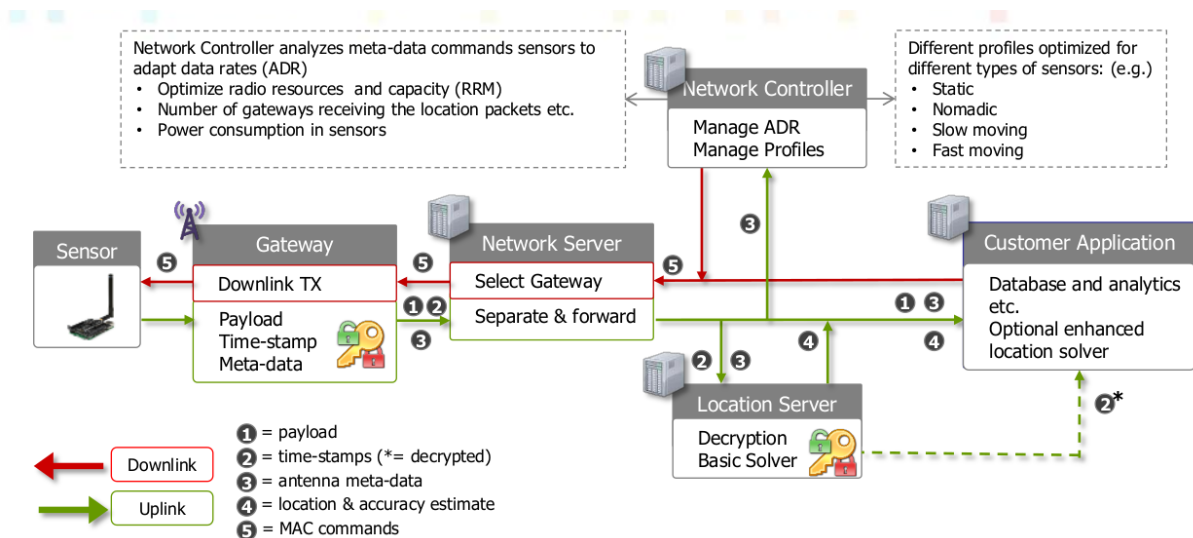
Todo tráfego de dados via LoRaWAN é protegido por duas chaves de sessão, sendo o *payload* encriptado pela AppSKey que é aberto somente quando o dado está dentro da aplicação e todo pacote de dados pela NwkSKey que é aberta quando o dado chega ao *Network Server*.

2.4.8 Geolocalização

A rede LoRa, especificamente utilizando LoRaWAN, permite que seja feita a localização dos dispositivos finais sem a necessidade de um *hardware* adicional em cada um deles (e.g. GPS), essa função é chamada de GPS-Free (Semtech Force, 2016a). A geolocalização é habilitada na segunda geração de *gateways* licenciados pela Semtech, com estampa de tempo mais precisa (na ordem de nanosegundos). É necessário também que todos *gateways* da rede possuam uma base comum de tempo (e.g. GPS). A estampa de tempo relacionada ao pacote é encriptada pelo *gateway* e somente revelada no *network server*, por esse motivo é necessário que o *gateway* seja necessariamente licenciado pela Semtech. Os dispositivos finais não precisam de nenhum *hardware* adicional para operar com essa função, inclusive todos dispositivos que operam com LoRaWAN são compatíveis, dependendo somente dos *gateways* que estão formando a

rede. A geolocalização inicia no momento em que um dispositivo final envia seu pacote de dados para a rede. Idealmente, de 3 a 6 gateways precisam receber o dado para uma boa acurácia na localização, caso hajam mais de 6 *gateways* recebendo pacotes, há uma melhora na precisão, mas não muito significativa. Após os dados serem recebidos pelos gateways, são repassados para o *Network Server*, onde as estampas de tempo são decriptadas e comparadas por TDOA, RSSI, SNR, mapas de correspondência, algoritmos de inteligência e técnicas híbridas⁵(Semtech Force, 2016a). A Figura 2.14 a seguir exemplifica o fluxo de informações.

Figura 2.14 – Fluxo para geolocalização LoRaWAN.



Fonte: Semtech Force (2016a)

Uma questão que ainda não está bem esclarecida é sobre as chaves para decriptografia da estampa de tempo com maior precisão. Para os fabricantes de *gateways*, será disponibilizado o método de encriptação gratuitamente e o método para solucionar a posição do dispositivo pode ser escolhido pelo desenvolvedor da aplicação ou utilizar uma solução fornecida pela Semtech, porém o fornecimento da chave de decriptografia da estampa de tempo é baseado em uma “pequena taxa” (ainda não divulgada) por dispositivo, por ano; que deverá ser paga pelo provedor de serviço, a fim de poder fornecer a estampa de tempo mais precisa às aplicações (Semtech Force, 2016a).

2.4.9 Servidor de aplicação

Para hospedar as aplicações que tem por finalidade receber os dados transmitidos pelos dispositivos finais, é necessário um servidor de aplicação. Existem diversas opções para esse

⁵Não são fornecidos mais detalhes sobre tais técnicas.

serviço, mas uma opção gratuita e muito completa, que implementa todo *Network Server* é a *The Things Network*⁶ - TTN. Esse portal permite que *gateways* sejam adicionados e monitorados, além de permitir que sejam feitas suas configurações. Aplicações podem ser criadas com dispositivos finais vinculados à elas, permitindo que esse dispositivo final transmita para qualquer *gateway* aberto e vinculado a TTN e o dado será repassado para a aplicação definida. A TTN oferece APIs para que os dados sejam acessados e tratados de diversas formas.

2.4.10 Configurações regionais

Devido a rede LoRa operar na banda ISM sub-GHz as frequências utilizadas são diferentes em cada país/região. Desse modo existem diversas configurações para possibilitar o uso do LoRaWAN através do mundo. Para o Brasil, conforme afirma a TTN (TTN, 2017), a resolução nº 506 da ANATEL determinaria os limites para o uso da faixa de frequência, que se encaixariam nas configurações regionais americanas (US915) propostas pela LoRa Alliance, excluindo apenas as frequências entre 907,5 - 915 MHz que estão presentes na configuração US915 mas não podem ser utilizadas pois estão licenciadas para telefonia celular no Brasil. No entanto a resolução nº 680 revogou a nº 506 e modificou pouco seu texto sobre as normas técnicas para equipamentos de radiação restrita (ANATEL, 2017), continuando semelhante com a americana, aplicando os mesmos 400 ms de uso máximo do canal, porém em intervalos de 14 segundos e não mais os 20 segundos que haviam anteriormente. Essas limitações levam a um limite de *payload* da mensagem. Sendo assim, as configurações regionais australianas (AU915) também podem ser usadas no Brasil, pois suas frequências estão completamente dentro do espectro permitido, necessitando apenas uma atenção especial ao tamanho do *payload*, para não ultrapassar o tempo máximo de transmissão. As configurações regionais podem ser consultadas de forma completa em LoRa Alliance (2017a).

Na prática, não há uma configuração regional que se aplique perfeitamente a situação do Brasil e devido a falta de um padrão bem definido, este trabalho em específico utilizou os parâmetros regionais australianos (AU915) que de forma sucinta operam nas configurações apresentadas pelo Quadro 2.8.

⁶www.thethingsnetwork.org

Quadro 2.8 – *Data Rates* parâmetros regionais AU915.

<i>Data Rate</i>	Configuração	<i>bit rate</i>
0	LoRa: <i>SF</i> 12/125 kHz	250
1	LoRa: <i>SF</i> 11/125 kHz	440
2	LoRa: <i>SF</i> 10/125 kHz	980
3	LoRa: <i>SF</i> 9/125 kHz	1760
4	LoRa: <i>SF</i> 8/125 kHz	3125
5	LoRa: <i>SF</i> 7/125 kHz	5470
6	LoRa: <i>SF</i> 8/500 kHz	12500
8	LoRa: <i>SF</i> 12/500 kHz	980
9	LoRa: <i>SF</i> 11/500 kHz	1760
10	LoRa: <i>SF</i> 10/500 kHz	3900
11	LoRa: <i>SF</i> 9/500 kHz	7000
12	LoRa: <i>SF</i> 8/500 kHz	12500

Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2017a)

Os demais parâmetros de comunicação, tomando-se como referência o dispositivo final, para região AU915 são os seguintes:

Code Rate:

- 4/5 para todas configurações.

Transmissão de dados:

- Largura de banda de 125 kHz:
 - 64 Canais de 915,2 MHz até 927,8 MHz (incrementos de 200 kHz por canal);
 - DR0 até DR5.
- Largura de banda de 500 kHz:
 - 8 canais de 915,9 MHz até 927,1 MHz (incrementos de 1,6 MHz por canal);
 - DR6.

Recepção de dados:

- Largura de banda de 500 kHz:
 - Primeira janela de recepção (RX1):
 - * 8 canais de 923,3 MHz até 927,5 MHz (incrementos de 600 kHz por canal);
 - * DR8 até DR12.

- Segunda janela de recepção (RX2):
 - * 1 canal de 923,3 MHz;
 - * DR8.

2.4.11 Principais aplicações

As poucas restrições de uso levam o protocolo LoRa para uma infinidade de aplicações M2M e IoT, dentro de fábricas, operadoras de logística, cidades inteligentes e automação em geral. Por se tratar de uma tecnologia que não cobra taxas pelo uso de banda as aplicações ficam limitadas somente pela regulamentação da região. Sua desvantagem é em relação ao custo da criação da rede, no entanto, como a rede é bastante robusta são necessários poucos *gateways* para a maioria das aplicações.

De modo geral, é mais simples descrever aplicações em que a tecnologia pode não se encaixar. Por exemplo, seria discutível aplicar a monitoração de objetos que podem se mover por milhares de quilômetros quadrados, pois a rede necessária para uma monitoração completa seria bastante complexa de ser constituída e mantida. Problema que não ocorreria em redes como SIGFOX, NB-IoT e LTE-M em que a infra-estrutura é administrada por empresas que tem completo interesse em abranger a maior área possível, porém cobram pelo uso da rede. As outras aplicações que não são recomendadas seguem o rumo de todas redes LPWAN: Aplicações que exigem alto QoS, alta taxa de transferência de dados, aplicações de tempo real (principalmente aplicações imediatas - *Hard Real-Time*) e aplicações que exigem uma taxa de atualização muito alta (devido as restrições de uso de banda em algumas regiões).

3 ESTUDO DE CASO

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Através de um projeto de extensão nomeado “bUFSM: sistema de localização em tempo real para o transporte intracampus da UFSM” que iniciou a monitoração da posição do ônibus responsável pelo transporte interno dos alunos e funcionários da universidade dentro do campus da UFSM, verificou-se um problema a ser solucionado. A monitoração ocorria através do uso de um GPS para capturar a posição e um módulo GPRS para enviar as posições a um servidor, depois esses dados eram apresentados através de uma plataforma *web* para os usuários finais.

Esse sistema tem um custo elevado em diversos aspectos: O módulo GPRS tem um preço alto e consome muita energia. O plano de dados causa um custo recorrente devido a comunicação que ocorre pela rede de telefonia celular. A rede de telefonia é precária e frequentemente perde conexão. O protocolo de comunicação não é desenvolvido para aplicações com pouca transmissão de dados. O módulo GPS tem um preço elevado e consome bastante energia.

