



INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de
Processos de Mineração - PROFICAM
Universidade Federal De Ouro Preto - Escola de Minas
Associação Instituto Tecnológico Vale**

Dissertação

**PROJETO DE UMA REDE DE INTERNET DAS COISAS PARA
MONITORAMENTO E ALERTA DE EMERGÊNCIA EM ÁREAS DE
RISCO**

Leonardo Vidigal Meireles

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2018**

Leonardo Vidigal Meireles

**PROJETO DE UMA REDE DE INTERNET DAS COISAS PARA
MONITORAMENTO E ALERTA DE EMERGÊNCIA EM ÁREAS DE
RISCO**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Luis Guilherme Uzeda Garcia.

Coorientador: Prof. Alan Kardek Rêgo Segundo.

Coorientador: Rodrigo José de Ávila Cartaxo.

Ouro Preto

2018

M5148 Meireles, Leonardo Vidigal.
Projeto de uma rede de internet das coisas para monitoramento e alerta de emergência em áreas de risco [manuscrito] / Leonardo Vidigal Meireles. - 2018.
134f.: il.: color; graf.; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Luis Guilherme Uzeda Garcia.
Coorientador: Prof. Dr. Alan Kardek Régio Segundo.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais. Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.
Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Minerais.

1. Avaliação de riscos. 2. Internet sem fio. 3. Internet das coisas. 4. Barragens e açudes. 5. Deslizamento. I. Garcia, Luis Guilherme Uzeda. II. Segundo, Alan Kardek Régio. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

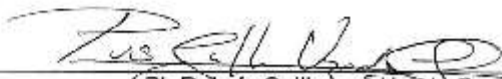
Catálogo: www.sisbin.ufop.br 681.5:622.2

Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos
de Mineração - PROFICAM

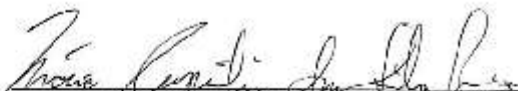
Projeto de uma Rede de Internet das Coisas para Monitoramento e Alerta de
Emergência em Áreas de Risco

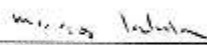
Leonardo Vidigal Meireles

Dissertação defendida e aprovada em 23 de abril de 2018 pela banca
examinadora constituída pelos professores:


Ph.D. Luís Guilherme Uzeda Garcia
Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)


D.Sc. Alan Kardek Bego Segundo
Coorientador – Universidade Federal de Ouro Preto


D.Sc. Mário Cupertino da Silva Júnior
Membro externo – Universidade Federal de São João del-Rei


D.Sc. Marcos Tornio Kakitani
Membro externo – Universidade Federal de São João del-Rei


D.Sc. Robson Domingos Vieira
Membro externo – Ektrum

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me permitiu ter as condições para estar vivendo esse momento tão gratificante, quando mais um sonho se torna realidade. Agradeço aos meus amados pais, Zacarias e Luzia, a quem devo todas as conquistas de minha vida, agradeço por sempre me incentivarem a estudar e serem firmes na cobrança de bons resultados, pelos sacrifícios que fizeram para dar a mim e a meus irmãos uma boa educação, além de todo amor e carinho. Aos meus amados irmãos, Leone e Luiz, que sempre entenderam minhas ausências por compromissos profissionais e acadêmicos. Minha família é sem dúvida uma grande bênção em minha vida e me ajudaram em cada conquista até hoje, por isso partilho esse momento com vocês.

Agradeço imensamente a minha amada esposa Paula, como foi dedicada, atenciosa, amável e paciente comigo, nos vários momentos difíceis, de stress elevado, sempre me confortando e passando uma confiança enorme em meu potencial, potencial que muitas vezes eu mesmo não sabia que possuía. Com certeza essa conquista também é sua, essa conquista é nossa!

Um agradecimento sincero aos meus professores do mestrado, em especial ao meu orientador Dr. Luis Guilherme Uzeda Garcia, um profissional fantástico com quem tive a honra de trabalhar nesse projeto e aprender muito sobre o mundo das telecomunicações, ao meu coorientador Alan Kardek Rêgo Segundo, também um profissional de capacidade ímpar e que me ajudou muito nessa jornada, ao coorientador Rodrigo Cartaxo que me auxiliou muito nas pesquisas de patente. Posso dizer sem receio que fui privilegiado por ser orientado por profissionais tão competentes e dedicados, com quem compartilho essa conquista, além de deixar um sincero muito obrigado.

Não poderia deixar de agradecer enormemente ao Instituto Tecnológico Vale que possibilitou a realização desse trabalho, seja por meio da criação do mestrado em parceria com a UFOP, ou por financiar a compra dos equipamentos e licença de softwares utilizados durante o projeto, além de disponibilizar a infraestrutura física do laboratório de automação. Agradeço ainda ao amigo Marcos Paulo Torre que não mediu esforços em me ajudar na disponibilização de recursos do ITV para realização dos testes de campo do projeto.

Agradeço aos amigos da Warning Band, Franknelli Araújo e Diego Barcelos, com quem compartilhei muitas ideias para transformar o projeto em uma empresa de sucesso que

usa a tecnologia para melhorar a vida das pessoas. Ao Diego, em especial pelas inúmeras horas discutindo soluções, tecnologias e porque não dizer, os vários problemas e desafios enfrentados. Vamos em frente WB!!!

Enfim, um sincero muito obrigado a todos!

“Quanto mais você suar nos treinamentos, menos sangrará no campo de batalha.” George S. Patton

RESUMO

Resumo da Dissertação apresentada à Escola de Minas/UFOP e ao ITV como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PROJETO DE UMA REDE DE INTERNET DAS COISAS PARA MONITORAMENTO E ALERTA DE EMERGÊNCIA EM ÁREAS DE RISCO

Leonardo Vidigal Meireles

Abril/2018

Orientadores: Luis Guilherme Uzeda Garcia

Alan Kardek Rêgo Segundo

Rodrigo Cartaxo

O presente trabalho apresenta uma metodologia para desenvolvimento de projetos de rede de longo alcance e baixo consumo de energia, baseado nas tecnologias de internet das coisas para aplicação em áreas de risco como: a jusante de barragens, deslizamento de encostas, alagamentos, áreas industriais, entre outras. Acidentes como os ocorridos na região serrana do Rio de Janeiro, em janeiro de 2011, e na barragem de Fundão da Samarco Mineração SA, em novembro de 2015, evidenciaram a fragilidade dos planos de emergência existentes, que em sua grande maioria não contemplam sistemas automatizados de alerta. Grandes desafios são encontrados por engenheiros durante o desenvolvimento de projetos de alerta de emergência, sendo que o sistema de comunicação sem fio é, sem dúvida, um dos grandes problemas enfrentados por estas equipes. Dessa forma, este trabalho visa estabelecer uma metodologia com as seguintes etapas: (i) definição dos requisitos do sistema; (ii) realização de estudo de possíveis tecnologias de rede de longo alcance e baixo consumo de energia compatíveis; (iii) comparação entre as tecnologias (com base nos requisitos definidos); (iv) seleção da tecnologia mais indicada; (v) simulação de propagação de RF na área de interesse; (vi) implantação do projeto piloto; e (vii) comparação dos resultados de cobertura de sinal em campo com as simulações realizadas. Para validação da metodologia, foi desenvolvido um estudo de caso na área urbana da cidade de Ouro Preto, onde um levantamento geológico

realizado pelo Departamento de Engenharia Geotécnica da Universidade Federal de Ouro Preto apontou que grande parte do território possui classificação de risco de movimentação de massas com grau médio, alto ou muito alto. Além disso, a cidade está localizada em um vale a jusante da barragem do Marzagão, que possui um reservatório de 3,8 milhões de metros cúbicos de rejeito do processo de beneficiamento de bauxita. No projeto piloto, foi implantada uma rede ampla de longo alcance, (*Long Range Wide Area Network* – LoRaWAN), composta por duas células, de forma que toda a região de interesse fosse coberta. Os testes de campo com medição da intensidade do sinal de radiofrequência comprovaram a eficácia da rede em dez pontos definidos como prioritários. Uma análise que relaciona a intensidade do sinal, a distância dos pontos, a forma de visada e o ambiente de instalação também foi realizada, de forma a validar as características de alcance, poder de penetração e imunidade a ruído apresentada pela tecnologia LoRaWAN. Por fim, constatou-se que as tecnologias de internet das coisas têm plena capacidade de atender a aplicações voltadas ao gerenciamento de riscos, incluindo seu uso em sistemas de monitoramento e alerta de emergências.

Palavras-chave: área de risco, internet das coisas, wireless, comunicação sem fio, barragens, deslizamentos, Ouro Preto.

ABSTRACT

Abstract of Dissertation presented to Escola de Minas/UFOP and ITV as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PROJECT OF AN INTERNET OF THINGS NETWORK FOR MONITORING AND ALERT IN HAZARDOUS AREAS

Leonardo Vidigal Meireles

Abril/2018

Advisors: Luis Guilherme Uzeda Garcia
 Alan Kardek Rêgo Segundo
 Rodrigo Cartaxo

This work presents a methodology to develop long-range and low power network projects, based on internet of things technologies for application in hazardous areas such as: downstream of dams, landslides, floods, industrial areas, among others. Accidents such as those occurred in the mountainous region of Rio de Janeiro in January 2011 and in the dam of Fundão of the Samarco Mineração SA in November 2015, highlighted the fragility of the emergency plans, which for the most part do not include automated alert systems. So, many challenges are found by engineers during the development of emergency alert projects, and the wireless communication system is undoubtedly one of the major problems faced by these teams. Thus, this work aims to establish a methodology with the following steps: (i) definition of system requirements; (ii) study of possible compatible long-range and low power network technologies; (iii) comparison of technologies (based on defined requirements); (iv) selection of the most appropriate technology; (v) simulation of RF propagation in the area of interest; (vi) implementation of the pilot project; and (vii) comparison of the signal coverage results in the field with the simulations performed. To validate the methodology, a case study was developed in the urban area of Ouro Preto city, where a geological survey conducted by Universidade Federal de Ouro Preto, indicated that about most part of the territory has medium, high or very high risk of landslip, besides being in a valley located downstream of

the Marzagão dam, which has a reservoir with 3.8 million cubic meters of tailings. In the pilot project was implemented a LoRaWAN network composed of two cells, so that the whole region of interest was covered. The field tests with measurement of the radiofrequency signal intensity proved the effectiveness of the network in ten priority points. An analysis that related signal strength, distance of the points, line of sight and installation environment was also carried out in order to validate the characteristics of range, *indoor* signal and noise immunity presented by LoRaWAN technology. Finally, it was found that the internet of things technologies have full capacity to serve applications aimed at risk management, including their use in monitoring systems and emergency alert.

Keywords: hazardous areas, internet of things, wireless communication, drambreak, landslips, Ouro Preto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desastres naturais no Brasil.	27
Figura 2 – Arquitetura padrão de Internet das Coisas	34
Figura 3 – Comparação entre LPWAN, Zigbee e 3G/4G/5G.....	38
Figura 4 – Topologia da rede LoRaWAN.	40
Figura 5 – Topologia da rede Sigfox.	45
Figura 6 – Comparação entre espectro do RPMA com o do Wi-Fi.	51
Figura 7 – Comparação entre RPMA, Wi-Fi e Bluetooth.	52
Figura 8 – Padronização dos canais de NB-IoT.	53
Figura 9 – Representação da Lei de Snell.	60
Figura 10 – Digrama da difração de uma onda.	61
Figura 11 – Reflexão em um plano ideal.....	62
Figura 12 – Reflexão difusa.....	63
Figura 13 – Raios disparados por uma fonte sendo refletidos, refratados e difratados.	67
Figura 14 – Mapa de Perigo a Escorregamentos da Cidade de Ouro Preto-MG.....	83
Figura 15 – Telas iniciais do software de simulação de propagação Wireless Insite 3.0.2.3.	89
Figura 16 – Gráfico de atribuição de pontuação às tecnologias	97
Figura 17 – Vista de cima da distribuição dos receptores no DEM da cidade de Ouro Preto – MG.	99
Figura 18 – Planejamento da rede de IoT de Ouro Preto.	100
Figura 19 – Mapa de calor do PL para ERB da Escola de Minas do Centro calculado pelo modelo X3D. Mínimo: -36 dB; Máximo: -250 dB.	103

Figura 20 – Mapa de calor do PL para ERB da Escola de Minas do Morro do Cruzeiro calculado pelo modelo X3D. Mínimo: -36 dB; Máximo: -250 dB.....	104
Figura 21 – Mapa de calor do PL para ERB da Escola de Minas do Centro calculado pelo modelo Vertical Plane. Mínimo: -36 dB; Máximo: -250 dB.....	105
Figura 22 – Mapa de calor do PL para ERB da Escola de Minas do Morro do Cruzeiro calculado pelo modelo Vertical Plane. Mínimo: -36 dB; Máximo: -250 dB.....	105
Figura 23 – Instalação da ERB 2 no prédio de laboratórios da Escola de Minas do Morro do Cruzeiro.	108
Figura 24 – Instalação da ERB 1 ao lado do observatório do Museu da Escola de Minas do Centro.	109
Figura 25 – Dispositivo LoRaWAN composto por Arduino UNO com shield Dragino.	110
Figura 26 – Interface de monitoramento de gateway na plataforma TTN.	111
Figura 27 – Interface <i>mobile</i> de monitoramento de dispositivos na plataforma TTN.....	112
Figura 28 – Interface gráfica do dispositivo 01sensor03 na plataforma Cayenne.....	113
Figura 29 – Inclinômetros dos pontos: Santa Casa, Museu e Ponte Seca respectivamente.	114
Figura 30 – Inclinômetros dos pontos: Getúlio Vargas, S.F. Paula e Lab. Química respectivamente.	115
Figura 31 – Inclinômetros dos pontos: São José e S. Francisco respectivamente.....	115
Figura 32 – Linha de visada LOS do ponto S.F. Paula a uma distância de 1638 metros.	117
Figura 33 – Comparação de potência recebida calculada e RSSI.	118
Figura 34 – Variação de RSSI medido no ponto Lab. Química.....	119
Figura 35 – Alteração do nível do RSSI após mudança de ERB.	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de riscos naturais conforme definição da EM-DAT.....	26
Tabela 2 – Classificação de riscos tecnológicos conforme definição da EM-DAT	26
Tabela 3 – Exemplo de informações enviadas pelos dispositivos na rede Sigfox.	45
Tabela 4 – Lista de folhas de dados utilizadas	85
Tabela 5 – Definição das notas para avaliação dos requisitos.....	87
Tabela 6 – Pontos de medição de RSSI.....	91
Tabela 7 – Requisitos principais da rede de comunicação.	94
Tabela 8 – Comparação tecnológica dos requisitos.....	96
Tabela 9 – Parametrização das simulações.....	102
Tabela 10 – Potência recebida de <i>uplink</i> baseado em simulações de PL.	106
Tabela 11 – Componentes mínimos para o projeto piloto.....	107
Tabela 12 – Especificação de componentes da rede LoRaWAN.	107
Tabela 13 – Cálculo da Data Rate máximo.	114
Tabela 14 – Valores das medições de RSSI e PRR.....	116