Com o intuito de melhorar o processo de verificação da posição do ônibus e envio dos dados para os servidores, a utilização de uma rede LoRa foi proposta. Inicialmente com o intuito de colocar em funcionamento utilizando o protocolo LoRaWAN e GPS para recepção da posição. Posteriormente efetuar-se a análise da viabilidade do uso da função GPS-Free proposta pela Semtech, a fim de otimizar em definitivo tanto a parte de custo de hardware, como em termos de consumo de energia e em termos de operacionalidade.

3.2 SELEÇÃO DO HARDWARE

A seleção dos dispositivos aconteceu por questões de oportunidade e viabilidade, logo, principalmente por conta do protocolo LoRa ser novo no mercado, há uma certa dificuldade de opções de dispositivos de baixo custo.

3.2.1 Módulos de comunicação LoRa

Os módulos selecionados foram o modelo RHF3M076 da empresa RisingHF e o modelo RFM95W da empresa HopeRF. O primeiro, é um módulo muito útil para prototipação e estudo. Possui interface serial USB e utiliza comandos AT. Já possui o protocolo LoRaWAN implementado e basta que sejam feitas as configurações de região para ele estar pronto para comunicação. Os comandos e configurações podem ser consultadas em (RisingHF, 2017). Este

rádio é compatível com qualquer banda de frequência nas quais o protocolo LoRa opera, porém não implementa por padrão as configurações regionais AU915. O rádio já estava disponível na UFSM para pesquisas e foi usado principalmente para validar as diversas formas de configuração que a LoRaWAN permite, por ser um módulo de fácil configuração. O segundo é apenas um rádio LoRa, já vem sintonizado em uma faixa de frequência específica e possui comunicação SPI. Para que seja possível efetuar comunicações com ele é necessário o uso de um controlador capaz de gerenciar a comunicação crua via LoRa (sem uma camada MAC) ou o protocolo LoRaWAN completo. Com o gerenciamento completo da comunicação LoRaWAN o dispositivo é capaz de trocar mensagens com os *gateways*. Mais informações sobre o funcionamento do rádio podem ser encontradas no seu *datasheet* em (RFM95W, 2017). Este rádio foi adquirido previamente, através de recursos próprios, com o intuito de trabalhar com a rede LoRa e foi destinado ao dispositivo que faria o rastreo do ônibus por ser um módulo mais genérico, podendo ser interligado a um controlador e posto em uma pequena caixa.

3.2.2 Módulos GPS

O módulo GPS utilizado para o experimento foi o modelo GPS-Click da MikroE, que possui um módulo u-Blox LEA-6S integrado. Esse dispositivo tem ótima precisão, consumo de energia baixo, muita estabilidade de sinal, além de ser fácil de operar. Seu manual de uso pode ser encontrado em (GPS click, 2017) e o *datasheet* do módulo LEA-6S pode ser encontrado em (LEA-6, 2017). Este módulo foi cedido como empréstimo por um colega para a execução do experimento.

3.2.3 Controladores

Devido a necessidade de controlar os módulos GPS e RFM95W no dispositivo de rastreo do ônibus, foi necessário a escolha de um controlador, que pela sua simplicidade e fácil prototipação, foi escolhido um ATmega 328p (ATMEGA328P, 2017) em uma placa de desenvolvimento Arduino Nano (Arduino, 2017).

Para controlar o modem RHF3M076, foram utilizados diversos dispositivos, sendo eles, quando em laboratório, computadores pessoais e durante os testes em campo uma SBC Raspberry Pi 3 model B (RaspberryPi, 2017).

3.2.4 Projeto dispositivo de rastreamento

O dispositivo de rastreamento foi desenvolvido em uma placa padrão ilhada, sendo o esquema elétrico desenvolvido no software *Kicad EDA* e o layout definido diretamente na placa. O APÊNDICE A mostra o projeto do esquema elétrico.

3.2.5 Gateways

Para completar a rede LoRa, o gateway utilizado foi o modelo RHF2S008 da empresa RisingHF, que está instalado sobre a reitoria da UFSM e conectado à TTN, disponível para qualquer dispositivo final que opere na configuração AU915 e deseje enviar dados para qualquer aplicação da TTN. Esse gateway representa a primeira geração de gateways da Semtech.

3.3 DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO LORAWAN

O uso do rádio RFM95W trouxe a necessidade do desenvolvimento de uma aplicação LoRaWAN para seguir o protocolo e gerenciar o rádio da melhor forma possível. Possibilitando assim, a entrada do dispositivo de rastreamento do ônibus na rede LoRaWAN da UFSM.

3.3.1 LMIC

LoRaMAC in C - LMIC (IBM, 2016) é um sistema operacional desenvolvido pela IBM para operar com rádios LoRa SX1272 e com microcontroladores STM32. Esse sistema operacional foi descoberto em pesquisas durante a implementação da aplicação LoRaWAN no arduino. Seguindo a pesquisa, encontrou-se uma versão modificada do LMIC que seria muito útil para o trabalho. A versão em questão tinha as modificações necessárias para operar diretamente no arduino (Arduino-LMIC, 2017). Essa versão foi testada e se mostrou funcional, porém implementava somente as configurações regionais EU868 e US915.

3.3.2 Implementação das configurações regionais

Até o momento os dois dispositivos utilizados no trabalhos somente operavam nas configurações regionais EU868 e US915. Por questão de conveniência o primeiro dispositivo a ser configurado com os parâmetros regionais AU915 foi o RHF3M076, que teve um *script* construído, no qual, através dos comando AT são enviadas as configurações para: Canais, DRs,

Tabela de DRs e janelas de recepção. Executando esse *script* já é possível comunicar com o servidor de aplicação, caso o dispositivo final esteja configurado na aplicação com suas respectivas chaves de encriptação e ativação via personalização (ABP).

Para a implementação dos parâmetros regionais AU915 no dispositivo rastreador do ônibus, foi necessária a modificação do LMIC em alguns parâmetros como DRs, tabelas de DRs e frequência de operação, da mesma forma que aconteceu com o RHF3M076, porém dentro de um SO que havia sido desenvolvido para EU868 e STM32, mas já tinha modificações para US915 e Arduino, o que tornou a tarefa mais complicada.

3.3.3 Modificação das janelas de recepção

Um modo de operação foi adicionado ao LMIC, que elimina as janelas de recepção do LoRaWAN, com o intuito de otimizar a frequência do envio de dados, que fere a primeira premissa do protocolo LoRaWAN: “Todos dispositivos devem operar no mínimo como classe A” (LoRa Alliance, 2017b), no entanto, com essa modificação o *gateway* ainda recebe os dados do dispositivo final, mas não pode-se considerar que o dispositivo final está operando através do protocolo LoRaWAN. Os códigos modificados do LMIC para arduino podem ser encontrados em (bUFSM, 2017). Foram feitos testes para averiguar o impacto da retirada da janela de recepção e o resultado mostrou um ganho de aproximadamente 2 segundos a cada envio (que se refere exatamente ao tempo das duas janelas de recepção). O único problema encontrado foi que não era mais possível receber dados no dispositivo final, o que já era esperado. Nenhum outro impacto expressivo nos demais parâmetros foi percebido.

3.4 EXPERIMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Os experimentos foram direcionados a 3 objetivos:

1. Verificar a disponibilidade de sinal em toda rota do ônibus;
2. Verificar a capacidade do sistema de enviar dados suficientes para que a localização do ônibus no mapa seja atualizada periodicamente, de forma uniforme e agradável ao usuário;
3. Verificar a possibilidade de através dos parâmetros disponíveis descobrir a localização do ônibus (sem GPS).

3.4.1 Uso de APIs da TTN - Aquisição de dados

A aquisição de dados é bastante simples, pois a aplicação da TTN já se encarrega de publicar em um tópico MQTT específico de cada dispositivo todos dados de recepção. Os dados estão organizados em um JSON conforme é descrito em (The Things Network,). Esse tópico deve ser ouvido por outra aplicação, que quando ocorre a publicação, armazena os dados, os trata e envia apenas a posição geográfica para atualizar a localização do ônibus na página *web*. Os dados que foram armazenados são utilizados para os testes e compreendem as seguintes informações:

- Contador - Conta os pacotes transmitidos pelo dispositivo final desde que foi registrado na rede;
- Potência - Informação enviada pelo dispositivo final no *payload* da mensagem. Se refere a potência utilizada pelo dispositivo para enviar o dado para o *gateway*;
- Latitude do nó - Informação enviada pelo dispositivo final no *payload* da mensagem. É um dado obtido via GPS;
- Longitude do nó - Informação enviada pelo dispositivo final no *payload* da mensagem. É um dado obtido via GPS;
- Frequência - Refere-se a frequência na qual o *gateway* recebeu a mensagem;
- Modulação - Indica a modulação que o *gateway* recebeu a mensagem;
- *Data Rate* - Indica o SF e BW da mensagem, a definição do DR ocorre somente consultando os parâmetros regionais utilizados;
- ID do *gateway* - Informa quais *gateways* que receberam o pacote, através do seu ID único;
- Tempo - Horário da recepção do pacote (UTC);
- Canal - Depende da frequência utilizada;
- RSSI - Potência de sinal recebida;
- SNR - Razão sinal-ruído recebida.

3.4.2 Definição dos métodos de teste

Os métodos foram definidos a partir dos parâmetros de entrada e saída de todo sistema estudado. Os parâmetros de entrada são: Frequência, Potência, DR e distância do *gateway*. Já os parâmetros de saída se restringem a: RSSI e SNR.

O mapeamento da região ocorreu de forma paralela aos testes de geolocalização do dispositivo. Enquanto padrões de comportamento do sistema eram recolhidos para avaliar as possibilidades de determinar a posição do dispositivo na rede, os mesmos dados garantiam a cobertura de sinal na região.

Verificou-se que a *timestamp* que chega ao sistema é com pouca precisão (na ordem de microssegundos¹) e o *gateway* não possui GPS, logo, não seria possível o uso da tecnologia GPS-Free disponível nos *gateways* LoRaWAN de segunda geração.

Para qualquer tipo de multilateração seria necessário o uso de pelo menos 3 *gateways*. Como há apenas um instalado na UFSM, também não é uma opção viável utilizar técnicas de multilateração.

Utilizar métodos matemáticos para determinar a distância através da atenuação do sinal, tirando proveito da grande capacidade da modulação LoRa de transpor obstáculos é aparentemente realizável. Principalmente se for considerado que o ônibus trafega por um circuito fechado, poderia ser possível chegar a um modelo (Mapas de predição) que através da distância *gateway*-dispositivo e do sentido de movimento, a posição do dispositivo fosse estimada.

Definiu-se então que os testes seguiriam à procura de parâmetros mais sensíveis a variação da distância *gateway*-dispositivo e por parâmetros responsáveis pela maior estabilidade do sinal para transmissões em uma mesma posição.

O recolhimento de dados foi definido de forma que todas informações recebidas de cada transmissão deveriam ser salvas. As transmissões deveriam ocorrer em todas frequências disponíveis no *gateway*, variando entre os DRs e as potências de transmissão permitidas pelo dispositivo.

O dispositivo utilizado para esse primeiro conjunto de testes foi o RHF3M076 que possui um método de configuração mais rápido e permite a troca dos parâmetros por *scripts*. Os possíveis valores para os parâmetros que podem ser variados nos testes são os seguintes:

Frequências:

- 916,8; 917,0; 917,2; 917,4; 917,6; 917,8; 918,0 e 918,2 MHz;

DRs:

- Podem ser configurados de 0 até 5;

Potência de transmissão:

- O dispositivo permite a configuração em 2, 5, 8, 11 e 14 dBm;

Qualquer combinação entre os parâmetros descritos acima é válida. Já uma outra configuração que é possível, porém mais restrita é a:

Frequência:

¹ Considerando a utilização de métodos de multilateração por TDOA, o erro inerente do sistema seria maior que 300 metros

- 917,5 MHz;

DR:

- Apenas o 6;

Potência de transmissão:

- O dispositivo permite a configuração em 2, 5, 8, 11 e 14 dBm;

Logo, existem 245 opções de configurações para serem testadas.

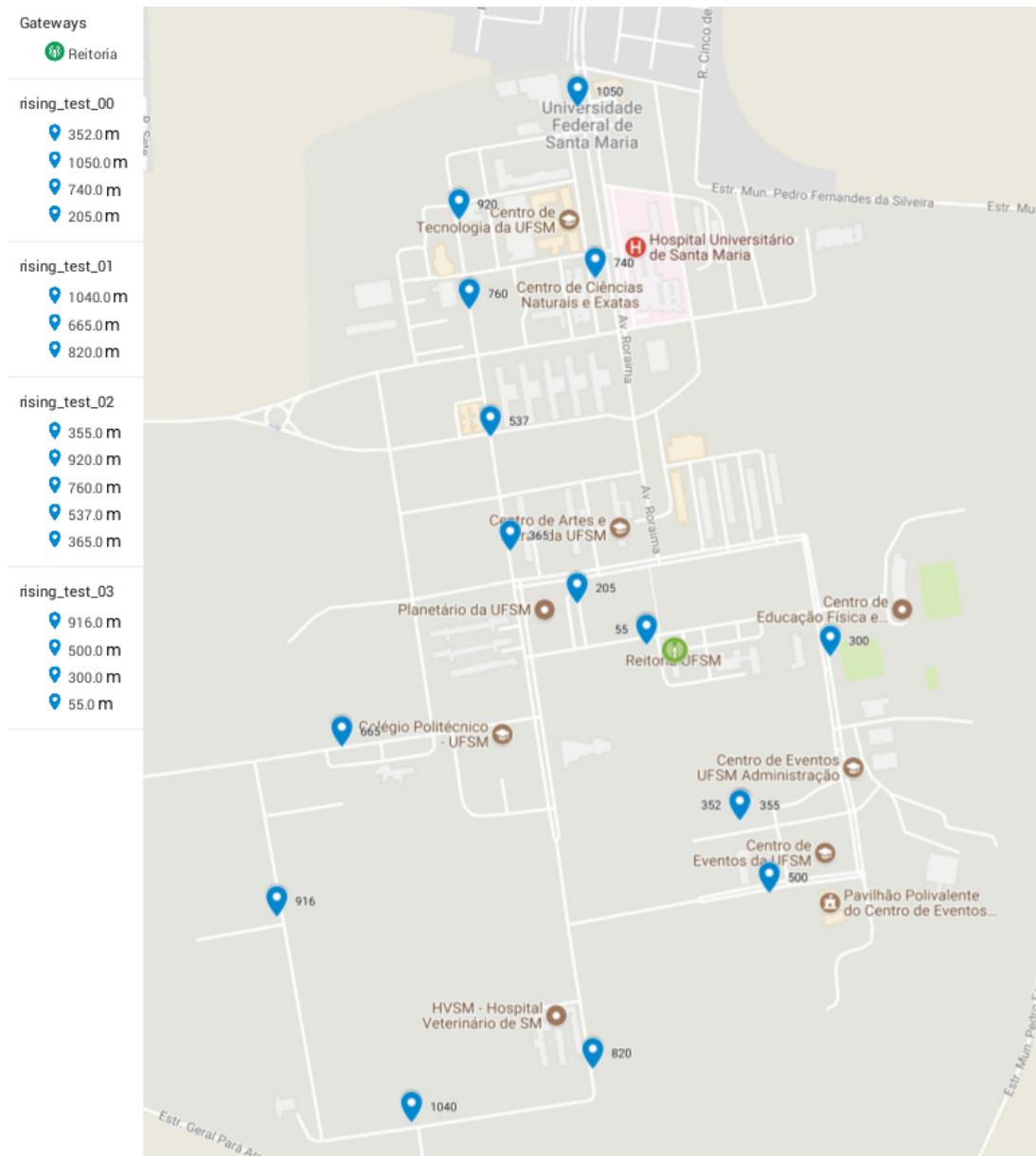
Foram executados testes nos quais durante 30 minutos eram enviados dados de um mesmo local, para verificar a média e o desvio padrão dos parâmetros de recepção do *gateway*, em diversas distâncias.

Para o dispositivo localizador, os testes foram um pouco diferentes, onde ao invés de serem estáticos, foram recolhidos dados por toda rota que o ônibus circula, variando apenas o DR a cada teste completo.

3.4.3 Definição dos locais de teste

Os locais de testes estáticos, preponderantemente situaram-se em pontos na rota do ônibus, somente divergindo em alguns casos onde uma aproximação em linha reta com visada em direção ao *gateway* foi buscada, nesses casos buscou-se alguma semelhança com a propagação em espaço livre. A Figura 3.1 mostra os 12 locais onde os testes estáticos de 30 minutos cada foram executados.

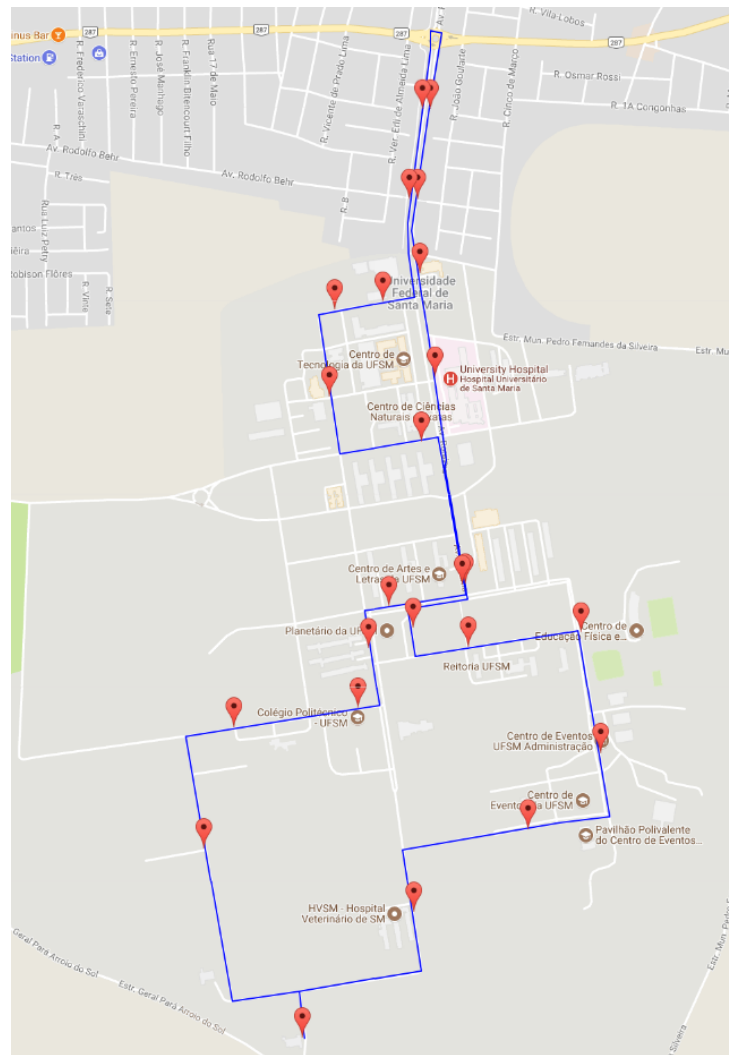
Figura 3.1 – Pontos de teste estático com distância em relação ao gateway



Fonte: Autor (2017)

Os testes em movimento somente ocorreram no trajeto do ônibus, conforme a Figura 3.2.

Figura 3.2 – Rota do ônibus interno da UFSM



Fonte: Adaptado de bUFSM (2017)

3.5 ANÁLISE DE DADOS

A análise seguiu a busca por padrões para a possível localização do dispositivo final dentro da rede e também determinando a região de cobertura do *gateway* posicionado na reitoria.

3.5.1 Determinação de padrões

A busca por padrões iniciou através dos testes feitos com o rádio RHF3M076. A primeira análise seguiu com variação dos parâmetros de transmissão de dados no ponto à 352

metros do *gateway* da reitoria representado na Figura 3.1. Conforme o Quadro 3.1, se efetuarmos uma comparação entre cada média encontrada, a diferença entre elas fica próxima aos valores de desvio padrão de cada teste. O que nos leva a crer que a variação da frequência não apresentou um impacto significativo na SNR e RSSI recebidos, para uma mesma distância.

Quadro 3.1 – Média e desvio padrão da SNR e RSSI alcançados a 352 metros do *gateway* em 4 horas de teste variando a frequência.

Freq (MHz)	SNR		RSSI	
	Média (dBm)	Desvio padrão	Média (dBm)	Desvio padrão
916,8	1,55	3,13	-113,55	4,03
917,0	5,05	0,88	-112,36	5,37
917,2	4,45	1,76	-111,91	4,25
917,4	4,20	1,64	-113,09	4,50
917,6	4,95	1,79	-112,50	4,35
917,8	4,09	3,51	-108,44	4,50
918,0	4,05	0,85	-112,73	3,74
918,2	3,75	2,23	-112,82	4,31

Fonte: Autor (2017)

A variação do DR, como já era esperado, não causou uma variação considerável no RSSI e SNR de recepção, pois conforme descrito no Quadro 2.1 apenas a sensibilidade do receptor é afetada com a variação do DR, causando possivelmente uma taxa de perda de pacotes maior em DRs maiores. O Quadro 3.2 mostra os resultados do teste.

Quadro 3.2 – Média e desvio padrão da SNR e RSSI alcançados a 352 metros do *gateway* em 4 horas de teste variando o Data Rate.

Data Rate	SNR		RSSI	
	Média (dBm)	Desvio padrão	Média (dBm)	Desvio padrão
DR5 (SF7BW125)	4,19	2,38	-112,45	2,70
DR4 (SF8BW125)	5,78	2,21	-112,50	2,67
DR3 (SF9BW125)	5,58	4,34	-113,38	3,11
DR2 (SF10BW125)	4,56	3,01	-112,00	3,39
DR1 (SF11BW125)	4,58	3,11	-114,38	4,41
DR0 (SF12BW125)	3,75	2,23	-112,82	4,31

Fonte: Autor (2017)

Considerando a pequena diferença entre os resultados para diferentes valores de frequência e *Data Rate*, prosseguiu-se com o teste variando a potência de transmissão. O Quadro 3.3 mostra os resultados do teste onde varia-se a potência mantendo a configuração de *Data Rate* em DR0. Os resultados indicam uma pequena variação na SNR e no RSSI a medida que a potência é modificada. O desvio padrão não é afetado drasticamente em nenhum momento.