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

2G – Segunda geração da telefonia celular (GSM, GPRS, EDGE)

3D – Três dimensões

3G – Terceira geração da telefonia celular (CDMA, WCDMA)

3GPP – 3rd Generation Partnership Project

4G – Quarta geração da telefonia celular (LTE)

5G – Quinta geração da telefonia celular (LTE)

AES – Advanced Encryption Standard

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações

APG – Adjacent Path Generation

BPSK – Binary Phase Shift Keying

BW – Bandwidth

CDMA – Code Division Multiple Access

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais

CEPED – Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil

CPU – Central Process Unit

CR – Coding Rate

CRED – Centre for Research on the Epidemiology of Disasters

CSS – Chirp Spread Spectrum

D-BPSK – Differential Binary Phase Shift Keying

DEM – Digital Elevation Model

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

DPA – Dano Potencial Associado

DR – Data Rate

DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum

EDGE – Enhanced Data rates for GSM Evolution

EM-DAT – Emergency Events Database

EPC – Exact Path Correction

EPO – European Patent Office

ERB – Estação/Estações Rádio Base

EUI64 – Extended Unique Identifier 64 bits

FDD – Frequency Division Duplex

FDMA – Frequency Division Multiple Access

FDTD – Finite Difference Temp Domain

FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum

GO – Geometrical Optics

GPIO – General Purpose Input / Output

GPS – Global Positioning System

GPRS – General Packet Radio Service

GPU – Graphics Processing Unit

GSM – Global System for Mobile Communications

GTD – Geometrical Theory of Diffraction

HTTPS – Hyper Text Transfer Protocol Secure

I2C – Inter-Integrated Circuit

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT – Internet of Things (Internet das Coisas)

IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial

IP – Internet Protocol

ISM – Industrial Sientific and Medical

ITV – Instituto Tecnológico Vale

LOS – Line of Sight

LPWAN – Low Power Wide Area Network

LTE – Long Term Evolution

MAC – Media Access Control

M2M – Machine to Machine

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia

MIMO – Multiple Input / Multiple Output

MIT – Massachusetts Institute of Technology

ND – Não disponível

NLOS – Non - Line of Sight

NPDSCH – Physical Downlink Shared Channel

NPUSCH – Physical Uplink Shared Channel

NUGEO – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da UFOP

OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access

ONG – Organização Não Governamental

PAE – Plano de ação de emergência

PAEBM – Plano de Ação de Emergência de Barragens de Mineração

PIB – Produto Interno Bruto

PL – Path Loss

PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens

PROFICAM – Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração

PRR – Packet Reception Ratio

UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

UDP – User Datagram Protocol

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

UMTS – Universal Mobile Telecommunication System

UNESCO – United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization (Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura)

USB – Universal Serial Bus

UTD – Uniform Theory of Diffractions

RF – Radiofrequência

RFID – Radio-Frequency Identification

RPMA – Random Phase Multiple Access

RSSI – Receive Signal Strength Indicator

RX – Receptor

SBR – Shooting and Bouncing Ray

SDR – Software Defined Radio

SF – Spreading Factor

SIR – Signal Interference Ratio

SNR – Signal to Noise Ratio

SPI – Serial Peripheral Interface

SRTM – Shuttle Radar Topographic Mission

TBS – Transport Block Size

TCP – Transmission Control Protocol

TEM – Transverse Electromagnetic

TTN – The Things Network

TX – Transmissor

UHF – Ultra High Frequency

UNB – Ultra Narrow Band

USGS – United States Geological Survey

VHF – Very High Frequency

VPN – Virtual Private Network

WAN – Wide Area Network

WB – Warning Band

WCDMA – Wide-Band Code-Division Multiple Access

WMO – World Meteorological Organization

ZAS – Zona de Alto Salvamento

ZSS – Zona de Segurança Secundária.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Problema	22
1.2	Objetivo geral	23
1.3	Objetivos específicos	23
1.4	Publicações	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO E FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA.....	25
2.1	Áreas de Risco	25
2.2	Planos de Ação de Emergência de barragens	27
2.3	Sistemas de alerta automatizado	30
2.3.1	Principais patentes relacionadas a sistema de alerta automatizado	31
2.4	Arquitetura de redes de internet das coisas.....	33
2.5	Redes LPWAN	36
2.5.1	LoRaWAN.....	38
2.5.2	Sigfox	43
2.5.3	Ingenu	48
2.5.4	NB-IoT	53
2.5.5	Digi XBee-PRO.....	56
2.6	Propagação de sinal de radiofrequência	58
2.7	Simulação de propagação de radiofrequência	63
2.7.1	Modelo Digital de Elevação	65
2.7.2	Ray Tracing	66
2.7.3	Modelo Free Space	74
2.7.4	Modelo Hata	75
2.7.5	Modelo Vertical Plane	76
2.7.6	Modelo X3D	77

2.8	Medição de intensidade do sinal de radiofrequência	79
3	MATERIAIS E MÉTODOS	82
3.1	Caracterização do perímetro urbano da cidade de Ouro Preto - MG	82
3.2	Levantamento de dados utilizados no projeto	84
3.2.1	DEM da USGS para região de Ouro Preto	84
3.2.2	Folhas de dados dos microchips de radiofrequência	85
3.3	Metodologia	85
3.3.1	Definir os requisitos da rede	86
3.3.2	Comparar as tecnologias	87
3.3.3	Simular propagação de radiofrequência	87
3.3.4	Implantar a rede comunicação e realizar medições	90
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
4.1	Definição dos requisitos da rede	93
4.2	Comparação tecnológica	95
4.3	Simulação de propagação de radiofrequência	99
4.3.1	Simulações	101
4.4	Implantação da rede de comunicação e resultado das medições	107
4.4.1	Instalação da rede LoRaWAN em Ouro Preto	108
4.4.2	Medição de intensidade de sinal nos receptores	113
5	CONCLUSÃO	121
6	TRABALHOS FUTUROS	122
	REFERÊNCIAS	124
	APÊNDICES	131

1 INTRODUÇÃO

Segundo a ONG International Rivers (2018), estima-se que 10% de toda população mundial resida em áreas à jusante de algum tipo de barragem, seja de rejeitos de mineração, geração de energia, irrigação, abastecimento de água ou entretenimento. No Brasil existem 2506 barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações Sobre Barragens – SNISB, sendo que 671 são de rejeitos de mineração, conforme dados da Agência Nacional de Águas – ANA (ANA, 2018). Além das barragens, fenômenos naturais como tempestades, furacões, tornados, terremotos, alagamentos, incêndios e deslizamento de encostas são causadores de acidentes e mortes. O Brasil tem alta ocorrência desse tipo de acidente, principalmente pelo fato do país possuir uma grande extensão territorial, relevo heterogêneo e exposição a vários fatores climáticos. Segundo o relatório Atlas Weather Extremes, no ano de 2011, ocorreram no Brasil mais de 900 mortes devido a inundações, além disso, as perdas econômicas durante o período de 1970 a 2012 causadas por catástrofes climáticas chegaram a 31,4 bilhões de dólares (WMO, 2014).

Os números mostram o quanto é importante esta questão e revela a realidade de descaso e abandono no qual as populações residentes nestas áreas de risco estão submetidas. São raras as cidades brasileiras que estão preparadas para proteger sua população deste tipo de desastre. Como exemplo, a cidade mineira de Ouro Preto possui a maior parte do seu território classificado com grau de risco médio, alto ou muito alto em relação ao risco de deslizamento de encostas, segundo levantamento realizado pelo Departamento de Engenharia Geotécnica da Universidade Federal de Ouro Preto (FONTES, 2011). Mesmo com o mapeamento, onde são apontadas as áreas que necessitam de monitoramento por meio de inclinômetros¹, essas leituras são realizadas manualmente. Além disso, não existe um sistema de alerta de emergência automatizado, seja por meio de sirenes ou outros dispositivos, que possa ser utilizado pela Defesa Civil do município para alertar os habitantes das áreas de risco sobre uma situação de emergência em tempo real. No final do ano de 2011, após um longo período de chuvas, ocorreu um grande deslizamento de terra em uma encosta situada em frente à rodoviária da cidade. Esse evento, infelizmente, culminou na morte de duas pessoas que estavam na rodoviária, que ficou parcialmente soterrada, sendo interditada por vários dias,

¹ Inclinômetros são instrumentos formados por tubos segmentados inseridos ao longo de furos de sondagens, que permitem o monitoramento dos deslocamentos horizontais de um maciço ao longo da profundidade e a consequente localização da superfície crítica de ruptura envolvendo o talude (FONTES, 2011).

assim como a principal avenida de acesso à cidade (MAGALHÃES e FERREIRA NETO, 2014).

Em novembro de 2015, um desastre ambiental causado pelo rompimento da barragem de Fundão, pertencente à Samarco Mineração SA e localizada na Mina de Germano na cidade de Mariana em Minas Gerais, provocou um processo de questionamentos e exigência de mudanças por parte da população (NESP-PUCMINAS, 2015). O acidente iniciou uma série de discussões a respeito da segurança das barragens existentes em nosso país, e colocou em dúvida todo o processo de liberação de licenças de instalação e operação, assim como os Planos de Ação de Emergência de Barragem de Mineração (PAEBM). Em resposta aos questionamentos, o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), determinou por meio da portaria nº 14, de 15 de janeiro de 2016, publicada no Diário Oficial da União, que os empreendimentos minerários apresentassem comprovantes de entrega das cópias físicas dos PAEBM para as prefeituras e defesas civis municipais e estaduais, conforme exigido pelo art. 7º da Portaria nº 526, de 2013 (DNPML, 2016).

Ainda como resposta à pressão da sociedade sobre a normatização das barragens de mineração brasileiras, o DNPM publicou a portaria de número 70.389, de 17 de maio de 2017 que entre outras coisas, criou o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração, que estabelece diversos requisitos necessários à operação dessas estruturas, assim como determina os responsáveis técnicos e os detalhes mínimos do PAEBM. Outro ponto importante definido pela portaria é a obrigatoriedade do empreendedor, responsável pela barragem de mineração, instalar na Zona de Alto Salvamento (ZAS²) sistemas de alarme, contemplando sirenes ou outros dispositivos, para alertar a população de situações de emergência (DNPM, 2017). Como parte integrante do PAEBM, o plano de resposta a emergências deve ser avaliado após a realização de exercícios simulados e/ou na ocorrência de situações reais, com o objetivo de testar a sua eficácia, detectar possíveis falhas e proceder aos ajustes (BALBI, 2008; QUADRO, 2014; SESDEC-RJ, 2008).

² Zona de Autossalvamento - ZAS: região do vale à jusante da barragem em que se considera que os avisos de alerta à população são da responsabilidade do empreendedor, por não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em situações de emergência, devendo-se adotar a maior das seguintes distâncias para a sua delimitação: a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos ou 10 km.

É extremamente importante que no plano de resposta a emergência esteja descrito de forma objetiva todo o procedimento de comunicação entre as entidades responsáveis, sendo elas: empresa proprietária do empreendimento, quando for o caso, defesas civis dos municípios envolvidos e as comunidades com risco de serem atingidas, para que em situação de emergência seja possível informar ao maior número possível de pessoas para que elas possam evacuar a área de risco em direção às áreas seguras, onde possam ser resgatadas pelos órgãos governamentais competentes.

Conforme a legislação do trabalho, toda empresa brasileira deve ter um plano de ação de emergência (PAE), independente do tamanho ou seguimento de atuação. Um bom PAE parte de um eficiente plano de comunicação, que possui acima de tudo uma estratégia de comunicação robusta, e dessa forma, torna-se extremamente necessário que um eficiente sistema de comunicação seja construído de forma a tornar a comunicação automática, segura, precisa e assertiva (BALBI, 2008; QUADRO, 2014; SESDEC-RJ, 2008).

1.1 Problema

No Brasil há uma grande dificuldade de se encontrar sistemas de alerta de emergência automatizados em áreas de risco, isso porque a legislação não exige esse tipo de recurso na maioria dos empreendimentos e nas cidades. Assim, empresas especializadas no estudo, projeto e implantação de sistemas de alerta são pouco comuns no país, o que dificulta o trabalho das pessoas responsáveis pela implantação de um PAE. Um exemplo encontrado na literatura é o sistema de alerta das usinas nucleares da Eletronuclear em Angra dos Reis – RJ. Lá existe um sistema de comando por voz, acionado por uma central de monitoramento, que possibilita a comunicação com a comunidade em caso de um sinistro, porém se limita a um raio de 5 km da usina em uma região urbana com presença de redes de dados móveis, telefonia fixa e celular, além de infraestrutura de energia elétrica. O sistema é fabricado por uma empresa americana e consiste em grandes amplificadores de áudio de alto custo de implantação e manutenção.

Em relação às barragens de mineração, as condições das regiões são ainda mais complexas. Em grande parte dos casos são áreas afastadas das grandes cidades, onde sistemas de telefonia móvel, internet e comunicação em geral são inexistentes; a área de abrangência é muito grande devido à existência de rios, córregos e riachos que conduzem os rejeitos a

longas distâncias, além do relevo montanhoso e regiões de difícil acesso. Isso torna a implantação de sistemas, como o da Eletronuclear, extremamente onerosa e complexa.

Nas cidades brasileiras há o exemplo da região serrana do Rio de Janeiro, onde após o trágico ano de 2011, com a morte de 918 pessoas na até então, maior tragédia ambiental do país, foram instaladas sirenes de alerta com comunicação via radiofrequência. Por outro lado, a cidade de Ouro Preto – MG, que é tema do estudo de caso deste trabalho, é um exemplo que mostra a ausência de sistema de alerta automatizado, mesmo a cidade tendo a maior parte de seu território urbano classificado com grau de risco médio, alto ou muito alto para deslizamento. Além disso, a cidade está situada em um vale à jusante da barragem Marzagão, que possui um reservatório de 3,8 milhões de metros cúbicos de rejeito do processo de beneficiamento de bauxita e que não possui sistema de alerta automatizado, o que reforça o quanto este assunto ainda é desvalorizado no nosso país.