Devido a potência de transmissão ser o único parâmetro de entrada que afetou a recepção

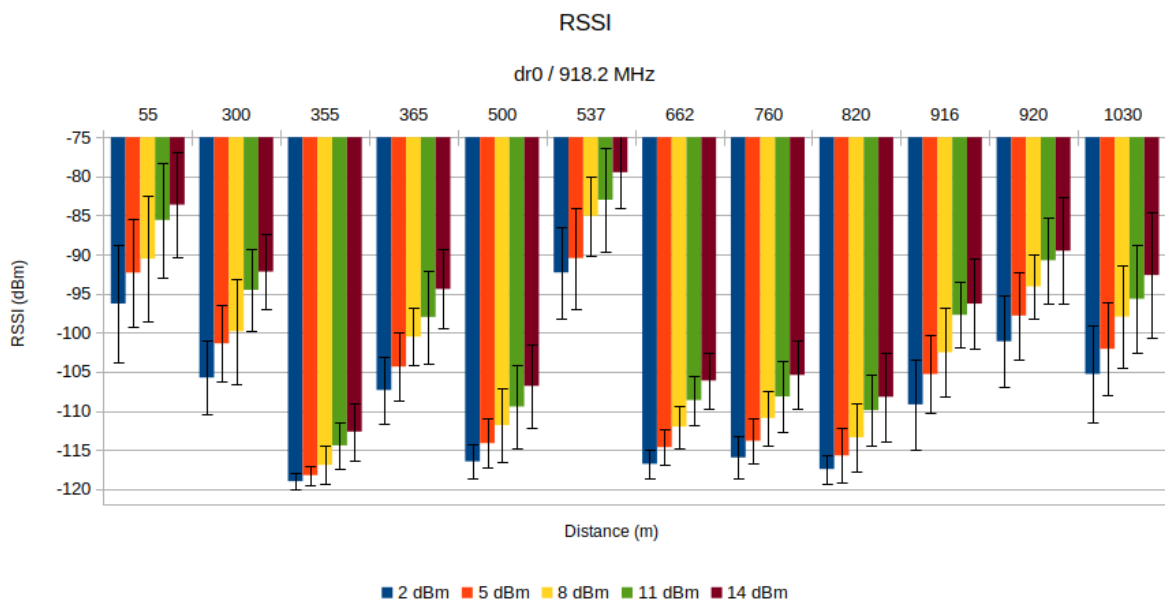
Quadro 3.3 – Média e desvio padrão da SNR e RSSI alcançados a 352 metros do *gateway* em 4 horas de teste variando a potência de transmissão.

Potência (dBm)	SNR		RSSI	
	Média (dBm)	Desvio padrão	Média (dBm)	Desvio padrão
2	-5,62	3,17	-118,52	2,15
5	-2,38	3,20	-117,67	2,14
8	-0,42	3,58	-115,83	2,81
11	1,37	4,35	-114,49	3,67
14	4,00	2,29	-112,26	4,44

Fonte: Autor (2017)

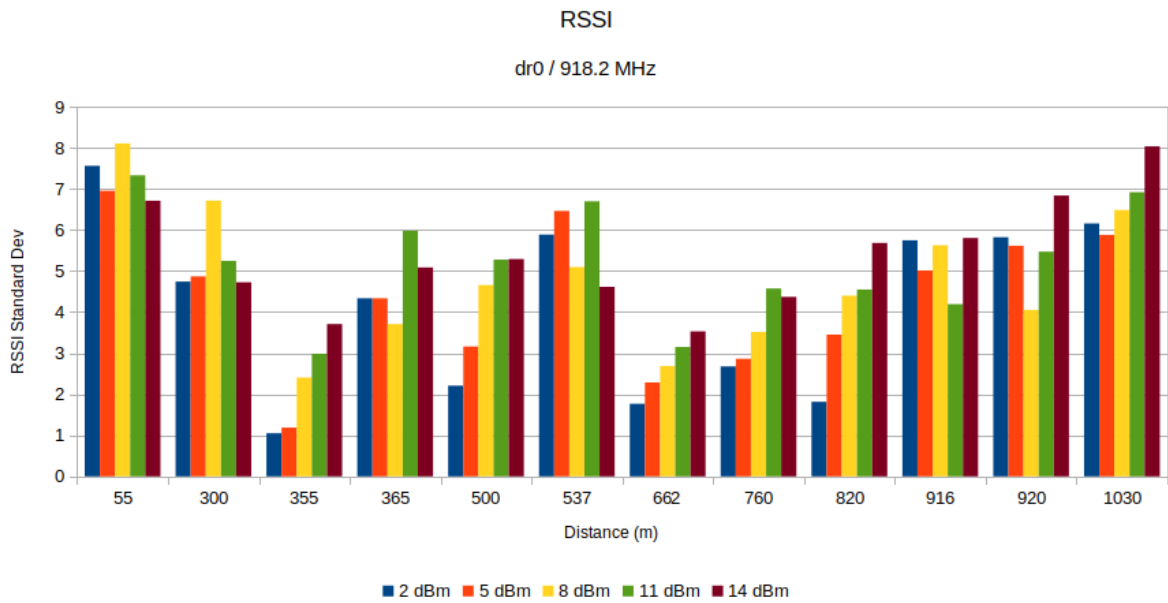
de alguma forma, os próximos testes estáticos seguiram variando somente a potência e a localização do dispositivo. Para esse teste, foram utilizados os 12 pontos definidos anteriormente, com aquisição de dados de 30 minutos em cada ponto. O teste tem por definição verificar a qualidade e estabilidade do sinal nos pontos escolhidos. O Gráfico 3.1 apresenta os níveis de RSSI em cada local e potência transmitido, já o Gráfico 3.3 apresenta os níveis de SNR. O Gráfico 3.2 apresenta o desvio padrão encontrado nas amostras de RSSI adquiridas durante o teste e o Gráfico 3.4 apresenta o desvio padrão para SNR.

Gráfico 3.1 – Intensidades de sinal recebidas em relação à distância nos testes estáticos



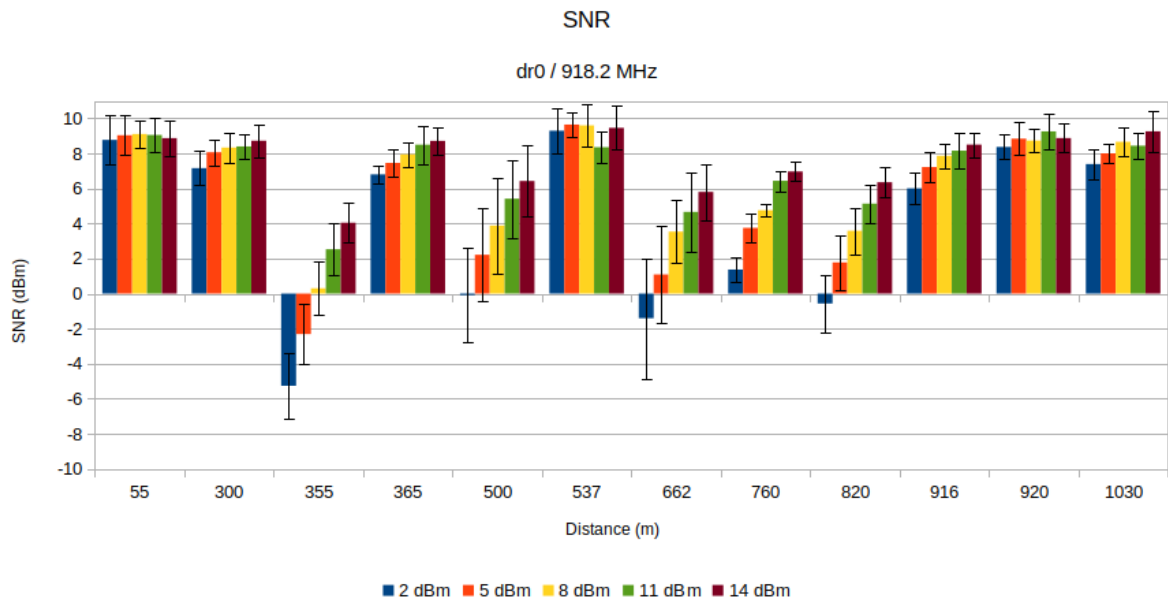
Fonte: Autor (2017)

Gráfico 3.2 – Desvio padrão das intensidades de sinal recebidas em relação à distância nos testes estáticos



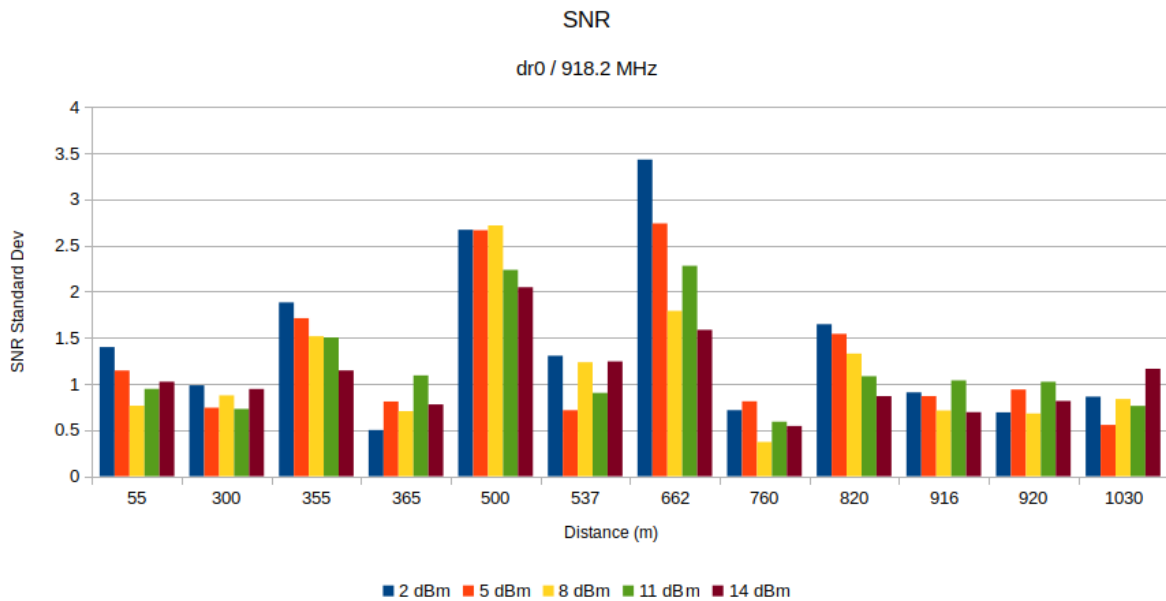
Fonte: Autor (2017)

Gráfico 3.3 – Razões sinal-ruído recebidas associadas à distância nos testes estáticos



Fonte: Autor (2017)

Gráfico 3.4 – Desvio padrão das razões sinal-ruído recebidas associadas à distância nos testes estáticos



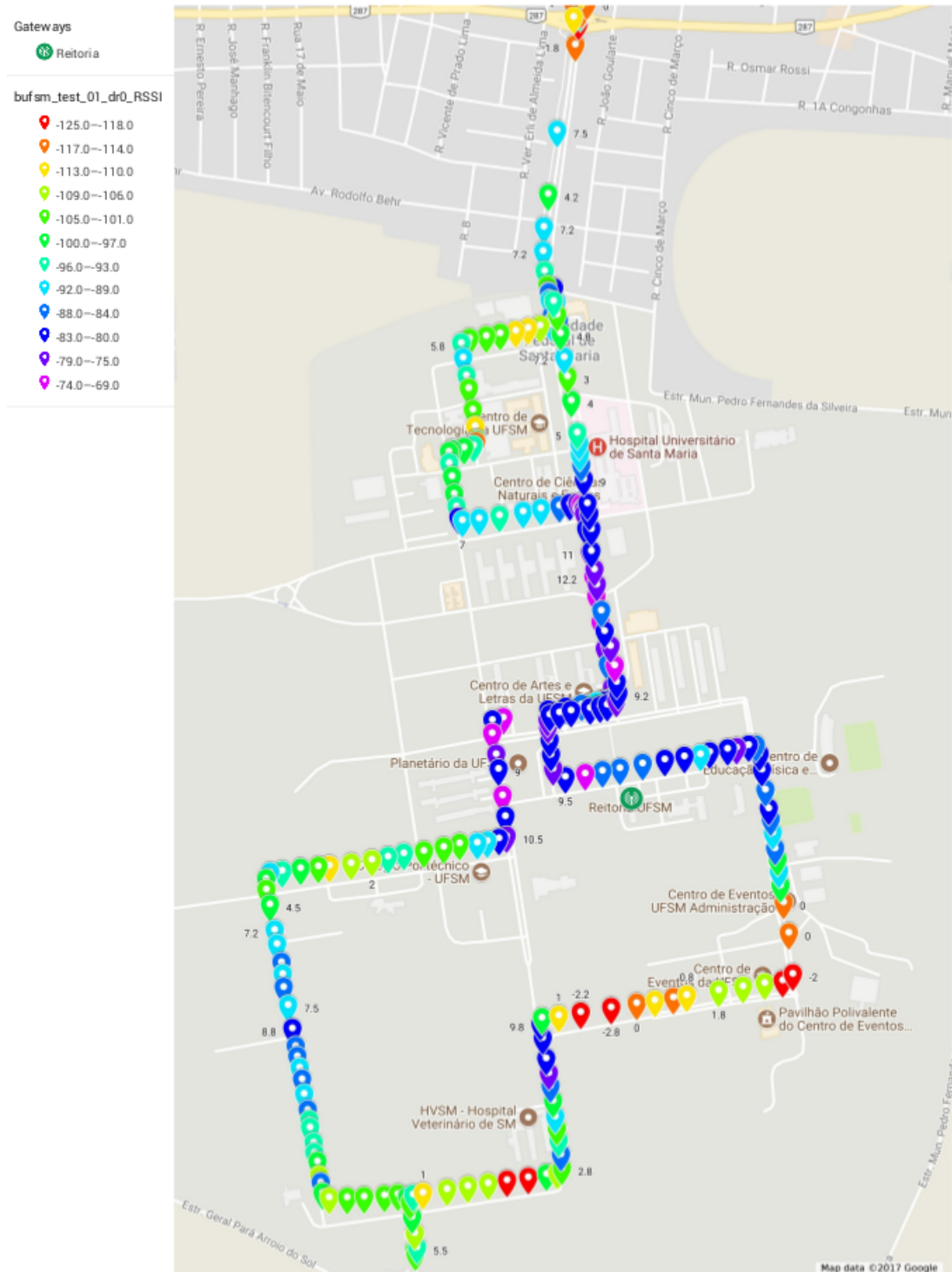
Fonte: Autor (2017)

Pelas gráficos fica claro que as distâncias não têm correspondência com os níveis de RSSI e SNR recebidos, sendo essas variações provavelmente ocasionadas pelo fenômeno de multipercurso e das obstruções de sinal causadas pela vegetação e prédios. Ao observarmos os valores de RSSI para distância de 300 metros e 920 metros no Gráfico 3.1; e o desvio padrão encontrado nos mesmos pontos no Gráfico 3.2, poderíamos considerar o mesmo valor, tornando o erro na determinação da distância certamente maior que 620 metros. Observando os Gráficos 3.3 e 3.4 chega-se a mesma conclusão.

Os testes seguintes tiveram dados retirados a partir do uso do dispositivo rastreador do ônibus. Para o caso do rastreador o tempo de atualização é importante para o usuário, por esse motivo foram testados diversos DRs, pois apesar de perder em sensibilidade quando aumentados o DR, ganhamos muito em tempo de transmissão. Foram executados três testes completos e um teste que não gerou resultados. O primeiro teste utilizou DR0, o segundo DR2, o terceiro DR5 e o quarto DR6 porém este não foi completado. Seguindo o trajeto realizado pelo ônibus, foram recolhidos os seguintes dados:

Utilizando DR0 (SF12BW125), foi alcançado o valor de 93,9% dos pacotes entregues. O mapa de cobertura está representado na Figura 3.3.

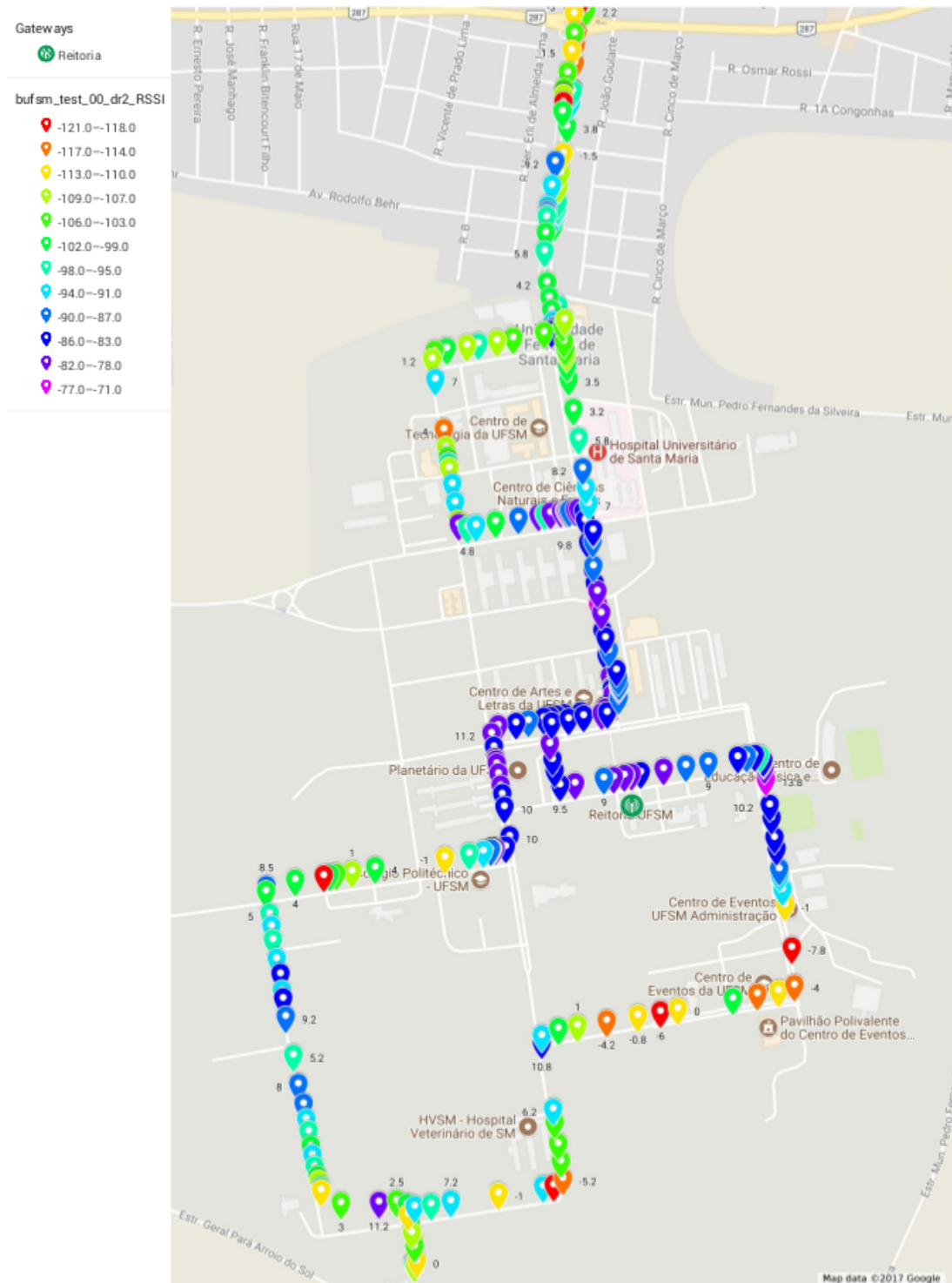
Figura 3.3 – Mapa de cobertura linha do ônibus UFSM utilizando DR0



Fonte: Autor (2017)

Utilizando DR2 (SF10BW125), foi alcançado o valor de 87% dos pacotes entregues. O mapa de cobertura está apresentado na Figura 3.4.

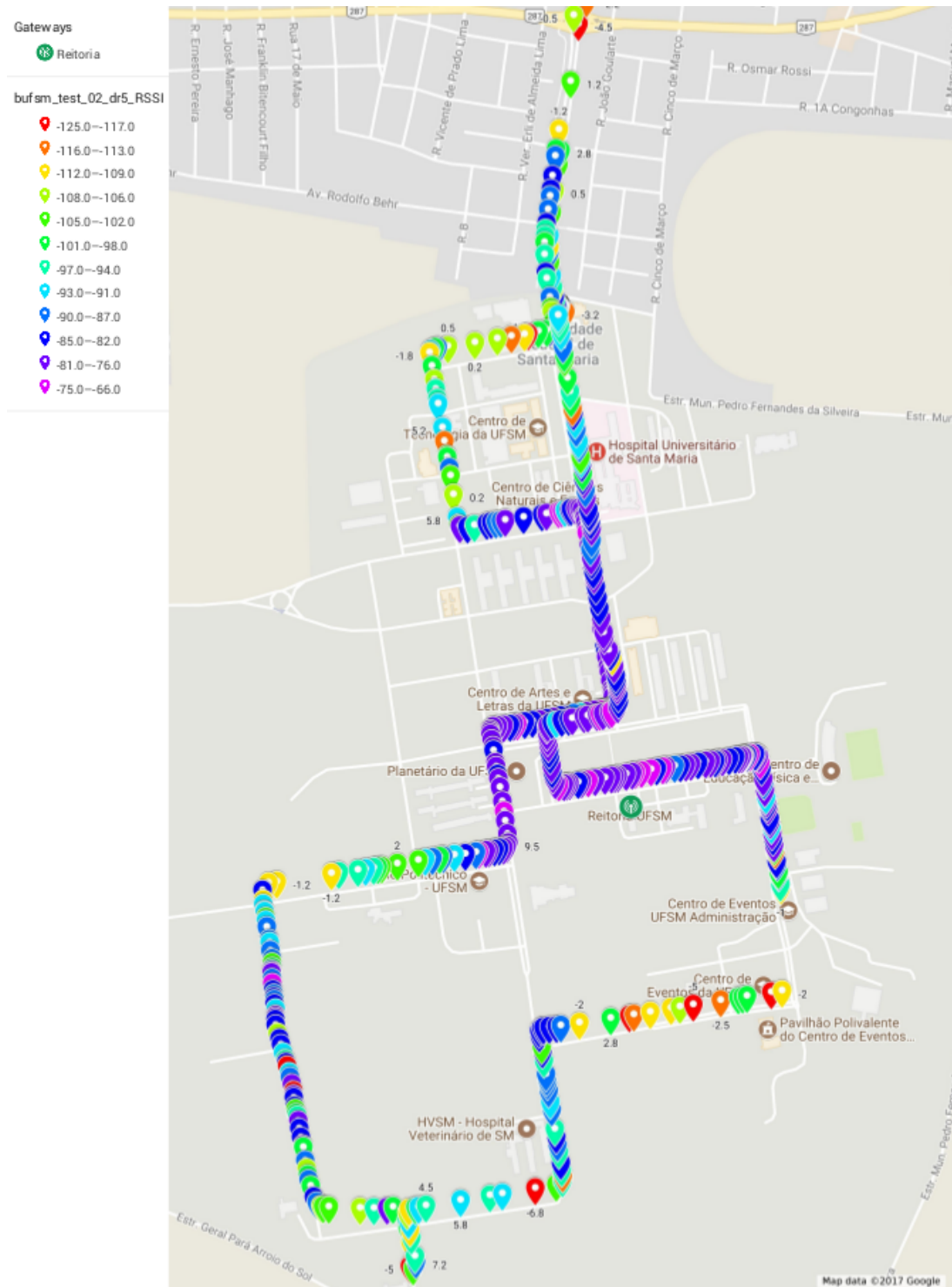
Figura 3.4 – Mapa de cobertura linha do ônibus UFSM utilizando DR2