1.2 Objetivo geral

Neste trabalho propõe-se implantar uma rede de baixo consumo de energia e de longo alcance para internet das coisas, que possibilite a cobertura de todas as áreas de risco mapeadas na área urbana da cidade de Ouro Preto – MG, assim como o desenvolvimento futuro de um sistema de monitoramento e alerta de emergência automatizado.

1.3 Objetivos específicos

Este trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- i. validar a metodologia definida para o desenvolvimento de projetos de internet das coisas para cobertura de grandes áreas de risco, utilizando a cidade de Ouro Preto como projeto piloto, porém não se limitando a esta aplicação. Assim, aplicações com exigências diferentes, para os mesmos requisitos, podem ser tratadas utilizando esta metodologia;
- ii. avaliar as principais tecnologias de longo alcance e baixo consumo de energia existentes no mercado;
- iii. selecionar a tecnologia mais apta para o estudo de caso da cidade de Ouro Preto com base nos valores ideais definidos para os requisitos do projeto, reduzindo assim os custos;

- iv. disponibilizar uma rede de internet das coisas que seja de livre acesso às pessoas para desenvolverem novos projetos, e que traga valor à comunidade acadêmica e à população da cidade de Ouro Preto.

1.4 Publicações

Este trabalho deu origem a dois artigos, sendo: (i) Projeto e Implantação de Rede de Internet das Coisas em Regiões Montanhosas e (ii) Coisas para se saber sobre a Internet das Coisas – Um Guia Prático. Ambos os artigos foram aceitos no XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais – SBrT2018, que ocorrerá de 16 a 19 de Setembro de 2018, em Campina Grande – PB.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA

Para a elaboração do estado da arte foi necessário o estudo de disciplinas que contemplam as duas vertentes principais do projeto. Primeiramente, uma explicação geral sobre a motivação do trabalho, passando por gestão de áreas de risco, planos de ação de emergência de barragens e os sistemas remotos de alerta automatizado utilizados atualmente nessas áreas. Posteriormente, a revisão passa pelas disciplinas necessárias para se construir uma rede com tecnologia de internet das coisas em grandes áreas e que possa ser utilizada para gerenciamento de risco. Para isso são detalhados tópicos como: arquitetura de redes de Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT), redes de baixo consumo de energia e longo alcance (*Low Power Wide Area Network* – LPWAN), propagação de sinal de radiofrequência, simulação de propagação de radiofrequência e medição de sinal de radiofrequência.

2.1 Áreas de Risco

As áreas de risco são regiões sujeitas a ocorrências de desastres, naturais ou não, causados por eventos climáticos, ocupação desordenada do solo ou empreendimentos industriais. Um relatório da WMO (World Meteorological Organization) levantou os desastres ocorridos no mundo entre os anos de 1972 e 2012. Todos os desastres juntos causaram a morte de 1,94 milhões de pessoas, sendo que as perdas financeiras causadas chegaram a 2,4 trilhões de dólares (WMO, 2014). Nestes números estão contabilizados somente os desastres causados por eventos climáticos, sendo que as causas utilizadas como critério de avaliação estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação de riscos naturais conforme definição da EM-DAT

Subgrupo	Causa Principal	Detalhamento
Hidrológica	Inundações e enchentes	Inundações em rios, inundações repentinas e após fortes chuvas e tempestades.
	Deslizamento de massas	Falhas rochosas, deslizamento de terra, avalanches, subsidência do solo.
Meteorológica	Tempestades, ciclones extra-tropicais,	Trovoadas, raios, tempestade de neve, tempestade de areia ou poeira, tornados, tempestade orográfica (ventos fortes).
Climatológico	Temperatura extrema	Ondas de calor, ondas de frio, geada, nevasca, condições extremas de frio.
	Seca	Longos períodos sem chuvas
	Incêndios	Incêndios em florestas e demais vegetações.

Fonte: Adaptado de CRED, 2009.

O CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters) classificou os acidentes com causas geradas por atividades humanas no grupo de tecnológicos, sendo a este grupo atribuído todo e qualquer risco causado por fator humano (CRED, 2009). A seguir estão detalhados os subgrupos causadores destes riscos na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação de riscos tecnológicos conforme definição da EM-DAT

Subgrupo	Causa Principal
Acidente industrial	Derramamento de produtos químicos, colapso estrutural, explosão, incêndios industriais, vazamentos de gases, envenenamentos, exposição a radiação, derramamento de óleo, outros acidentes industriais.
Acidente de transporte	Aéreo, rodoviário, ferroviário e marinho.
Acidentes gerais	Colapsos estruturais não industriais, incêndios e explosões não industriais, outros acidentes.

Fonte: Adaptado de CRED, 2009.

No Brasil os grandes causadores de desastres naturais são a seca, as enxurradas e as inundações, conforme apresentado no gráfico da Figura 1(CEPED, 2012).

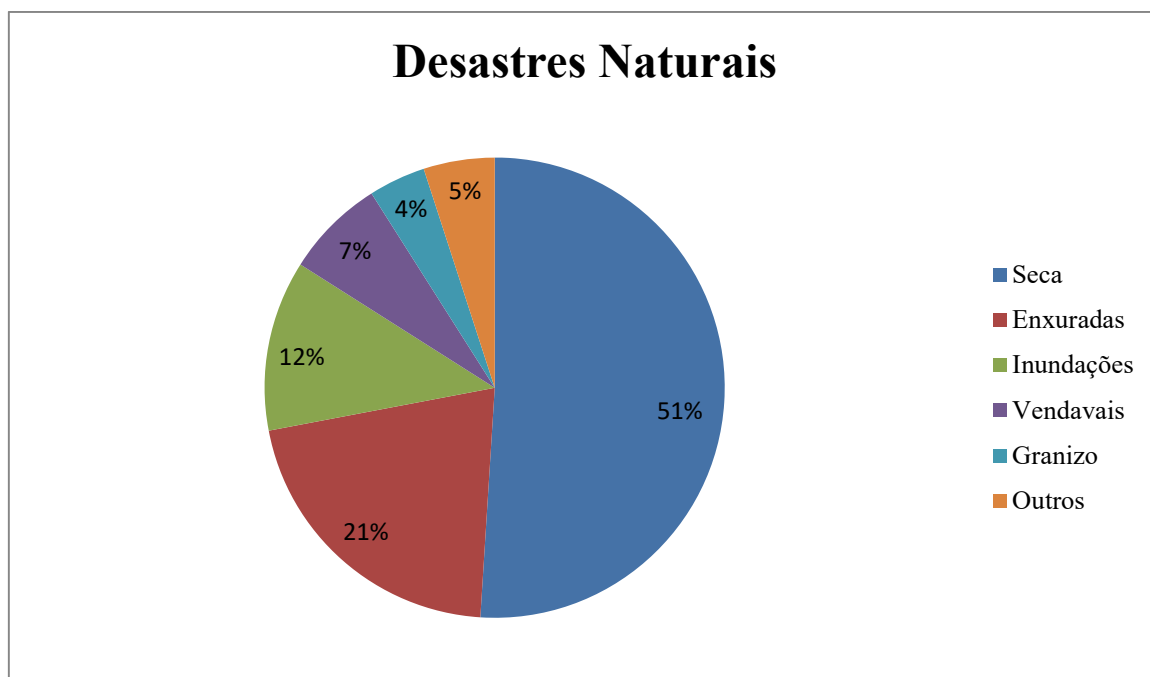


Figura 1 – Desastres naturais no Brasil.

Fonte: Adaptado de CEPED, 2012.

Os tipos de desastres naturais mais registrados são decorrentes do excesso ou da escassez de água, sendo assim, o monitoramento climático é uma excelente ferramenta de auxílio na prevenção de fatalidades e perdas materiais. Para o grupo de desastres provocados pelo excesso de água, como as enxurradas, enchentes, deslizamentos de encostas e desmoronamento, existe um fator primordial para o fator de risco, que é a ação do homem no meio ambiente, principalmente no que tange à ocupação desordenada de áreas de risco potencial. Isso se deu no Brasil pela rápida urbanização ocorrida após a década de 1950, desacompanhada de políticas públicas (CEMADEN, 2011). Assim, existe nas grandes cidades brasileiras grande parcela da população vivendo em algum tipo de área de risco, sendo que, além disso, existe também a falta de sistemas de monitoramento e alerta de emergência na maioria das cidades, o que torna os planos de ações de emergência, quando existentes, pouco eficientes em seu maior objetivo: garantir a segurança da população.

2.2 Planos de Ação de Emergência de barragens

A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, regulamenta que as barragens de rejeito de mineração, assim como as de qualquer outro tipo, são regidas por legislação específica, sendo que a última alteração vigente é datada de 20 de setembro de 2010:

Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000 (BRASIL, 2010).

Esta mesma lei, que estabelece a Política de Segurança de Barragens, define no artigo 11 a obrigatoriedade do PAE, que é exigido sempre que a barragem possuir um potencial de risco associado alto em função de sua categoria de risco e do dano potencial associado (BRASIL, 2010). O Dano Potencial Associado (DPA) é dano que pode ocorrer devido ao rompimento ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, a ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas, impactos sociais, econômicos e ambientais (DNPM, 2017). O DPA é calculado pelo empreendedor e validado pelo DNPM (BRASIL, 2010).

O PAE é minimamente definido pelo artigo 12 e tem como principal função estabelecer as ações a serem tomadas pelo empreendedor em uma eventual situação de emergência envolvendo a barragem em questão, além de estabelecer um plano de comunicação aos agentes a serem notificados (BRASIL, 2010). Os critérios mínimos a serem estabelecidos no PAE são (BRASIL, 2010):

- i. identificação e análise das possíveis situações de emergência;
- ii. procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou de condições potenciais de ruptura da barragem;
- iii. procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação; e
- iv. estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência.

O inciso IV do artigo 12 exige a necessidade de uma estratégia de divulgação de uma situação de emergência, citando os sistemas de alertas como um eventual recurso, porém sem deixar claro que tipo de alerta e nem especificar meios de realizá-lo. Na grande maioria dos empreendimentos o PAE contempla uma estratégia de comunicação na qual as pessoas e entidades envolvidas são alertadas por telefone, baseada em uma lista construída previamente e presente no PAE, onde estão os contatos telefônicos de todos os envolvidos (BALBI, 2008; SANTOS, 2012). Assim, cada uma das entidades tem seu próprio fluxo de comunicação de

emergências e a informação pode ser disseminada. As defesas civis municipais, por exemplo, tem estratégias distintas, embora sigam as recomendações e melhores práticas definidas pelas defesas civis estaduais e a federal (ALMEIDA, 2003; BALBI, 2008).

No entanto, algumas empresas, cujo potencial de risco é muito alto, utilizam um meio de alerta para a população situada na área de alto salvamento baseado em alerta sonoro, geralmente utilizando sirenes de emergência (VISEU e ALMEIDA, 2011). Este é o exemplo de empresas como a Eletronuclear em Angra dos Reis no Rio de Janeiro ou algumas outras do ramo petroquímico (CUNHA e ANDRADE, 2016; GOES e ARAUJO, 2013; QUADRO, 2014; SESDEC-RJ, 2008).

No ano de 2017, reforçando ainda mais a criticidade das barragens brasileiras e em resposta aos questionamentos da sociedade após o acidente da barragem de Fundão, o DNPM publicou a portaria de número 70.389, de 17 de maio de 2017:

Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8, 9, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB (DNPM, 2017).

Na referida portaria é exposta de forma direta a obrigatoriedade do empreendedor responsável pela barragem de mineração de instalar na ZAS sistemas de alarme, contemplando sirenes ou outros dispositivos adequados ao eficiente, para alertar à população de situações de emergência de nível três, ou seja, ruptura eminente ou em curso. Além disso, quando a Defesa Civil, estadual ou federal, julgar necessário e formalizar a solicitação, o empreendedor deverá manter o sistema de alerta ou avisos à população também na Zona de Segurança Secundária (ZSS³), sendo esta a região além da ZAS. (DNPM, 2017).

Como exemplo deste segundo caso, o sistema de alerta de emergência construído pela Samarco Mineração SA, para atender às barragem de Germano, Santarém e estruturas remanescentes de Fundão, ultrapassou a ZAS, uma vez que as sirenes de emergência foram instaladas até o município de Barra Longa – MG, que está distante em raio a

³ Zona de Segurança Secundária - ZSS: Região constante do Mapa de Inundação, não definida como ZAS.

aproximadamente 45 Km das barragens. Portanto, o sistema de emergência contempla a Zona de Segurança Secundária.

2.3 Sistemas de alerta automatizado

As sirenes de alerta de emergência são uma forma simples e eficaz de comunicar a um grande número de pessoas que uma emergência está em curso, mas existem alguns requisitos no processo de projeto, instalação e operação, que podem garantir ou não sua eficácia. A localização das sirenes deve ser cuidadosamente definida, de forma a atender ao maior número possível de pessoas situadas em área de risco. As pessoas devem estar treinadas e precisam conhecer tanto o risco, quanto a forma de aviso que será emitida pela sirene em caso de emergência. Para isso, treinamentos e simulados devem ser realizados frequentemente com as comunidades envolvidas (ALMEIDA, 1997; BALBI, 2008; SESDEC-RJ, 2008; UEMURA, 2009b).

Outro ponto muito importante a ser considerado para as sirenes de emergência é sua disponibilidade, ou seja, o tempo de funcionamento dos equipamentos deve ser o maior possível, para que a probabilidade de falha durante um sinistro seja mínima. Para isso, os equipamentos utilizados devem ser de qualidade, para resistir a intemperes, vandalismo, e ter vida útil alta, etc. (ALMEIDA, 1997; SESDEC-RJ, 2008). Entre os pontos que devem ser priorizados em projeto para garantir o aumento da disponibilidade estão:

- i. proteção do local onde a sirene está instalada, contemplando abrigo seguro, cercamento, sensores e câmeras para alerta de intrusão, a fim de inibir atos de vandalismo (SESDEC-RJ, 2008);
- ii. redundância de energia elétrica contemplando banco de baterias para suprir ausência de energia elétrica e outras fontes como solar ou eólica (ALMEIDA, 1997; SESDEC-RJ, 2008);
- iii. rede de comunicação de alta disponibilidade para comando remoto, sendo importante que o sistema tenha pelo menos um meio de comunicação que não dependa da infraestrutura de telefonia fixa ou móvel (BALBI, 2008; BALBI; VIEIRA, 2010); e
- iv. monitoramento remoto e manutenção preventiva e corretiva de forma a possibilitar sempre a atuação rápida em caso de falhas (SESDEC-RJ, 2008).