Fonte: Autor (2017)

Utilizando DR5 (SF7BW125), foi alcançado o valor de 73% dos pacotes entregues. O mapa de cobertura está apresentado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Mapa de cobertura linha do ônibus UFSM utilizando DR5



Fonte: Autor (2017)

Utilizando DR6 (SF8BW500), próximo ao ponto de partida do ônibus menos de 10% dos pacotes conseguiam ser entregues, portanto o teste não foi completado.

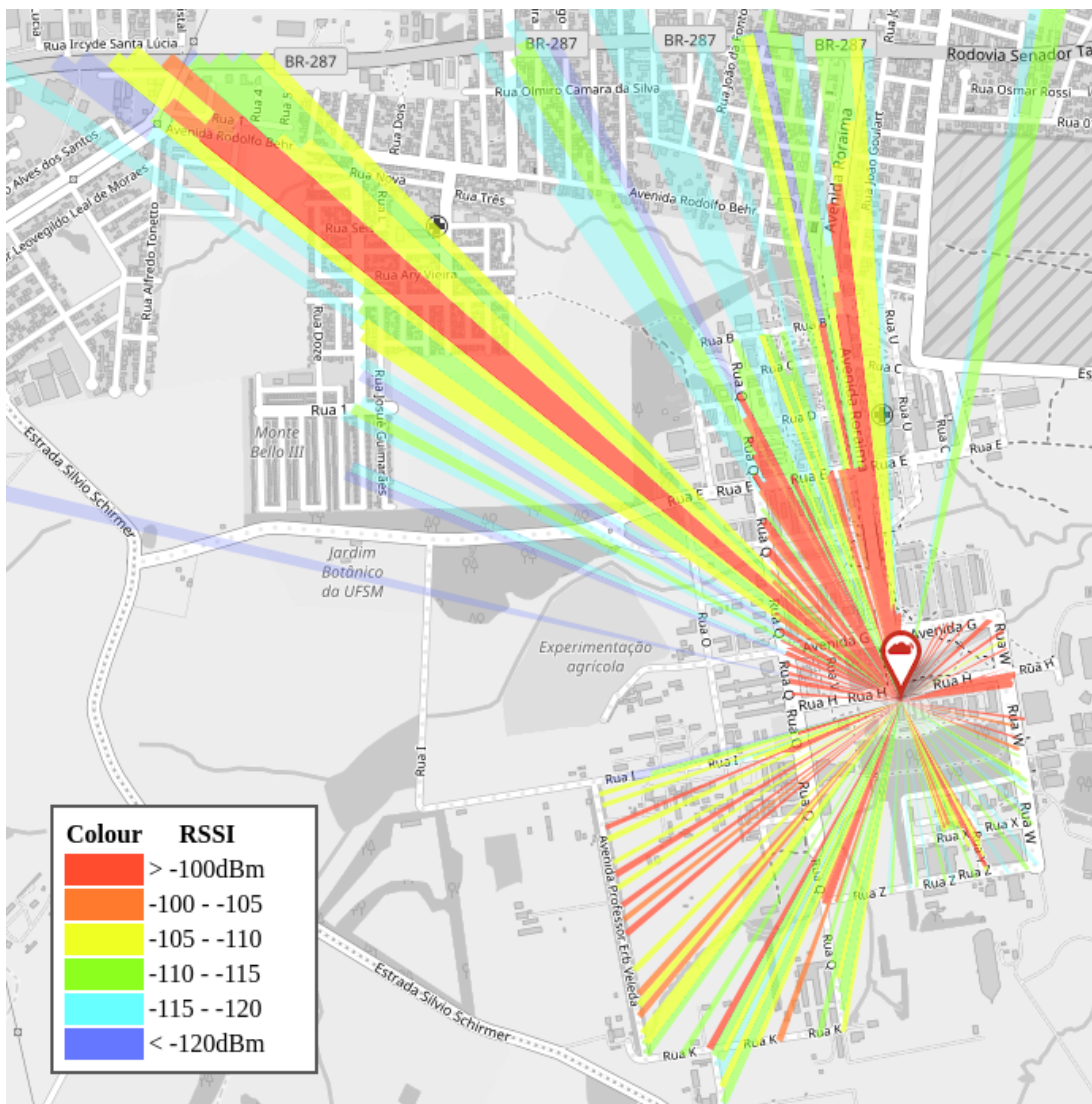
Pelas figuras é possível notar semelhanças entre as regiões de sinal forte e fraco. Esse foi o indício mais próximo de um padrão para localização do ônibus, porém, depende de análises

mais profundas para averiguar a assertividade desse método.

3.5.2 Mapeamento da região de cobertura

O mapeamento da região de cobertura trouxe resultados muito satisfatórios, sendo possível a comunicação por quase todos os pontos da UFSM, inclusive dentro de prédios. Durante a averiguação da cobertura também foram feitos testes fora da área do campus e estes estão dispostos na Figura 3.6 que mostra as regiões.

Figura 3.6 – Mapa de cobertura completa do campus e arredores.

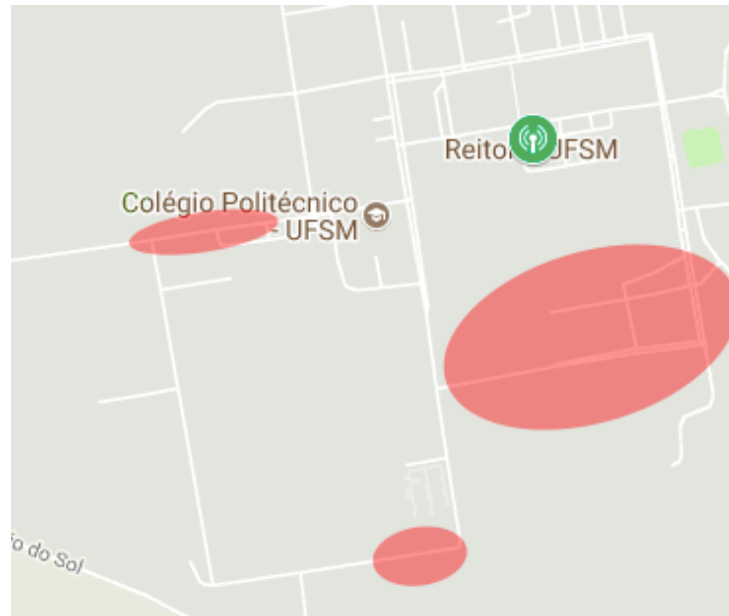


Fonte: Adaptado de TTN Mapper (2017)

Fica claro a qualidade inferior da cobertura em algumas regiões, principalmente regiões com arborização densa atrás da reitoria (sentido Sul). Portanto as regiões mais críticas para

transmissão de dados são apresentadas na Figura 3.7.

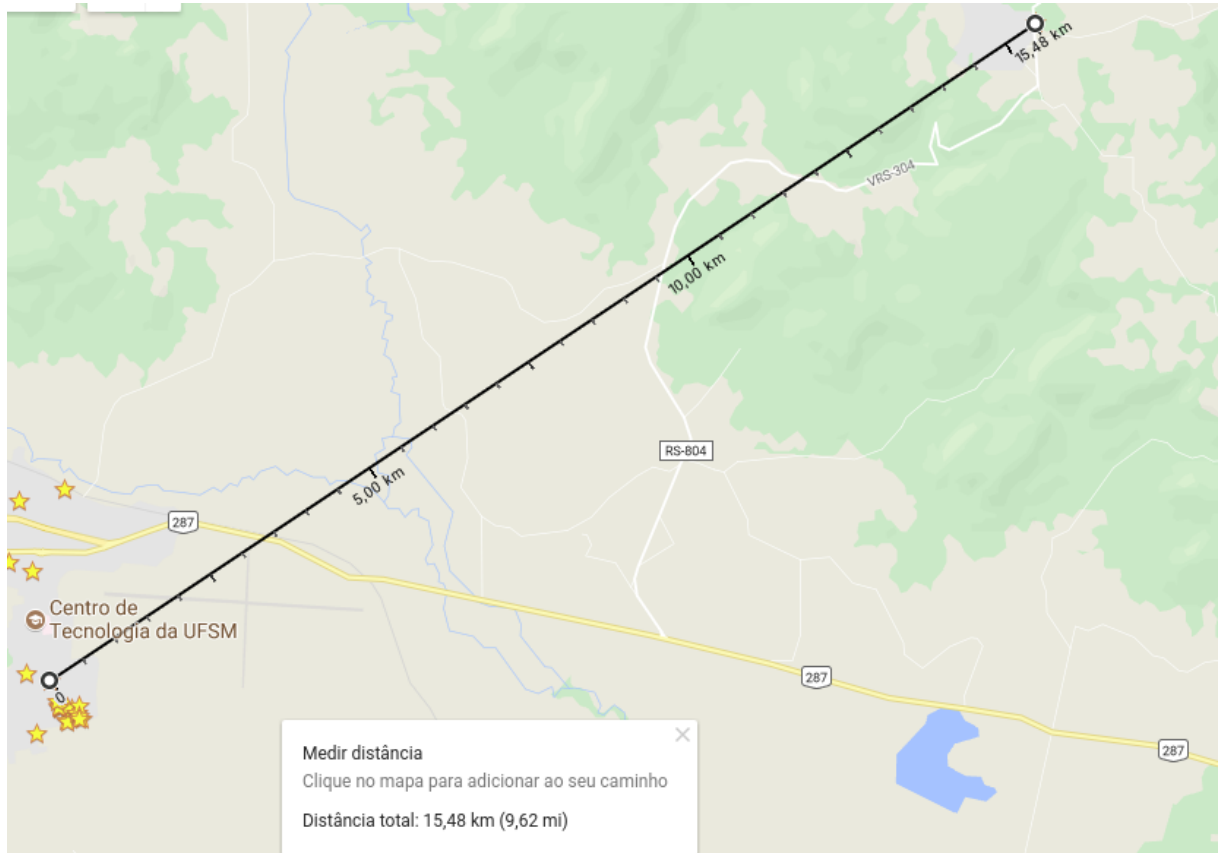
Figura 3.7 – Mapa destacando regiões críticas para transmissão de dados pela rede LoRa



Fonte: Autor (2017)

Por curiosidade, um teste de abrangência foi feito, em direção a cidade de Silveira Martins - RS. Nesse teste, a rede LoRaWAN utilizando o rádio RHF3M076 para transmissão em DR0 e potência de 14 dBm foi capaz de transmitir a aproximadamente 15,5 km de distância. Um resultado surpreendente e que através de planejamento e calma, pode ser ultrapassado, já que não houveram grandes dificuldades para essa transmissão. A Figura 3.8 mostra o mapa do teste.

Figura 3.8 – Teste de abrangência do sinal LoRa



Fonte: Autor (2017)

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS OBTIDOS

Após o estudo, a aquisição dos dados e a análise de todos os meios utilizado, é possível afirmar que a partir de somente o *gateway* instalado na reitoria é possível formar uma rede completa de sensores por todo o campus. Salvo apenas alguns pontos cegos, de forma geral a cobertura é muito boa e permite que sensores de baixíssimo consumo sejam utilizados. O uso da rede LoRa para monitoração em tempo real do ônibus, pode ser discutível, devido à necessidade muito frequente de atualização dos dados. Mesmo que sejam mensagens pequenas, a modulação CSS utilizada pelo LoRa ocupa a largura de banda por bastante tempo, o que facilmente chega a 1 segundo e pode comprometer a comunicação de outros dispositivos na rede. Existem também limites de uso de banda determinados pelas agências de regulamentação que podem impedir o uso tão contínuo da banda. Atualmente a regulamentação brasileira não está muito clara pela ANATEL e tem seus detalhes comentados na Seção "2.4.10 - Configurações regionais". Levando em consideração somente o protocolo LoRaWAN que exige 2 segundos após o envio de um dado devido as 2 janelas de recepção, mais o tempo de transmissão, são no mínimo 3 segundos entre pacotes. Caso um deles seja perdido pelo *gateway* são 6 segundos sem atualização. Nesse caso, apenas um desconforto do usuário seria causado, mas já coloca um porém na afirmação sobre "localização em tempo real do ônibus".

A utilização de apenas um *gateway*, não permite o desenvolvimento de métodos de multilateração. Caso sejam adicionados à rede mais 2 *gateways* iguais, possibilitaria o uso de multilateração, mas ainda não seria possível uma localização eficiente por conta de uma *timestamp* pouco precisa e da falta de comunicação GPS nos *gateways* para sincronização perfeita dos relógios. Caso sejam adicionados 3 *gateways* de primeira geração com GPS, seria possível ter os relógios muito bem sincronizados, o que possibilitaria o uso de multilateração com um erro de aproximadamente 300 metros. Essa estrutura foi montada e testada em (FARGAS; PETERSEN, 2017). Para o uso da tecnologia GPS-free proposto pela Semtech seria necessário o uso de no mínimo 3 *gateways* de segunda geração (Semtech, 2016a) e um esclarecimento sobre a concessão de licenças para decriptografia da *timestamp* com maior precisão. As tentativas de localização a partir de somente um *gateway*, que tinham como objetivo tirar proveito das características da modulação LoRa como alta capacidade de entrega dos pacotes, facilidade na transposição de obstáculos, imunidade a ruídos, imunidade ao efeito Doppler e das características do ambiente que possui a rota do ônibus fechada que contorna o *gateway* não tiveram sucesso e não foram encontrados padrões satisfatórios para uma projeção simples e sem o uso de algoritmos avançados. Os resultados mostraram que para determinadas situações, o meio e provavelmente a posição da antena do *gateway* interferem bastante na capacidade de

recepção do sinal, sendo os valores encontrados para RSSI e SNR pouco eficientes perante uma análise de distância dispositivo-*gateway* a partir deles. Os dados trouxeram um desvio padrão relativamente baixo, quando o dispositivo final estava parado na mesma posição, portanto a repetibilidade se mostrou boa, o que permitiria aplicar os níveis de sinal encontrados em algum algoritmo de inteligência artificial, que no período de treinamento necessitaria de GPS no dispositivo final e posteriormente, após serem definidos padrões, anularia a necessidade de possuir um GPS. Seria possível também a implementação de diferentes redes, que trabalham através de “anúncios” (*beacons*), e que serão comentadas na Seção "4.2 - Trabalhos futuros".

A comunicação LoRa implementada no ônibus trouxe grandes ganhos em energia, mesmo utilizando a localização por GPS. A diferença entre a solução GPRS e LoRa considerando *hardware*, energia e custo é apresentada na Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Custos médios de Hardware - Energia e aquisição

<i>Hardware</i>	Consumo (<i>mA</i>)			Custo (U\$)
	<i>Standby</i>	Ativo	Transmissão	
Controlador	3,14	19,90	19,90	3,00
GPS	11,00	50,00	50,00	9,00
GPRS	2,00	400,00	2000,00	12,00 ¹
LoRa	1,60	5,80	58,00	10,00

¹ Necessário plano de dados.

Fonte: Autor (2017)

Se considerarmos o gasto em *hardware* da primeira versão que utiliza GPRS em relação a segunda com LoRa, a diferença de preço médio gira entorno de U\$ 2, o que não é uma grande diferença em relação ao preço total, mas considerando a necessidade do custo recorrente do plano de dados para o GPRS, a comparação tende ainda mais para o sistema que utiliza LoRa.

Já se considerarmos o consumo de energia, a diferença é bem mais significativa, onde para os dispositivos em *standby* fica em 0,40 mA (2,48% a menos utilizando LoRa), para os dispositivos ativos 394,20 mA (83,89% a menos utilizando LoRa) e para os momentos de transmissão estrondosos 1942,00 mA (93,82% a menos utilizando LoRa). Como o dispositivo localizador precisa manter uma posição sempre atualizada do ônibus, basicamente a operação com GPRS mantém por quase todo o tempo a conexão aberta com o servidor, o que leva o dispositivo a operar na maior parte do tempo em modo Ativo ou Transmissão. Já o módulo LoRa utiliza um protocolo mais simples que possibilita o uso principalmente dos modos *Standby* e Transmissão. Como método de comparação, se considerarmos que os dois dispositivos operam preponderantemente ativos ou em transmissão na aplicação atual, podemos considerar um ganho maior que 83,89% utilizando LoRa.

4.2 TRABALHOS FUTUROS

Utilizando a mesma plataforma do rastreador desenvolvida com LoRa e GPS, poderiam ser aplicadas soluções como o envio da velocidade do dispositivo juntamente com a sua posição, a fim de permitir envios menos frequentes de pacotes, conduzindo a posição apresentada na *web* através de previsões. Outra melhoria significativa poderia levar em consideração a capacidade de transmissão em cada ponto da rota, que poderia modificar o DR de envio, tomando DRs maiores quando possível, que necessitam de menos energia e enviam em uma taxa de transmissão maior, otimizando o uso da banda.

Para novos desenvolvimentos, existem diversos cenários possíveis para resolução dos problemas encontrados com a geolocalização sem GPS. O primeiro deles seria o uso de *gateways* LoRa de segunda geração juntamente com a licença para utilização da função GPS-Free, que poderiam demonstrar o funcionamento e inclusive validar, ou invalidar, o contraponto a essa tecnologia apresentado em Link Labs (2016) o qual descreve que é impossível a geolocalização através desta tecnologia por conta da largura de banda. A segunda solução é o uso de um módulo *Wi-Fi* para efetuar a varredura das redes próximas e enviá-las ao *gateway* para a aplicação verificar a localização através dos serviços disponíveis, conforme foi citado em “2.3.3 - Geolocalização por *hardware* dedicado”. A terceira solução poderia ser semelhante a usada pela empresa AirFinder¹ que utiliza leitores em diversos pontos que informam a central quando identificam a presença do dispositivo monitorado. Em geral a comunicação entre os leitores e o dispositivo monitorado é de curto alcance, já entre os leitores e a central caberia muito bem o uso de LoRaWAN. Essa solução poderia ser aplicada principalmente em cidades inteligentes, onde existem diversos sensores estáticos com posição definida. Tais sensores seriam capazes de receber a informação dos dispositivos móveis e informar ao *gateway* sobre a presença deles. A quarta e última solução encontrada que pode ser explorada é o uso da técnica de *Dead Reckoning* (JIMENEZ et al., 2009; KAO, 1991) através do uso de um sensor que integre giroscópio, acelerômetro e magnetômetro.

¹www.airfinder.com

5 CONCLUSÃO

A partir dos dados obtidos, é notável que a rede LoRaWAN da UFSM tem ótima cobertura possibilitando uma infinidade de soluções de sensoriamento dentro da universidade sem a necessidade de estruturas de rede maiores. A regulamentação da operação para tecnologia LoRa no Brasil ainda é falha e inacabada, sendo necessário aguardar pelas autoridades regulamentadoras para que um produto final seja desenvolvido com tal tecnologia.

Um grande problema na maioria das redes LPWAN que operam em bandas não licenciadas (ISM) é que a regulamentação pelo mundo é variada e dispositivos não poderiam viajar por países com diferentes regulamentações, tanto por questões legais quanto por ficarem sem acesso a rede.

As redes LPWAN em geral tendem a sofrer, num futuro próximo, com a escalabilidade, não somente das redes em si, mas da banda ISM, pois devido a grande capacidade de operar a longas distâncias, se não houverem regulamentações severas para esse tipo de tecnologia, os níveis de ruído na banda devem aumentar exponencialmente.

Infelizmente não foi possível testar a solução GPS-Free da Semtech neste trabalho, o que abre caminhos para soluções alternativas propostas, que precisam ser testadas e comparadas em novos trabalhos. Para o estudo de caso atual, a melhor opção para geolocalização continuou sendo o GPS, o que trouxe um ganho menor em energia, porém ainda muito significativo, permitindo também um ganho em custo de *hardware* e de custo recorrente, que baixou para zero.

Aparentemente, o futuro da tecnologia não está no generalismo, as soluções específicas para cada nicho estão tomando o mercado pelo mundo, sendo as LPWAN uma delas, que preencheu uma lacuna no mundo do IoT e tem potencial para gerar muitos frutos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANATEL. **REQUISITOS TÉCNICOS PARA A AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE DE EQUIPAMENTOS DE RADIOCOMUNICAÇÃO DE RADIAÇÃO RESTRITA**. 2017. Acesso em 27 nov. 2017. Disponível em: <https://sei.anatel.gov.br/sei/publicacoes/controlador_publicacoes.php?acao=publicacao_visualizar&id_documento=2128852&id_orgao_publicacao=0>.

Arduino. **Getting Started with the Arduino Nano**. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoNano>>.

Arduino-LMIC. **LoraWAN-in-C library, adapted to run under the Arduino environment**. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://github.com/matthijskooijman/arduino-lmic>>.

ATMEGA328P: Datasheet atmel 8-bit microcontroller. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf>.

BAHARUDIN, A. M.; YAN, W. Long-range wireless sensor networks for geo-location tracking: Design and evaluation. In: **2016 International Electronics Symposium (IES)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 76–80.