Um sistema de alerta bem planejado e executado é essencial para o alcance do objetivo final do processo de salvamento das pessoas situadas nas áreas de risco. Por isso, é muito importante que todo recurso tecnológico viável de ser utilizado seja empregado de forma a reduzir as possibilidades de falha, uma vez que em uma situação de emergência real o fator humano já implica em um alto potencial de risco (BALBI, 2008; BALBI; VIEIRA, 2010; SESDEC-RJ, 2008).

2.3.1 Principais patentes relacionadas a sistema de alerta automatizado

As patentes são uma importante fonte de informação tecnológica, por isso, foram realizadas buscas nas principais bases internacionais e nacionais. O objetivo inicial foi verificar se a proposta de uso de redes LPWAN para monitoramento e alerta em áreas de risco infringia alguma patente e se sua utilização em território nacional estava livre de licenciamento.

Dessa forma, foram realizadas buscas na base de dados privada Derwent Innovation, na base de dados privada Patsnap, nos bancos de dados do INPI, na base de dados do Escritório de Patentes Europeu (EPO) Espacenet, na internet e por meio da ferramenta de busca desenvolvida por Kasznar Leonardos. Para realização dessas buscas foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Palavras-chave: Foram utilizadas diversas palavras-chave, como *alert*, *alarm*, *warning*, *notification*, *zone*, *station*, *facility*, *place*, *map*, *site*, *building*, *sensor*, *sense*, *safe*, *danger*, *catastrophe*, *accident*, *sinister*, *emergency*, IoT, *Internet of Things*, LPWAN, *Low Power Wide Area Network*, *wireless*, *intelligent*, *artificial intelligence*, *neural network*, entre outras, bem como variações entre elas e as palavras-chave correspondentes em português.
- Classificação Internacional de Patentes (CIP): G08B 1/08 - usando transmissão elétrica [2006.01], G08B 3/10 usando transmissão elétrica; usando transmissão eletromagnética [2006.01], G08B 21/02 Alarmes para garantir a segurança pessoal [2006.01], G08B 21/10 sensível a desastres naturais, p. ex. tornados ou terremotos [2006.01], G08B 21/12 sensível a liberação indesejável de substâncias, p. ex. alarmes de poluição [2006.01], G08B 21/14 Alarmes contra gases tóxicos (G08B 21/16 tem prioridade) [2006.01], G08B 21/22 sensível à presença ou ausência de pessoas [2006.01], G08B 25/10 usando sistemas de transmissão sem fio [2006.01], G08B

25/14 Dispositivos para a recepção ou indicação de um alarme central [2006.01], G08C 15/00 Disposições caracterizadas pelo uso de multiplex para a transmissão de vários sinais por uma trajetória comum [2006.01], G08C 17/02 usando uma ligação de rádio [2006.01].

Para se identificar as principais semelhanças das patentes com a proposta do trabalho, foram destacadas duas vertentes para análise:

- Sistemas de gerenciamento e alerta de emergência: neste tópico foram listadas patentes que possuem relação com a aplicação de gerenciamento e alerta de emergência. São sistemas digitais que possuem funcionalidades de rastreamento de pessoas, gestão dos dispositivos de alerta, recebimento e envio de alertas de emergência, monitoramento de entradas do dispositivo, monitoramento do estado do dispositivo e integração com sistemas de segurança para mapeamento de áreas de risco. Além disso, esses sistemas permitem ao usuário a geração de relatórios de gestão sobre os acessos, as situações de sinistro, utilização do dispositivo, enfim, uma completa gestão do sistema e integração com outras ferramentas gerenciais.
- Dispositivos portáteis de monitoramento e alerta: são as patentes sobre dispositivos microcontrolados com funcionalidades de geolocalização, botão de pânico, identificação de homem ao chão ou dispositivo fora de uso. Além disso, os dispositivos possuem a capacidade de receber e enviar dados via microchips de radiofrequência, permitindo envio e recebimento de alarmes, monitoramento de estado e localização em tempo real. Esses dispositivos foram projetados para ter baixo consumo de energia, serem pequenos, leves, discretos de forma que possam ser acoplados em objetos do dia a dia como capacetes, crachás, relógios, etc.

Assim, em uma busca mais aprofundada, foram encontradas cinco patentes que possuem alguma relação com o uso de internet das coisas para monitoramento e alerta de áreas de risco. Porém, observou-se que as patentes não detalhavam as tecnologias de radiofrequência utilizadas ou utilizavam tecnologias antigas. Isso pode ter ocorrido pelo fato das tecnologias LPWAN serem ainda muito novas no mercado e os pedidos de patente que as utilizam, ainda estarem no período de sigilo de 18 meses, podendo vir a surgir novas patentes futuramente. Para aprofundar no assunto das patentes, uma relação das cinco patentes mais

relacionadas com uma breve descrição é apresentada no APÊNDICES A – Relação de patentes relacionadas ao projeto.

2.4 Arquitetura de redes de internet das coisas

O termo internet das coisas, também conhecido como IoT (*Internet of Things*), é mais antigo do que normalmente se pressupõem, embora tenha se popularizado nos últimos anos com a crescente oferta de soluções e novas tecnologias. Ele foi criado pelo pesquisador britânico Kelvin Ashton do MIT (Massachusetts Institute of Technology) em 1999, durante uma apresentação sobre as potencialidades da tecnologia RFID (*Radio-Frequency Identification*), até então nova no mercado (MCT, 2015). Desde sua criação, o termo nunca esteve tão perto de alcançar o seu verdadeiro conceito, um mundo onde os dispositivos, objetos ou coisas, estarão conectados de alguma forma à rede mundial de computadores, a internet, e assim poderem receber e enviar informações entre si de qualquer lugar do mundo.

Um pouco mais complexo que isso, a IoT vem surgindo com tecnologias e soluções em que os dispositivos trocam dados com a nuvem⁴, na maioria das vezes sem nenhuma intervenção humana, possibilitando, assim, aplicações com gerenciamento praticamente instantâneo, reduzindo falhas e otimizando lucro de empresas, organizações, governos e pessoas. Diversas são as áreas nas quais a IoT tem se popularizado, sendo as mais comuns aplicadas a cidades inteligentes, finanças, logística, agronegócio, saúde, segurança, entre outras. Praticamente em qualquer aplicação na qual é possível e necessário realizar medição de algo para monitoramento e controle, as soluções de IoT estão aptas a serem aplicadas.

Muito tem se falado da aplicação de IoT na indústria. Os termos ainda são um pouco controversos, sendo os mais comuns: quarta revolução industrial, indústria 4.0 e IIoT (*Industrial Internet of Things*). Embora ainda não se tenha chegado a um consenso em relação aos termos, a ideia é basicamente a mesma, interligar tudo que pode ser medido no ambiente industrial em uma rede que forneça os dados a um sistema de gerenciamento central. Assim, decisões podem ser tomadas baseadas no andamento dos processos, sem intervenção humana e com a supervisão dos responsáveis. Apesar deste conceito ser antigo na indústria, atualmente a mudança se refere à quantidade de dados medidos, analisados e controlados, de

⁴ Nuvem é o termo utilizado para representar dados ou informações que estejam armazenadas em servidores conectados diretamente a rede mundial de computadores, a internet, de forma que possam ser acessados de qualquer lugar do mundo.

forma que as empresas possam otimizar seus processos de gestão, reduzindo custos, aumentando a segurança e, conseqüentemente, aumentando os lucros. Tudo isso porque as soluções de IoT chegam com o viés de serem tecnologias de menor custo que as convencionais, o que torna o sensoramento das plantas industriais mais viável.

Diversas são as tecnologias disponíveis no mercado e que têm como objetivo tornar realidade tudo o que foi citado até o momento. Existem dois grandes grupos, sendo o primeiro de tecnologias de comunicação sem fio de curto alcance e o segundo de tecnologias de longo alcance. No primeiro grupo estão desde tecnologias muito populares, como o Wi-Fi, o Bluetooth e o Zigbee. Porém, o grande foco deste trabalho são as tecnologias mais recentes e com características mais específicas, no caso o baixo consumo de energia, o longo alcance e a interligação em uma grande rede WAN (*Wide Area Network*). Estas tecnologias têm em comum uma arquitetura de rede muito familiar, a topologia em estrela, muito conhecida e utilizada nos sistemas de telefonia celular há vários anos. Não por coincidência, algumas destas tecnologias foram desenvolvidas a partir das tecnologias de telefonia celular, tanto de gerações anteriores (2G, 3G) como de gerações mais recentes (4G, 5G). Na Figura 2 é apresentada uma arquitetura padrão de redes de internet das coisas que permite entender melhor as tecnologias que serão apresentadas nos subtópicos do item 2.5.

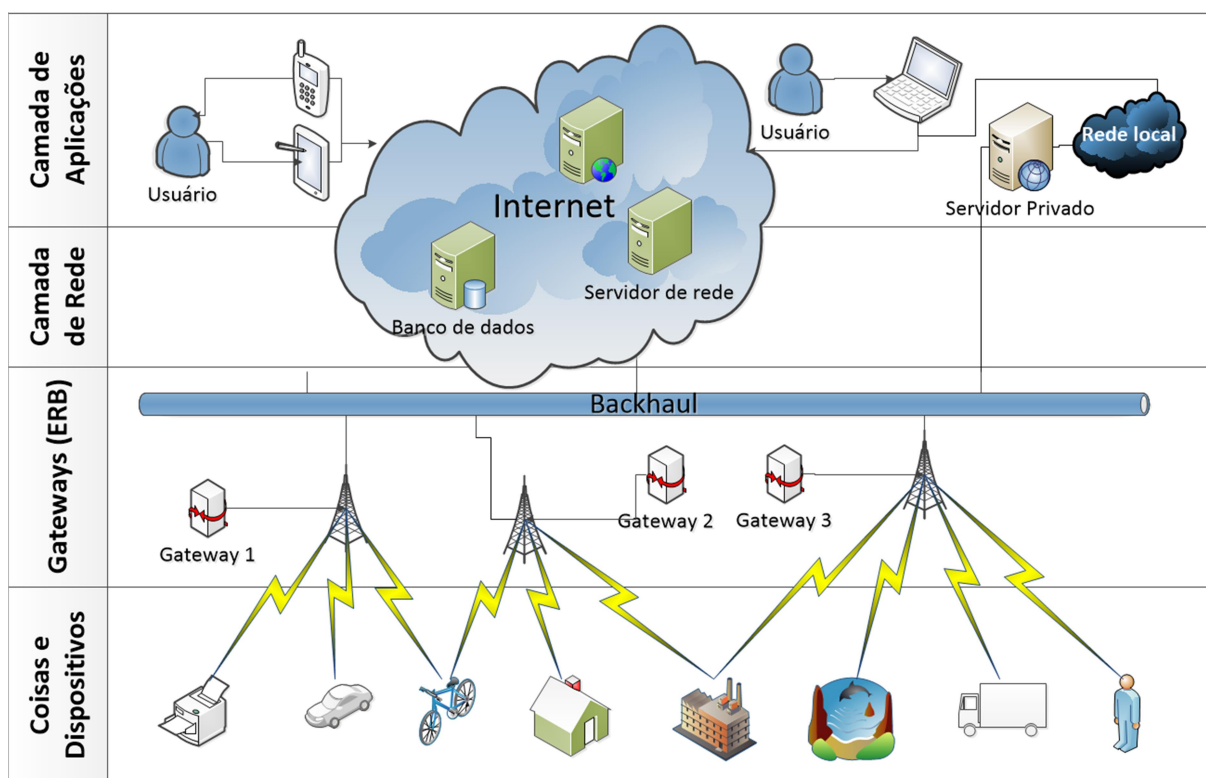


Figura 2 – Arquitetura padrão de Internet das Coisas

Uma arquitetura padrão de internet das coisas possui algumas camadas que permitem entender bem o funcionamento, dentre elas:

- Coisas: são os objetos, máquinas, equipamentos, animais, pessoas, enfim, tudo que possa ser monitorado e controlado através de sensores e atuadores. Assim, qualquer objeto do dia a dia pode ser considerado uma “coisa”, até mesmo as pessoas, uma vez que é possível que uma pessoa utilize um dispositivo portátil que faça medições de sinais vitais e geolocalização por exemplo.
- Dispositivos: são os sensores e atuadores acoplados a microchips de radiofrequência que tem a função de interagir com as “Coisas” aos quais estão acoplados e enviar os dados via rede de comunicação sem fio para gateways ou concentradores. A viabilidade de construir dispositivos cada vez menores e de menor custo, oriunda do avanço da eletrônica, é um grande viabilizador das novas tecnologias de internet das coisas.
- Gateways: são equipamentos eletrônicos com microchips de radiofrequência capazes de comunicar com inúmeros dispositivos, organizar os dados e enviar para os Servidores de Rede por meio de um *backhaul*⁵.
- Camada de rede: são computadores com alta capacidade de processamento, muitas vezes em forma máquinas virtuais localizados na nuvem. São responsáveis por fazer o gerenciamento dos gateways da rede, receber e enviar informações aos dispositivos por meio dos gateways, organizar e armazenar os dados, gerenciar usuários, checar chaves criptográficas e gerenciar as solicitações da Camada de Aplicações. A comunicação entre os servidores da camada de rede e os gateways se dá via rede Ethernet, normalmente por meio do protocolo TCP/IP.
- Camada de Aplicação: possui servidores localizados na nuvem que fazem a interface entre os usuários dos serviços, sejam eles pessoas ou outros softwares. Os servidores fazem a checagem de autorizações de acesso e nível de informações de cada usuário. São responsáveis pela interface entre os usuários e os dados da camada de rede, fazendo com que para o usuário, o caminho entre a informação oriunda do dispositivo de campo e ele seja transparente.

⁵ *Backhaul* é a porção de uma rede hierárquica de telecomunicações responsável por fazer a ligação entre o núcleo da rede, ou backbone, e as sub-redes periféricas.

Como foi dito anteriormente, existem atualmente diversas tecnologias de internet das coisas no mercado. Muitas dessas tecnologias ainda não estão disseminadas, ou estão concentradas em apenas algumas regiões do planeta. Entre as tecnologias mais comuns atualmente e que já estão em operação, principalmente na Europa e EUA, pode-se citar: Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT, LTE CAT-M1 e RPMA (HUNN, 2015). Diversas são as empresas e organizações que estão trabalhando em sistemas com essas novas tecnologias, como a LoRa-Alliance, a Sigfox, a Link Labs, a Lorient, a Waviot, a Ingenu, além de várias operadoras de telefonia celular (HUNN, 2015). Inclusive os modelos de negócios são muito distintos como é o exemplo da Sigfox e LoRa-Alliance. A primeira objetiva torna-se a operadora global de internet das coisas, enquanto a segunda é uma aliança entre diversas empresas que visa padronizar e regular a oferta de produtos e serviços baseados em LoRaWAN, tornando a tecnologia um padrão mundial.