BUFSM: Um baita ônibus. 2017. Acesso em 20 nov. 2017. Disponível em: <<https://bufsm.github.io/>>.

bUFSM. **Firmware embarcado no bUFSM**. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://github.com/bufsm/bufsm/tree/master/embedded/src>>.

EGLI, P. R. **LPWAN Technologies for Internet of Things (IoT) and M2M Scenarios**. 2015. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/PeterREgli/lpwan>>.

FARGAS, B. C.; PETERSEN, M. N. Gps-free geolocation using lora in low-power wans. In: **2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

GEORGE, A.; KIESLER, M. **Secret communication system**. Google Patents, ago. 11 1942. US Patent 2,292,387. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US2292387>>.

GEORGIU, O.; RAZA, U. Low power wide area network analysis: Can lora scale? **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 6, n. 2, p. 162–165, April 2017. ISSN 2162-2337.

Google Maps APIs. **Geolocation API: The google maps geolocation api**. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://developers.google.com/maps/documentation/geolocation/intro>>.

GPS click. **GPS click L10 Manual**. 2017. Disponível em: <<http://download.mikroe.com/documents/add-on-boards/click/gps-l10/gps-click-l10-manual-v100.pdf>>.

HO, K. C.; CHAN, Y. T. Geolocation of a known altitude object from tdoa and fdoa measurements. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 33, n. 3, p. 770–783, July 1997. ISSN 0018-9251.

IBM. **IBM LoRaWAN in C (LMiC)**. 2016. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://github.com/mcci-catena/ibm-lmic/raw/master/doc/LMiC-v1.6.pdf>>.

INGENU. **RPMA Technology: for the internet of things**. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <http://theinternetofthings.report/Resources/Whitepapers/4cbc5e5e-6ef8-4455-b8cd-f6e3888624cb_RPMA%20Technology.pdf>.

JIMENEZ, A. R. et al. A comparison of pedestrian dead-reckoning algorithms using a low-cost mems imu. In: **2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 37–42.

KAO, W.-W. Integration of gps and dead-reckoning navigation systems. In: **Vehicle Navigation and Information Systems Conference, 1991**. [S.l.: s.n.], 1991. v. 2, p. 635–643.

KRIZMAN, K. J.; BIEDKA, T. E.; RAPPAPORT, T. S. Wireless position location: fundamentals, implementation strategies, and sources of error. In: **1997 IEEE 47th Vehicular Technology Conference. Technology in Motion**. [S.l.: s.n.], 1997. v. 2, p. 919–923 vol.2. ISSN 1090-3038.

LEA-6: Datasheet u-blox 6 gps modules. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/LEA-6_DataSheet_%28UBX-14044797%29.pdf>.

Link Labs. **LoRa Localization**. 2016. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://www.link-labs.com/blog/lora-localization>>.

_____. **An Overview Of Narrowband IoT (NB-IoT)**. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://www.link-labs.com/blog/overview-of-narrowband-iot>>.

_____. **The Past, Present, & Future of LPWAN**. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://www.link-labs.com/blog/past-present-future-lpwan>>.

_____. **What is LTE-M?** 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://www.link-labs.com/blog/what-is-lte-m>>.

LoRa Alliance. **LoRaWAN : What is it?: A technical overview of lora® and lorawan**. 2015. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_ed71ea1cd969417493c74e4a13c55685.pdf>.

_____. **LoRaWAN 1.1 Regional Parameters**. 2017. Disponível em: <<https://www.lora-alliance.org/lorawan-for-developers>>.

_____. **LoRaWAN 1.1 Specification**. 2017. Disponível em: <<https://www.lora-alliance.org/lorawan-for-developers>>.

_____. **LoRaWAN Security: Full end-to-end encryption for iot application providers**. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_cc44304714c14f80a6ce50fc9fcee2a.pdf>.

MÜLLER, C. et al. Método de multilateração para algoritmos de localização em redes de sensores sem fio. Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

RaspberryPi. **RASPBERRY PI 3 MODEL B**. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>>.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 19, n. 2, p. 855–873, Secondquarter 2017.

RFM95W: Datasheet rfm95/96/97/98(w) - low power long range transceiver module. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM95_96_97_98W.pdf>.

RisingHF. **PS01509:** Lorawan class a/c at command specification. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/forum/uploads/default/original/2X/3/3995d6855260b7c36ff9ae19748aa527701c59a6.pdf>>.

ROBERT, J. **IEEE Standards for Low Power Wide Area Networks**. 2016. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/16/15-16-0486-00-wng0-ieee-standards-for-low-power-wide-area-networks.ppt>>.

Semtech. **AN1200.13:** Lora modem design guide. 2013. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <https://www.semtech.com/images/datasheet/LoraDesignGuide_STD.pdf>.

_____. **AN1200.22:** Lora™ modulation basics. Semtech, 2015. Acesso em 21 nov. 2017. Disponível em: <<http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>>.

_____. **Semtech Announces Availability of Next Generation LoRa™ Gateway Reference Design Platform**. 2016. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://www.semtech.com/Press-Releases/2016/Semtech-Announces-Availability-of-Next-Generation-LoRa-Gateway-Reference-Design-Platform.html>>.

_____. **Semtech's LoRa® Geolocation Solution for Low Power Wide Area Networks is Now Available**. 2016. Acesso em 21 nov. 2017. Disponível em: <<http://www.semtech.com/Press-Releases/2016/Semtech%E2%80%99s-LoRa%C2%AE-Geolocation-Solution-for-Low-Power-Wide-Area-Networks-is-Now-Available.html>>.

Semtech Force. **LoRa Geo-location determination overview**. 2016. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://semtech.force.com/>>.

_____. **LoRaWAN - Network Architecture**. 2016. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://semtech.force.com/>>.

Sghoslya. **LoRa: Symbol Generation:** All about lora and lorawan. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<http://www.sghoslya.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>>.

Spectrum IEEE. **Popular Internet of Things Forecast of 50 Billion Devices by 2020 Is Outdated**. 2016. Acesso em 21 nov. 2017. Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/internet/popular-internet-of-things-forecast-of-50-billion-devices-by-2020-is-outdated>>.

STALLINGS, W. **Data and Computer Communications (8th Edition)**. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 2007.

SX1272: Datasheet sx1272/73 - 860 mhz to 1020 mhz low power long range transceiver. 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<http://www.semtech.com/images/datasheet/sx1272.pdf>>.

TELKAMP, T. **LoRa, LoRaWAN, and the challenges of long-range networking in shared spectrum**. 2015. Acesso em 18 dez. 2017. Disponível em: <<https://www.kivi.nl/uploads/media/584e9180f3822/cr-platform-lora-workshop-shared.pdf>>.

____. **The Things Network: Building a global internet of things network together.** 2016. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/0B49WRBg1NvMgQmdlM3doaWdVMWc/view>>.

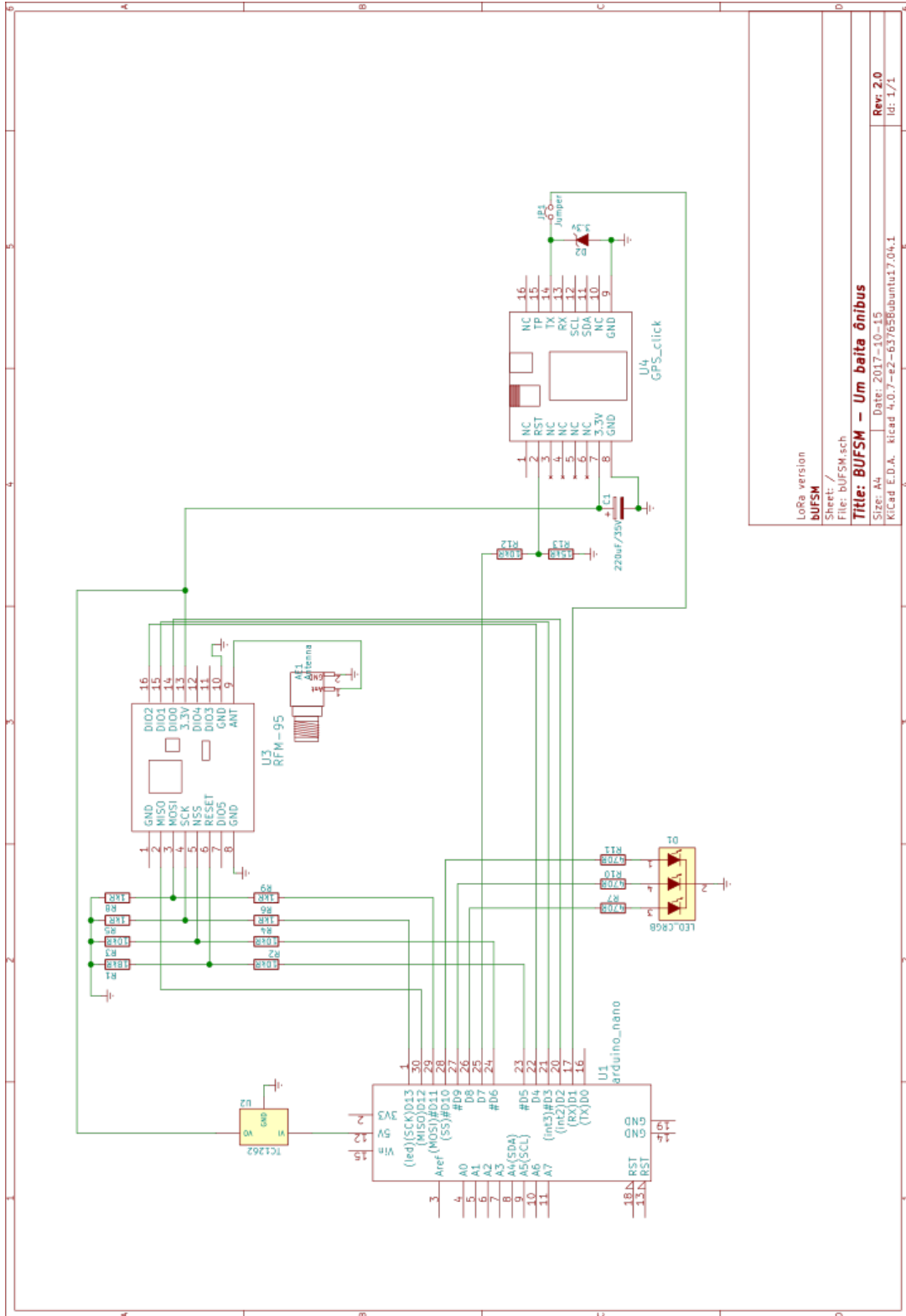
The Things Network.

TTN. **Frequency plan and regulation by country.** 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/wiki/LoRaWAN/Frequencies/By-Country#frequency-plan-and-regulations-by-country>>.

TTN Mapper. 2017. Acesso em 21 nov. 2017. Disponível em: <<https://ttnmapper.org/>>.

WND Brasil. **Aplicações da Tecnologia Sigfox: Rastreamento e localização.** 2017. Acesso em 22 nov. 2017. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/aplicacoes-da-tecnologia-sigfox-rastreamento-e-localizacao/>>.

APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO RASTREADOR DO ÔNIBUS



LoRa version
BUFSM

Sheet: /
 File: BUFSM.sch

Title: **BUFSM – Um baita Ônibus**

Size: A4 Date: 2017-10-15

KiCad E.D.A. kicad v.0.7-e2-637658ubuntu17.04.1

Rev: 2.0
 It: 1/1