2.5 Redes LPWAN

Entre as diversas tecnologias de comunicação sem fio disponíveis no mercado, estão as de longo alcance e baixo consumo de energia, conhecidas como LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), que atualmente compreende uma série de redes, das quais, algumas serão abordadas nos próximos subtópicos desta seção (HUNN, 2015; VANGELISTA, T. L., ZANELLA e ZORZI, 2015).

As tecnologias LPWAN se enquadram precisamente ao estudo de caso da cidade de Ouro Preto – MG, primeiramente pela importância da solução ser de baixo custo de implantação, isso porque existem limitações de orçamento no programa de mestrado para execução do projeto, segundo, porque soluções de IoT devem ser de baixo custo para possibilitar sua disseminação, caso contrário, seriam como tantas outras existentes, por exemplo, o WirelessHart na indústria. Além disso, o baixo consumo de energia, sempre importante quando se trata de sensoriamento remoto e sustentabilidade. Ambos os aspectos contribuem para viabilizar a execução do estudo de caso, mesmo com recursos financeiros limitados, além de permitir o uso da rede para outras finalidades de sensoriamento remoto na cidade, contribuindo assim para desenvolvimento da comunidade acadêmica e da sociedade.

As LPWAN são tecnologias que vem sendo desenvolvidas em maior escala ao longo dos últimos anos, principalmente para serem a base da comunicação para sensores e

atuadores. As LPWAN são redes de comunicação sem fio que tem como foco principal dar suporte à internet das coisas e à comunicação máquina-máquina (*Machine to Machine - M2M*), de forma a possibilitar a conectividade de milhares de dispositivos à nuvem e se tornarem informação para os clientes por meio de diversas aplicações (GUBBI et al., 2013; LAWTON, 2004; LIN et al., 2017). Para isso, estas tecnologias possuem características específicas e que as distinguem de outros padrões de mercado, como Bluetooth, Zigbee, Wi-Fi, GPRS, entre outros. Segundo Hunn, (2015); Vangelista, Zanella e Zorzi, (2015), as principais características são:

- Longo alcance: tem como objetivo principal criar uma grande rede que possa alcançar longas distâncias, podendo alcançar até dezenas de quilômetros, a fim de conectar diversos dispositivos.
- Baixo consumo de energia: idealizadas para conectar dispositivos em locais onde a energia elétrica é escassa ou inexistente, os microchips de radiofrequência, microcontroladores e periféricos são projetados para autonomias de 10 anos ou mais, conforme configurações de uso.
- Baixo custo de implantação: o objetivo é que tanto os dispositivos como os gateways da rede tenham baixo custo e que o longo alcance reduza a necessidade de estações rádio base.
- Baixa largura de banda: as redes LPWAN têm por características uma largura de banda estreita. Basicamente o motivo é priorizar o longo alcance, geralmente utilizando frequências mais baixas, conhecidas como sub GHz. Além disso, não utilizam técnicas de modulação complexas como na tecnologia LTE (*Long Term Evolution*).
- Baixa taxa de dados: com taxas na ordem de kbps, estas tecnologias utilizam canais mais estreitos de comunicação, baixa potência de transmissão e tem o foco na imunidade a interferências e na alta sensibilidade de recepção. Não são recomendadas para aplicações sensíveis à latência e não devem ser usadas para tráfego de áudio ou vídeo.

Na Figura 3, pode-se observar algumas informações importantes a cerca das redes LPWAN, bem como uma comparação com outras redes, como o Zigbee e as tecnologias 3G,

4G e 5G, relacionando outros parâmetros importantes, como custo de microchip de rádio, dos serviços de aplicação e latência de transmissão. No gráfico de múltiplos eixos da Figura 2, é possível observar quais são as características mais fortes das redes LPWAN e entender melhor porque elas são fortes concorrentes para dominar os cenários de IoT e M2M.

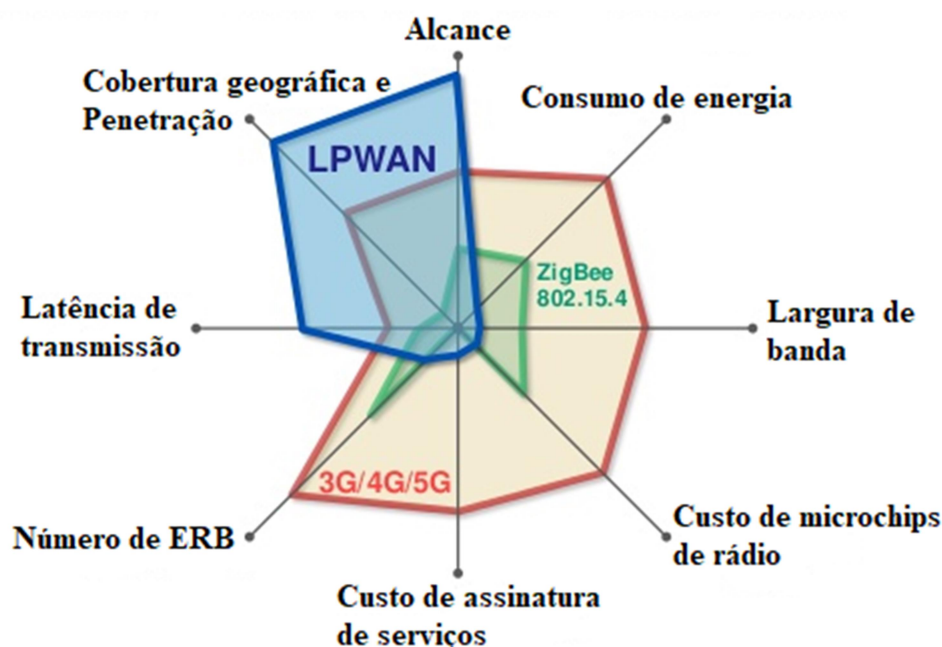


Figura 3 – Comparação entre LPWAN, Zigbee e 3G/4G/5G.

Fonte: Adaptado de EGLI, 2015.

As LPWAN possuem características que se adequam à proposta deste trabalho. Dessa forma, compõem um amplo espaço de tecnologias a serem estudadas como possíveis soluções para o problema apresentado. Dentro das tecnologias LPWAN destacam-se quatro tecnologias recentes: LoRaWAN, Sigfox, Ingenu, e NB-IoT. Além dessas, outra tecnologia mais antiga, os rádios XBee PRO da empresa Digi na frequência de 915 MHz também serão avaliados. Nos próximos subtópicos serão abordadas as tecnologias citadas anteriormente de forma a expor suas principais características e auxiliar na compreensão do trabalho de pesquisa realizado.

2.5.1 LoRaWAN

O LoRaWAN é um protocolo de comunicação desenvolvido pela LoRa-Alliance, que é uma associação formada por grandes empresas de tecnologia para desenvolver um sistema de comunicação que possa suportar as necessidades de IoT. O protocolo LoRaWAN foi criado em cima da camada física conhecida como LoRa, tecnologia baseada na técnica de

modulação por espalhamento espectral CSS (*Chirp Spread Spectrum*), conhecida há muito tempo no meio militar e que, com o avanço da microeletrônica, ganhou condições de competir em custo no mercado civil. A tecnologia está no mercado por meio de uma patente da empresa Semtech, uma das fundadoras da LoRa-Alliance (ADELANTADO et al., 2016a; LORA ALLIANCE, 2015). A Semtech licencia o direito de produção dos microchips de rádio da tecnologia para outras indústrias de semicondutores, por exemplo a Microchip. A tecnologia possui todas as características principais de uma LPWAN com algumas especiais, sendo:

- A rede é composta por *end points* (dispositivos finais), gateways, servidores de rede e de aplicação;
- A topologia da rede é estrela, como as redes de telefonia celular, em que os dispositivos se conectam a um gateway que é interligado a um *backhaul*;
- As frequências de operação são 433MHz e 863MHz na Europa e 915MHz nos Estados Unidos.

A proposta da LoRa-Alliance com a LoRaWAN é fornecer uma rede de baixo custo, longo alcance e grande cobertura de forma que todo e qualquer tipo de dispositivo inteligente possa se conectar à internet, levando todo tipo de informação para a nuvem, fazendo, assim, com que as informações possam ser tratadas nos mais diversos tipos de aplicações e disponibilizadas de forma transparente ao usuário final. Na Figura 4, pode-se observar um esquema ilustrativo da arquitetura da rede LoRaWAN, apresentado pela LoRa-Alliance.

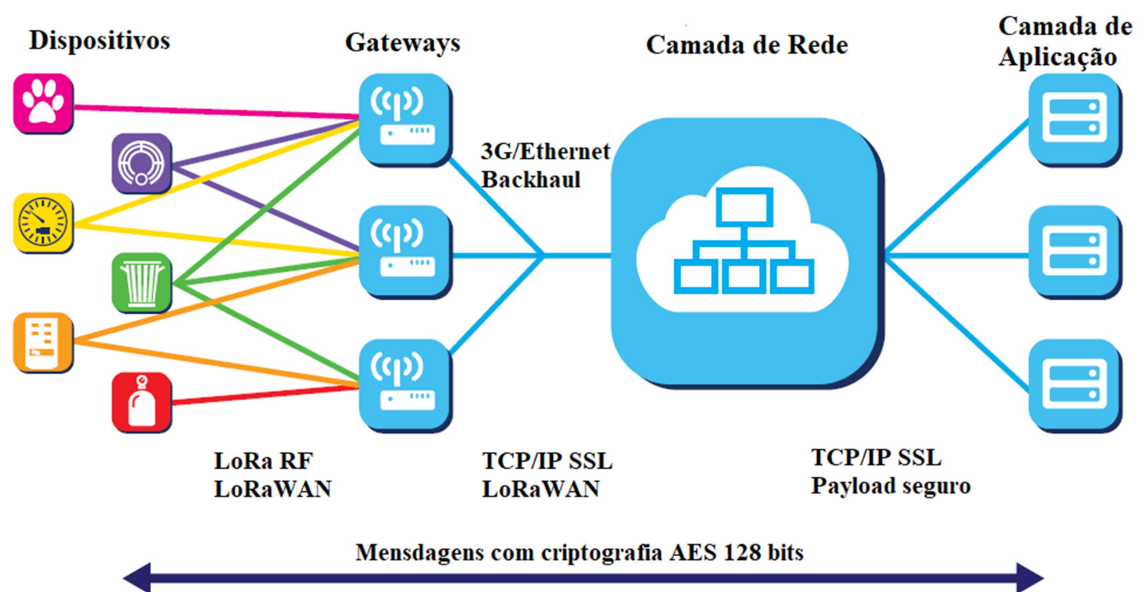


Figura 4 – Topologia da rede LoRaWAN.

Fonte: Adaptado de LORA-ALLIANCE, 2015.

As camadas existentes na topologia da rede LoRaWAN são:

- **Dispositivos:** são dispositivos finais da rede e podem ser de diversas naturezas como sensores de consumo de energia, gás, água, etc., ou rastreadores de objetos, veículos, animais e até pessoas. Atuadores de campo utilizados para acionar um alarme, ligar remotamente um equipamento, etc., enfim, são diversas as possibilidades. Os dispositivos finais têm como principais requisitos serem de baixo custo e baixo consumo de energia, de forma a estimular o seu uso (LORA-ALLIANCE, 2015, 2017a, 2017b).
- **Gateways:** os gateways ou concentradores da rede LoRaWAN são equipamentos de rádio com função semelhante a pontos de acesso. Sua função na rede é ser o ponto de conexão de milhares de dispositivos que comunicam via radiofrequência, utilizando a camada física LoRa e o protocolo LoRaWAN. Eles têm a função de organizar os dados recebidos dos dispositivos e enviá-los aos servidores de rede através de um *backhaul* por meio de rede ethernet ou 3G/4G (LORA-ALLIANCE, 2015, 2017a, 2017b).
- **Camada de rede:** são os servidores de rede que executam a função de gerenciamento da rede, organizando os dados recebidos dos gateways, eliminando duplicidades de pacotes, providenciando respostas às solicitações, redefinindo tempos de

comunicação, taxa de dados e otimizando o consumo de bateria dos end-points. Os servidores de rede também fazem a função de disponibilizar aos servidores de aplicações as informações oriundas dos dispositivos assim como status dos componentes da rede (LORA-ALLIANCE, 2015, 2017a, 2017b).

- Camada de aplicação: os servidores de aplicação transformam todos os dados recebidos dos milhares de dispositivos conectados à rede em informação útil aos clientes, seja por meio de softwares específicos, aplicativos ou qualquer outra forma de interação com o usuário final. Essas aplicações executam ações baseadas nas informações recebidas e podem enviar mensagens ou mesmo comandos, a serem executados pelos atuadores conectados à rede (LORA-ALLIANCE, 2015, 2017a, 2017b).

Como visto anteriormente, a rede LoRaWAN se propõe a ser uma solução econômica e eficiente para a conectividade de dispositivos à internet, em pesquisa de mercado foram encontrados microchips de rádio LoRaWAN, modelo SX1273, custando em torno de 3 dólares no site de venda de componentes eletrônicos Digikey.com. É importante frisar que esta rede não é voltada para a conexão de smartphones, tablets ou computadores, visto que a taxa de dados é baixa para atender à necessidade de dados desses equipamentos. Sua função é fornecer dados provenientes de sensores e atuadores às aplicações finais que rodam nestes dispositivos.

A rede LoRaWAN foi desenvolvida para conexão de dispositivos, conforme apresentado até agora, separados em três classes: A, B e C. Cada classe apresenta as seguintes características:

- Classe A: é um dispositivo de comunicação bidirecional, em que o intervalo de comunicação é configurado de acordo com a necessidade do dispositivo, de forma a permitir maior economia de bateria sem comprometer a aplicação. Após cada *slot* de *uplink*⁶ de dados, abrem-se janelas de download, porém, caso entre um *slot* e outro ocorra uma mensagem do servidor para o dispositivo, ela aguardará a próxima janela para ser enviada. Os intervalos são definidos com base em um tempo fixo mais um

⁶ *Uplink* é o enlace no qual os dados vão do dispositivo para a ERB, ou seja, é a “subida” de dados do dispositivo de campo para o gateway.

tempo aleatório, definido por um protocolo de acesso ao meio Aloha⁷ (LORA-ALLIANCE, 2015, 2017a, 2017b).

- Classe B: são dispositivos também bidirecionais, e possuem, além das características da classe A, a capacidade de abrir janelas de comunicação em intervalos de tempo pré-determinados. Para isso, é necessária a sincronização entre o gateway e o dispositivo, que ocorre por meio de um *beacon*⁸. Dessa forma o servidor da rede saberá quando o dispositivo está pronto para receber a transmissão. Como é de se esperar, os dispositivos desta classe possuem um maior consumo de energia (LORA-ALLIANCE, 2015, 2017a, 2017b).
- Classe C: são também dispositivos bidirecionais. A grande diferença entre estes dispositivos e os classes A e B é que eles estão aptos a receber mensagens todo o tempo, com exceção de quando estiverem transmitindo. São estes dispositivos os que mais consomem energia, devido à característica de recebimento de transmissões contínuas (LORA-ALLIANCE, 2015, 2017a, 2017b).

Outra importante característica das redes LoRaWAN é a segurança, que acontece em dois níveis: (i) na camada de rede, que garante a autenticidade do nó; e (ii) na camada de aplicação, que garante que o operador da rede não tem acesso aos dados do usuário final. Para isso, é utilizada a criptografia AES por meio de troca de chaves do identificador IEEE EUI64 (LORA-ALLIANCE, 2015, 2017a, 2017b). Importante frisar que os dispositivos LoRaWAN não utilizam endereço IP, sendo que a comunicação entre eles e os gateways ocorre pelo protocolo LoRaWAN e a segurança se dá por chaves criptografadas.

Alguns pontos de melhoria, desvantagens e limitações do LoRaWAN foram levantados, sendo importante apontá-los como uma forma de analisar mais profundamente a tecnologia. Para isso, uma síntese é apresentada nos próximos tópicos (INGENU, 2015; ADELANTADO et al., 2016):

- o aumento do número de dispositivos conectados à rede faz crescer o número de colisões e perda de pacotes, portanto, requer grande planejamento em redes cujos dispositivos necessitem transmitir muitas informações em curtos períodos de tempo;

⁷ Aloha é um protocolo de controle de acesso ao meio, na qual cada dispositivo da rede envia uma mensagem quando a mesma está disponível, independente da disponibilidade do canal. Após a mensagem é disparado um temporizador aleatório, se após o estouro do temporizador uma mensagem de confirmação de recebimento não chegar, a mensagem é reenviada.

⁸ Beacon é um pacote de sincronismo enviado periodicamente pelo gerenciador da rede.

- a rede não deve ser utilizada em aplicações que sejam sensíveis à latência, uma vez que o espalhamento espectral faz com que as mensagens fiquem no ar por no mínimo 40 ms, isso para o *spreading factor* $SF = 7$ e pacotes de 10 bytes;
- o ciclo de trabalho ou *duty cycle*⁹ de 1% reduz a capacidade da rede, fazendo com que tenha menos dispositivos conectados ou eles enviem mensagens em períodos de tempo maiores;
- utilização de espectro de frequência fragmentado e com diferentes regulações nas diversas regiões do mundo, causando diferentes formas de atuação em cada continente.

Com essas características a tecnologia LoRaWAN se coloca como uma das principais candidatas à solução do problema abordado neste trabalho. Sendo, segundo Hunn, (2015), uma das principais do mercado de IoT, tendo ainda a seu favor a democratização da rede, de modo que qualquer empresa ou pessoa, pode construir sua própria rede de IoT utilizando a tecnologia LoRaWAN, pois basta atender aos padrões exigidos pela LoRa-Alliance. Atualmente, no mercado existem várias empresas fornecendo serviços na camada de servidor e de aplicação, inclusive gratuitos, como é o caso da rede global The Things Network¹⁰ (TTN), cujo objetivo é construir uma rede global de internet das coisas baseada na tecnologia LoRaWAN. Além delas, muitas outras empresas estão prestando estes serviços, como exemplo: Loriot, Link Labs, Multitech, Resiot, The Things Industries, etc. (HUNN, 2015).

2.5.2 Sigfox

A Sigfox é uma tecnologia de internet das coisas desenvolvida pela empresa de mesmo nome, que tem como objetivo uma meta audaciosa: tornar-se a operadora global de IoT. Para isso, a Sigfox recebeu grande investimento para implantação da tecnologia e tem feito parcerias com empresas do mundo todo para instalação da infraestrutura da rede de comunicação sem fio. A grande diferença da Sigfox é o modelo de negócio, pois ao contrário da tecnologia LoRaWAN, em que várias empresas têm criado negócios distintos e

⁹ *Duty cycle* em telecomunicações e eletrônica é a razão cíclica ou ciclo de trabalho, é utilizado para descrever a fração de tempo em que um sistema está em um estado "ativo".

¹⁰ A The Things Network é uma organização formada por uma comunidade de desenvolvedores e programadores que criaram uma plataforma de internet das coisas livre para participação de qualquer pessoa do mundo. Atualmente essa plataforma possui mais de 33400 desenvolvedores, 18000 aplicações de IoT e 3000 gateways LoRaWAN online em todo o mundo.

descentralizados, a Sigfox concentra todos os dispositivos em seus servidores de rede, e assim cobra de seus clientes uma assinatura anual por dispositivo conectado, deixando-os isentos de qualquer responsabilidade com a infraestrutura (HUNN, 2015).

A tecnologia LPWAN por trás da Sigfox possui todas as características citadas anteriormente: foco no longo alcance, baixo consumo de energia, baixa taxa de dados, baixo custo de instalação e operação, além da segurança das informações (HUNN, 2015). Além dessas características principais, a tecnologia Sigfox possui algumas mais específicas:

- Utilização de canais UNB (*Ultra Narrow Band*), com largura de banda de 100 Hz nas frequências de 433 MHz e 868 MHz, no padrão europeu, e de 600 Hz nas frequências de 915 MHz, no padrão americano (WND, 2017);
- Tráfego de pequenas mensagens – cada dispositivo pode enviar até 140 mensagens por dia, sendo que cada uma delas tem o tamanho de até 12 bytes, o que melhora muito a imunidade a interferências (WND, 2017);
- Utiliza a modulação D-BPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*), que possui fácil implementação, baixo custo de componentes de rádio e alta sensibilidade das estações rádio base (WND, 2017);
- Possui sensibilidade das estações de rádio base de -142 dBm e -134 dBm para as taxas de dados de 100 bps e 600 bps respectivamente, o que possibilita longo alcance aos dispositivos da rede (WND, 2017);
- Acesso aleatório ao canal – cada dispositivo envia uma mensagem em uma frequência aleatória seguida de duas réplicas também em frequências aleatórias. Isso aumenta a qualidade dos serviços e a imunidade a interferências, uma vez que a mesma mensagem utiliza vários caminhos (WND, 2017);
- Recepção cooperativa na qual as mensagens enviadas são recebidas pelas ERB próximas, no geral, por pelo menos três. O dispositivo não está vinculado a apenas uma estação, assim como na tecnologia LoRaWAN, o que aumenta consideravelmente a qualidade do serviço (WND, 2017).

A rede Sigfox, assim como a maioria das redes de IoT, possui arquitetura muito comum, onde a simplicidade é a grande aliada, uma vez que não é necessário consumo de energia em tarefas complexas na camada de rede, pois elas são executadas na nuvem, na camada de servidores de rede. Esse é um trunfo importante desta tecnologia, porque

possibilita que os dispositivos finais sejam extremamente simples, o que reduz muito o custo, além de possibilitar também o baixo consumo de energia (WND, 2017). Na Figura 5 são apresentadas as camadas existentes na topologia da rede.

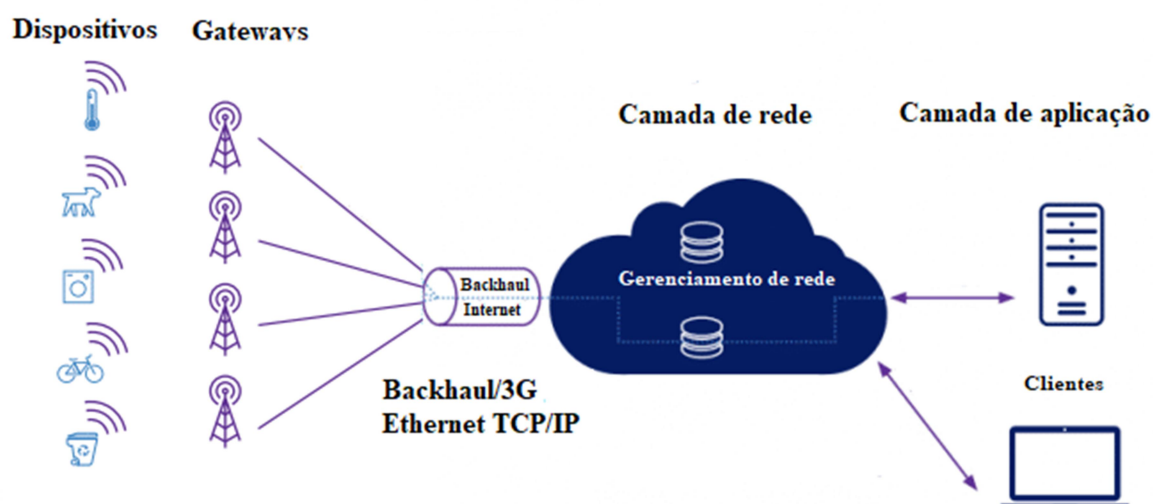


Figura 5 – Topologia da rede Sigfox.

Fonte: Adaptado de WND, 2017

As camadas existentes na topologia da rede SigFox são:

- **Dispositivos:** compõem a camada de base da rede, sendo em sua grande maioria sensores, geolocalizadores, etc. Eles realizam as medições e as enviam para os gateways mais próximos, seguindo as características definidas anteriormente. Os dispositivos são construídos para serem simples e consumir pouca energia, de forma a permitir uma longa duração da bateria de alimentação. Na Tabela 3 estão apresentados alguns exemplos das informações que são enviadas pelos dispositivos da rede, assim como seu respectivo tamanho, de forma a ilustrar que uma mensagem de 12 bytes pode conter informação útil suficientemente (WND, 2017).

Tabela 3 – Exemplo de informações enviadas pelos dispositivos na rede Sigfox.

Mensagem	Tamanho da Mensagem
Coordenadas GPS	6 bytes completos
Temperatura	10 bits (de -40 °C a +105 °C com 0,1 °C de precisão)

Velocidade	1 byte - 0 a 255 km/h
Status do objeto	1 bit

Fonte: Adaptado de WND, 2017

- Gateways: os gateways da rede Sigfox são responsáveis por receber as informações dos dispositivos da rede, via canal de rádio, e encaminhá-las para o *backhaul* da rede Sigfox, por meio da internet, de forma que os dados cheguem aos servidores de gerenciamento da rede, que operam na nuvem. Estas estações rádio base são de responsabilidade da Sigfox ou da operadora de rede parceira em cada país onde a rede está disponível (WND, 2017).
- Camada de rede: na camada de servidores de rede da Sigfox está concentrada toda a inteligência do serviço. Nesta camada é realizado o gerenciamento das estações rádio base de forma que em campo elas possam ser o mais simples possível, a fim diminuir os custos de implantação e manutenção da rede, utilizando o mesmo hardware em todo o mundo. Isso é possível porque o rádio opera via software nos servidores por meio do SDR (*Software Defined Radio*). A camada de rede é também responsável por entregar à camada de aplicação as informações prontas para utilização por meio dos servidores de aplicação, ficando o cliente a cargo apenas do desenvolvimento da aplicação. Na camada de rede funciona o monitoramento da rede e processamento das mensagens recebidas, além do sistema de armazenamento de dados da rede (WND, 2017).
- Camada de aplicação: nessa camada os serviços das aplicações dos usuários finais são executadas, desde aplicativos para smartphones ou tablets, como softwares para notebook e computadores com os diversos sistemas operacionais. Aqui estão os servidores de aplicação, o gerenciamento de usuários e grupos, o tratamento de dados para os serviços das aplicações, além do envio e recebimento de informações dos clientes via HTTPS (WND, 2017).

Com base nas características apresentadas, a rede Sigfox apresenta uma grande capacidade de gerenciamento de dispositivos, sendo que, segundo a empresa, chega a ordem de bilhões. Ainda, permite aos desenvolvedores de dispositivos uma grande eficiência energética, uma vez que possui microchips de rádio com consumo variando de 10 mA a 50 mA durante a transmissão. Além disso, como o dispositivo passa pequena parte do tempo

transmitindo, o consumo de energia é muito baixo, elevando muito a vida útil da bateria (WND, 2017).

A segurança também é uma característica importante do Sigfox, sendo implementada em todas as camadas da rede, desde os dispositivos com mensagens criptografadas até as aplicações. Nos dispositivos existe autenticação baseada em chaves associadas a um endereço único na memória não volátil. Na mensagem enviada ao gateway, e encaminhada aos servidores de rede, uma assinatura única é criada, combinando as chaves e o endereço do dispositivo, sendo associada a uma numeração sequencial nos servidores de redes para identificação das mensagens repetidas. A comunicação entre as estações e os servidores via *backhaul* também é criptografada, por meio de uma rede privada (*Virtual Private Network – VPN*). Os servidores em nuvem são distribuídos em diferentes sites de forma a possibilitar uma redundância física das informações, sendo que sua conexão com as aplicações utilizam HTTPS criptografado (WND, 2017).

Alguns pontos de melhoria, desvantagens e limitações do Sigfox foram levantados, sendo importante apontá-los como uma forma de analisar mais profundamente a tecnologia. Para isso, uma síntese é apresentada nos próximos tópicos (INGENU, 2015):

- O ciclo de trabalho ou *duty cycle* de 1% reduz a capacidade da rede, fazendo com que tenha menos dispositivos conectados ou eles enviem mensagens em períodos de tempo maiores;
- Número limitado de mensagens enviadas e recebidas por dia, sendo que cada dispositivo final pode enviar até 140 mensagens por dia, com um tamanho de carga de 12 bytes, a uma taxa de dados de até 100 bps. Sendo que para recebimento as restrições são maiores, são 4 mensagens de 8 bytes por dia;
- Utilização de espectro de frequência fragmentado e com diferentes regulações nas diversas regiões do mundo, causando diferentes formas de atuação em cada continente;
- Modelo de negócio centralizado, onde todas as informações dos clientes passam pelos servidores de rede da Sigfox, mesmo com redundância física de servidores existe o risco de um ponto de falha único.

Os pontos levantados fazem dessa tecnologia uma boa opção para aplicações de internet das coisas, sendo que outro importante fator a ser observado é a cobertura da rede na

região de interesse. No Brasil, segundo a WND Brasil, essa cobertura atinge atualmente 80 milhões de pessoas em 100 cidades, nas 12 principais regiões metropolitanas do país, sendo que o objetivo é alcançar 80% do PIB brasileiro até o final de 2018. Para acompanhamento do desenvolvimento da cobertura, a Sigfox disponibiliza em seu site uma página no endereço <https://www.sigfox.com/en/coverage>.

Outro importante fator que coloca a Sigfox entre as principais tecnologias de IoT do mercado é a relação custo benefício. Atualmente, no mercado é possível encontrar microchips da tecnologia a um custo aproximado de U\$2,00 a unidade, no site de venda de eletrônicos www.digikey.com, sendo esse valor para compra de apenas uma unidade, o que indica que para maiores volumes esse preço pode ser ainda menor. Entre as tecnologias avaliadas, o Sigfox é a que possui menor custo de microchip no mercado. Porém, como a Sigfox é uma operadora de serviço de rede, existe um custo mensal do serviço, em torno de U\$1,00 por dispositivo por ano. Por outro lado, o cliente está isento de custos adicionais com a manutenção de equipamentos da rede. Por fim, para regiões com a cobertura Sigfox, essa rede possui de um bom custo benefício para aplicações de IoT, restando saber como será a qualidade da prestação de serviço e a garantia de disponibilidade da rede (WND, 2017).

2.5.3 Ingenu

A Ingenu é uma empresa americana que inseriu no mercado uma solução para internet das coisas baseada na tecnologia de acesso múltiplo aleatório por fase (*Random Phase Multiple Access* – RPMA). Entre as principais virtudes que a Ingenu prega em relação ao RPMA, está a sua capacidade de adaptação em qualquer lugar do mundo, isso por utilizar um espectro de frequência livre nos cinco continentes, a banda de 2,4 GHz, que possui maior liberdade na maior parte das regiões. Como exemplo, as regulamentações europeias e americanas não impõem limites de *duty cycle* para a frequência de 2,4 GHz (RAZA, KULKARNI, e SOORIYABANDARA, 2017).

O RPMA usa um esquema de acesso físico patenteado, chamado de DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), ou espectro de espalhamento de sequência direta em tradução livre, somente para o *uplink*. Além disso, trata-se de uma variação do conhecido acesso múltiplo por divisão de código, (*Code Division Multiple Access* – CDMA), sendo que a grande diferença é que o RPMA permite que múltiplos transmissores compartilhem um mesmo intervalo de tempo. Para isso, o RPMA aumenta a duração do intervalo de tempo do

CDMA tradicional e, em seguida, libera o acesso ao canal dentro desse intervalo de tempo, adicionando um atraso aleatório para cada transmissor. Essa técnica possibilita a redução da sobreposição de sinal entre os transmissores, uma vez que eles não acessam o canal ao mesmo tempo, além de aumentar a relação de interferência do sinal (*Signal Interference Ratio* – SIR) para cada enlace (INGENU, 2016c).

No RPMA, as ERB utilizam múltiplos demultiplexadores para decodificar os sinais que chegam de diferentes fontes e em diferentes momentos dentro de um mesmo intervalo de tempo. A Ingenu fornece comunicação bidirecional, embora com ligeira assimetria. Para *downlink*¹¹, as ERB espalham os sinais usando o CDMA. O RPMA é capaz de alcançar até -142 dBm de sensibilidade do receptor e *link budget*¹² de 168 dB (INGENU, 2016c). Além disso, os dispositivos finais podem ajustar sua potência de transmissão para alcançar a estação base mais próxima e limitar a interferência em dispositivos próximos. A Ingenu lidera os esforços para padronizar as especificações da camada física sob o padrão IEEE 802.15.4k, uma vez que a tecnologia é compatível com as especificações (RAZA et al., 2017).

As principais características da tecnologia RPMA são detalhadas a seguir:

- Cobertura: o RPMA consegue cobrir uma grande área, devido a suas características que a diferem de outras tecnologias. Primeiramente, por operar na frequência livre de 2,4 GHz, os transmissores podem trabalhar com maior potência, o que, associado aos ganhos de antena, faz com o que o sinal alcance áreas muito mais distantes do que o LTE, por exemplo. Lembrando que como a relação entre potência e sinal é exponencial, um pequeno aumento na potência pode significar um alcance dezenas de vezes maior. O outro grande ponto é a sensibilidade dos receptores – o RPMA pode alcançar sensibilidade de até -142 dBm, o que contribui significativamente para o alcance (INGENU, 2016c).
- Capacidade de tráfego: a capacidade de tráfego é a quantidade de informação que pode ser trafegada por um mesmo ponto de acesso em um determinado intervalo de tempo. O RPMA consegue receber até 19.000 bps/MHz, sendo que esse valor é 54 vezes

¹¹ *Downlink* é o enlace no qual os dados vão da ERB para o dispositivo, ou seja, os dados “descem” do gateway para o dispositivo.

¹² *Link Budget* é um termo em inglês que significa orçamento do enlace, em outras palavras quer dizer o quanto um enlace pode suportar de perdas do caminho, como perdas em cabos e conectores, perda de espaço livre, etc.

maior que o *throughput*¹³ da tecnologia LPWAN que mais se aproxima do RPMA (INGENU, 2016c).

- Escalabilidade: a tecnologia RPMA foi desenvolvida de modo que a adição de novos pontos de acesso e novos dispositivos seja teoricamente ilimitada. Em resumo, os módulos inteligentes do RPMA usam o controle de potência de transmissão, de modo que, à medida que mais pontos de acesso e pontos finais são adicionados, eles podem ajustar-se. Isso torna o RPMA capaz de escalar dezenas de bilhões de dispositivos (INGENU, 2016c).
- Imunidade a interferências: para lidar com interferência constante em um mesmo canal ou em canais adjacentes, o RPMA usa a técnica DSSS. Essa técnica cria o sinal usando menos energia, porém, durante um período maior de tempo, se comparado a outras tecnologias. Assim, a camada física do RPMA, usando o DSSS, é capaz de descartar o sinal de interferência, que é geralmente mais alto ou tem mais potência que o sinal RPMA desejado, mesmo quando em mesma frequência – à presente técnica, dá-se o nome de rejeição de co-canal. Esse é um grande diferencial do RPMA em relação a outras tecnologias, pois consegue identificar e descartar o ruído de fundo, mesmo ele sendo muito mais alto que o sinal RPMA.
- Segurança criptográfica: o RPMA utiliza criptografia de 128 bits com autenticação bidirecional, na qual não só a mensagem é bloqueada, como também é garantida por 16 bytes. Isso significa que existe apenas uma chance em 2^{128} que alguém adivinhe aleatoriamente a chave. Em comparação, outras soluções de conectividade M2M / IoT frequentemente usam 2 bytes para codificar as chaves. Isso fornece uma chance em 2^{16} de se adivinhar a chave aleatoriamente, o que, com o poder de computação moderno, seria uma questão simples de força bruta para obtê-la (INGENU, 2016c).
- Espectro: o RPMA utiliza a banda universal de 2,4 GHz do espectro não licenciado (*Industrial Scientific and Medical* – ISM), que oferece 80 MHz de largura de banda. Porém, a tecnologia RPMA usa apenas 1 MHz de largura por canal, sendo assim, capaz de suportar uma rede inteira. Complementando, com um buffer de 1 MHz em cada lado de um canal e 80 MHz de largura de banda disponível, existem um total de

¹³ *Throughput* de rede ou simplesmente taxa de transferência é a quantidade de dados transferidos de um lugar a outro pelo canal de comunicação em um determinado espaço de tempo.

40 canais a escolher. Esse tipo de largura de banda dá ao RPMA uma enorme flexibilidade para localizar a frequência com menos tráfego, mesmo em áreas onde o Wi-Fi está presente, uma vez que 11 canais RPMA são intercalados entre os canais do Wi-Fi em um cenário ideal, conforme a Figura 6.

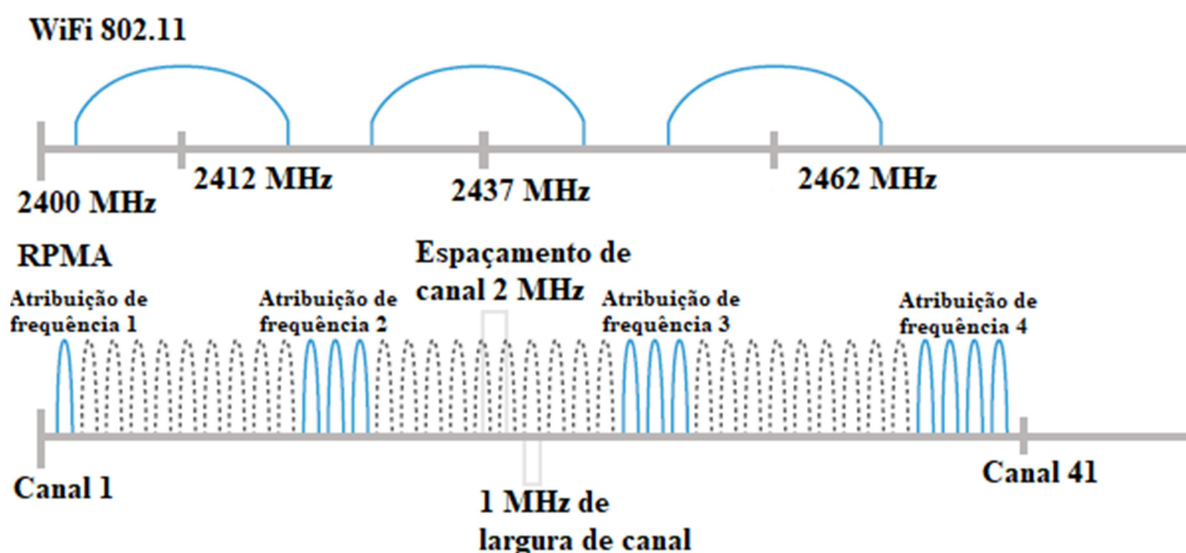


Figura 6 – Comparação entre espectro do RPMA com o do Wi-Fi.

Fonte: Adaptado de INGENU, 2016b.

Essa capacidade do RPMA de conviver muito bem com as outras tecnologias que utilizam a banda 2,4 GHz, como o Wi-Fi e o Bluetooth, é muito valiosa, e trata-se de um grande diferencial da tecnologia (INGENU, 2016c). Na Figura 7 é apresentado um gráfico comparativo entre essas tecnologias, que explicita como o RPMA se destaca em relação às demais tecnologias com quem compartilha o espectro de 2,4 GHz.

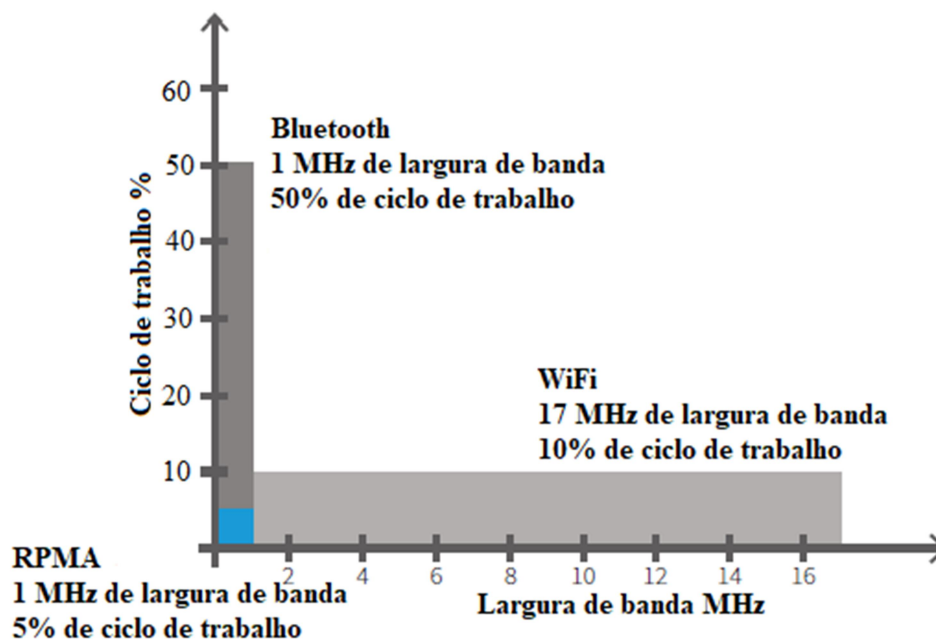


Figura 7 – Comparação entre RPMA, Wi-Fi e Bluetooth.

Fonte: Adaptado de INGENU, 2016b.

Alguns pontos de melhoria, desvantagens e limitações do RPMA foram levantados, sendo importante apontá-los como uma forma de analisar mais profundamente a tecnologia. Para isso, uma síntese é apresentada nos próximos tópicos (INGENU, 2015):

- Baixa cobertura disponível ao redor do mundo, a Ingenu possui uma cobertura ainda concentrada nos Estados Unidos. No Brasil há notícias de uma parceria com a Vodafone e Data Mobile para implantação da rede até 2018, porém ainda não há informações do estado do projeto e cobertura oficial;
- Uso do espectro de frequência não licenciado 2,4 GHz que é o mais utilizado por diversos outros dispositivos como telefones fixos, micro-ondas, redes Wi-Fi, Bluetooth, etc. Mesmo com a capacidade de rejeição de ruído as inúmeras interferências podem apresentar problemas para o RPMA.

As características da tecnologia RPMA da Ingenu a colocam como uma forte concorrentes no mercado global de IoT, sendo que sua maior participação atualmente é no mercado norte americano. Os Estados Unidos historicamente tendem a usarem tecnologias desenvolvidas em território nacional ao invés de tecnologias estrangeiras e, aparentemente, tudo indica que o mesmo está acontecendo no mundo de internet das coisas. Resta saber como

o resto do mundo irá se comportar em relação a Ingenu, lembrando que, das tecnologias em mais forte ascensão, ela é a única que utiliza frequência portadora de 2,4 GHz.

2.5.4 NB-IoT

O NB-IoT é uma tecnologia recente de internet das coisas, padronizada por meio do *Release-13* de 2016 pela 3GPP, organização que padronizou a tecnologia LTE, pertence à categoria de redes de banda estreita (*Narrow Band* – NB) e também se trata de uma LPWAN. O NB-IoT não é compatível com as tecnologia 3G, mas pode coexistir com o GSM, o GPRS e o LTE, para este último pode ser suportado com apenas uma atualização de software em cima da infra-estrutura LTE existente (WANG et al., 2016). A tecnologia utiliza as redes de telefonia móvel existentes como meio físico para o protocolo, seja por meio das portadoras GSM (modo *standalone*), das portadoras não utilizadas (modo *guard band*) ou por meio das portadoras LTE (modo *in band*), conforme ilustrado na Figura 8 (HAUWEI, 2015; SCHLIENZ e RADDINO, 2016; WU, 2017).

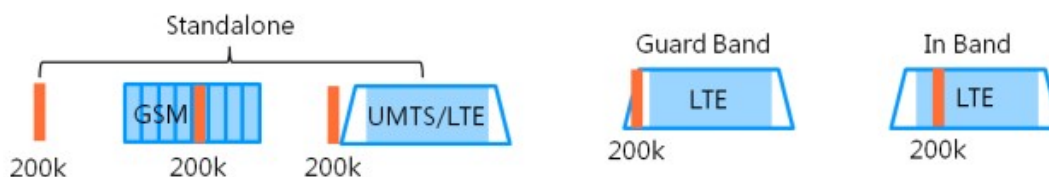


Figura 8 – Padronização dos canais de NB-IoT.

Fonte: HAUWEI, 2015

Essa característica do NB-IoT é uma de suas grandes vantagens, justamente por utilizar as “sobras” de espectro das portadoras de telefonia celular para modular o sinal, o que já lhe garante uma imensa infraestrutura construída para atender a telefonia móvel (HAUWEI, 2015). Por outro lado, essa mesma característica lhe confere uma desvantagem: como o espectro de telefonia móvel é licenciado, portanto não gratuito, e como geralmente nos leilões de espectro de frequência os valores são muito altos, já existe um custo adicional embutido na solução.

No NB-IoT os dispositivos podem comunicar caso a potência recebida seja de até 164 dB, podendo atender até 52.500 dispositivos por célula, com potencial para ampliar a capacidade adicionando mais ERB. O NB-IoT usa modulação acesso múltiplo por divisão de

frequência (*Frequency Division Multiple Access* – FDMA) para *uplink* e acesso múltiplo por divisão de frequência ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access* – OFDMA) para *downlink*. A taxa de dados é limitada a 250 kbps para a comunicação de *downlink* de múltiplos tons e a 20 kbps para a comunicação *uplink* de tom único. Em relação à bateria, para uma potência recebida de até 164 dB, um rádio baseado em NB-IoT pode atingir uma duração de até 10 anos transmitindo em média 200 bytes de dados por dia (HAUWEI, 2015; SCHLIENZ e RADDINO, 2016; WU, 2017).

O NB-IoT surgiu como a evolução de outras tecnologias de banda estreita, com o objetivo de trazer otimizações nos protocolos, redução da largura de banda e, consequentemente, de taxa de dados e suporte à mobilidade. Entre suas principais características, pode-se destacar:

- Possui suporte a canais de banda estreita de 180 kHz (HAUWEI, 2015; SCHLIENZ e RADDINO, 2016; WU, 2017);
- Suporta dois modos para *uplink*: sendo o primeiro com transmissão de tons simples com espaçamento de 15 kHz e / ou 3,75 kHz, e o segundo com transmissões de tons múltiplos com espaçamento de 15 kHz (HAUWEI, 2015; SCHLIENZ e RADDINO, 2016; WU, 2017);
- A taxa de dados de pico de download no canal compartilhado (*Physical Downlink Shared Channel* – NPDSCH) pode ser obtida usando o maior bloco de transporte (*Transport Block Size* – TBS), de 680 bits, e transmitindo-o por 3 ms, resultando em uma taxa de dados de pico de 226,7 kbps. Já a taxa de dados de pico de upload no canal compartilhado (*Physical Uplink Shared Channel* – NPUSCH) pode ser obtida usando o maior TBS de 1000 bits e transmitindo-o em 4 ms. Isso proporciona taxa de dados de pico de 250 kbps (HAUWEI, 2015; SCHLIENZ e RADDINO, 2016; WU, 2017).
- Possui uma perda por acoplamento até 20 dB maior que o padrão LTE, sendo que o aumento da cobertura é alcançado pela troca da taxa de dados pela repetição. Também colabora para isso, a introdução de uma única transmissão de subportadora NPUSCH e modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). O NPUSCH, com tonalidade de 15 kHz fornece uma taxa de dados de camada 1 de aproximadamente 20 bps, quando configurada com o maior fator de repetição (128) e o esquema de modulação e codificação mais baixo. Já o NPDSCH fornece uma taxa de dados de camada 1 de 35

bps quando configurada com o fator de repetição 512 e o menor esquema de modulação e codificação (HAUWEI, 2015; SCHLIENZ e RADDINO, 2016; WU, 2017).

- Os dispositivos são mais simples, apresentando redução do tamanho dos blocos de transporte de *downlink* e *uplink*. Também apresentam suporte a apenas uma redundância no *downlink* e transmissão *single-stream* em *downlink* e *uplink*. Outra vantagem é a necessidade de apenas uma antena e decodificador simplificado, o que facilita a implementação. O hardware também é simplificado devido à baixa taxa de amostragem, por causa da largura de banda estreita e devido ao processamento de camada física realizado de forma sequencial, não sendo necessário processamento em paralelo, além de ser somente *full-duplex* em divisão de frequência (*Frequency-Division Duplex* – FDD) (HAUWEI, 2015; SCHLIENZ e RADDINO, 2016; WU, 2017).
- Duração de até dez anos de vida útil de bateria para transmissões de até 200 bytes por dia, sendo projetado para enviar sinais de alarme em até 10s, sendo recomendado para aplicações insensíveis à latência (HAUWEI, 2015; SCHLIENZ e RADDINO, 2016; WU, 2017).
- Possui suporte a conexão de até 52500 clientes conectados por célula e suporte a várias ERB (HAUWEI, 2015; SCHLIENZ e RADDINO, 2016; WU, 2017).

Alguns pontos de melhoria e desvantagens do NB-IoT foram levantados em Ingenu (2016a), sendo importante apontá-los como uma forma de analisar mais profundamente a tecnologia. Para isso, uma síntese é apresentada nos tópicos seguintes:

- Somente metade das mensagens são reconhecidas no NB-IoT devido à capacidade de *downlink* limitada. Isso implica na incapacidade de realizar aplicações IoT que exigem reconhecimento de todo o tráfego de dados de *uplink*, a menos que o aplicativo implemente de alguma forma mecanismos de confiabilidade, o que os torna mais complexos e pode aumentar o consumo de energia da bateria (INGENU, 2016a).
- A compactação de pacotes em um pacote maior melhora a eficiência da comunicação da rede, porém causa aumento da latência, o que pode ser muito ruim para aplicações sensíveis (INGENU, 2016a).

- As aplicações baseadas em NB-IoT podem sofrer impacto de um tráfego muito alto de voz e dados na rede, devido ao padrão de realocação dinâmica do espectro de frequência para aliviar o congestionamento (INGENU, 2016a).
- O ciclo de vida dos dispositivos NB-IoT é uma dúvida, com um ciclo normalmente maior que o das tecnologias celulares e, conseqüentemente, um tempo maior para retorno dos investimentos em aplicações. Não se sabe como funcionarão as atualizações de padrões das redes celulares onde o NB-IoT não seja compatível (INGENU, 2016a).
- A falta de implantações comerciais deixa perguntas abertas sobre a vida real da bateria e o desempenho alcançável em condições reais (INGENU, 2016a).

Como todas as tecnologias novas, o NB-IoT tem suas vantagens e desvantagens, sendo que alguns pontos apenas serão totalmente avaliados após um período de existência da tecnologia no mercado, em aplicações reais, de modo que dados concretos possam ser avaliados. Dessa forma, este estudo é baseado nos principais documentos que descrevem essa tecnologia, assim como em artigos que buscaram entender melhor suas características.

2.5.5 Digi XBee-PRO

A empresa americana Digi International Inc., possui um amplo portfólio de equipamentos de radiofrequência voltado para a conexão de coisas, segundo a autodefinição de atuação da empresa. Sua especialidade são aplicações M2M, quando um elevado número de sensores precisam ser conectados a sistemas de gerenciamento por redes sem fio para monitoramento remoto. Há vários anos no mercado, a Digi oferece soluções para diversos setores da indústria, como óleo e gás, mineração, energia, agricultura, tratamento e distribuição de água, entre outros. Especificamente o rádio Digi XBee-PRO 900HP será avaliado neste trabalho como uma possível solução para o projeto, isso porque existem aplicações de sensoriamento remoto que utilizam esse rádio atualmente. Assim, as características descritas na sequência são referentes a esse equipamento.

Os rádios XBee que trabalham nas frequências subgigahertz utilizam um padrão de comunicação de RF próprio, diferentemente dos 2,4 GHz que, em geral, utilizam o padrão de comunicação Zigbee com as camadas físicas e MAC do protocolo IEEE 802.15.4. Entre os diversos módulos de rádios XBee existentes, foram selecionados os módulos desenvolvidos para longo alcance aliados ao baixo consumo de energia, sendo excluídos os que possuem

consumo acima de 250 mA nas transmissões. O modelo XBee-PRO 900HP, possui alta disponibilidade aliada ao baixo consumo de energia. Além disso, os rádios podem trabalhar nas topologias de rede: DigiMesh, Repeater, Point-to-Point, Point-to-Multipoint e Peer-to-Peer, todas configuráveis de acordo com a necessidade da aplicação (DIGI INTERNATIONAL INC., 2017). Assim, segundo a Digi International Inc., (2017), esses rádios possuem características como:

- Cobertura de até 40 km, desde que com visada, antena de alto ganho e taxa de transferência de até 200 kbps.
- Atualizações de *firmware* realizadas pelo ar (*over-the-air*), por meio de outro rádio Digi XBee-PRO 900HP ou via software Digi Remote Manager, sem necessidade de ir até o local.
- Possui algoritmo de seleção de canal via software para imunidade a interferência e que permite trabalhar em redes mais densas.
- Possui versões programáveis que permite o desenvolvimento de aplicativos personalizados.

Os rádios XBee-PRO possuem boa imunidade a interferências causadas por ruídos, isso porque utiliza a modulação de espalhamento por salto de frequência (*Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS*), que utiliza a técnica de troca pseudoaleatórias de canal entre transmissor e receptor. O rádio possui, ainda, modo de operação que permite a redução de consumo de energia, prolongando a vida útil da bateria, o que o torna uma boa opção para aplicações nas quais os dispositivos necessitam operar por vários anos com a mesma bateria (DIGI INTERNATIONAL INC., 2017).

Alguns pontos de melhoria e desvantagens do rádio XBee foram levantados, sendo importante apontá-los como uma forma de analisar mais profundamente a tecnologia. Para isso, uma síntese é apresentada nos tópicos seguintes:

- Como não se trata de uma tecnologia LPWAN os rádios XBee da Digi não possuem uma alta sensibilidade de recepção, o que torna o rádio dependente de antenas direcionais de alto ganho para enlaces de longa distância;
- Possui um alto consumo de energia se comparado às tecnologias LPWAN devido à necessidade de maior potência de saída para transmissões de longa distância;

- Menor imunidade a ruído se comparado às tecnologias LoRaWAN, Sigfox e Ingenu;
- Necessidade de antenas direcionais de alto ganho para enlaces da ordem de quilômetros.

A Digi possui uma gama de produtos que operam nas frequências de subgigahertz, com características distintas, de acordo com aplicação utilizada. Existem dispositivos voltados ao menor custo e, conseqüentemente, menor capacidade de cobertura e imunidade a ruído; dispositivos de maior alcance e maior consumo de energia e custo; assim como dispositivos que aliam o baixo consumo com ampla cobertura, porém com menor taxa de dados. Essa variedade de soluções colocam os rádios XBee como boa alternativa para diversas aplicações de internet das coisas, embora a Digi não ofereça uma solução completa de IoT e seus produtos em geral possuam arquitetura de rede diferente da convencional para IoT. Essas características associadas ao tempo de mercado, facilidade de aquisição e facilidade de configuração dos rádios e da rede utilizando o software XCTU ou comandos AT, colocam os rádios XBee como possíveis soluções para a cobertura de RF para a cidade de Ouro Preto.

2.6 Propagação de sinal de radiofrequência

A propagação de ondas de rádio é extremamente importante para as diversas formas de comunicação sem fio utilizadas hoje em dia. São inúmeros os serviços que utilizam algum tipo de espectro de frequência para tráfego de dados, desde as comunicações via satélites a pequenos transmissores portáteis do nosso dia a dia para abrir portas e portões. Em comum, essas diversas formas de comunicação têm o uso de pelo menos um canal de rádio, um transmissor e um receptor, que embora aparentemente simples, podem esconder complexas estruturas e tecnologias, além de uma organização do espaço espectral para que os serviços possam coexistir (RAPPAPORT, 1996; WILLIS, 2007).

O estudo da propagação é importante para que se possa estimar e avaliar previamente as características de determinado canal de rádio, de forma a desenhar da melhor forma possível uma rede de comunicação confiável e segura. Essa estratégia é muito utilizada nos mais diversos meios, uma vez que permite estudar a viabilidade da rede antes da aquisição e instalação de equipamentos.

Nesses estudos é possível entender como fenômenos importantes, como a reflexão, a difração e a refração, influenciam na propagação das ondas. Assim, por meio de modelos matemáticos analíticos e computacionais é possível prever as perdas de sinal ao longo do caminho de uma determinada transmissão, o valor do campo elétrico ao longo do tempo, a influência do ambiente onde a transmissão ocorre, etc. (WILLIS, 2007). Graças a essas informações é possível realizar simulações da propagação e predição dos sinais de radiofrequência, tornando possível estudar a viabilidade de um projeto antes de sua execução, o que permite uma grande economia.

O estudo dos principais fenômenos presentes na propagação de ondas de radiofrequência é fundamental para o entendimento do funcionamento das tecnologias de comunicação que existem atualmente, principalmente quando se trata do espectro de frequência contemplado neste trabalho. Esses fenômenos são amplamente estudados de forma a possibilitar às tecnologias tirar o maior proveito possível de suas características, assim como estarem preparadas para reduzir os efeitos negativos. A grande maioria dos modelos de predição e propagação de radiofrequência fazem uso desses fenômenos, que serão detalhados a seguir.

2.6.1.1 Refração

A refração é o fenômeno físico que ocorre com todas as ondas eletromagnéticas ao passarem de um meio físico para outro. Como meio físico, entende-se um ambiente com as mesmas características físicas, como por exemplo, o ar e a água. Para melhor entender os fenômeno da refração é importante saber que o ar ou a água podem representar meios físicos diferentes, isso porque diferenças de altitude no ar e de profundidade na água podem alterar suas características e, assim, alterar o índice de refração (WILLIS, 2007).

O índice de refração é um índice criado para diferenciar os meios de propagação de uma onda, que pode variar de acordo com a temperatura, a altitude, a pressão, o tipo de material, etc. No ar, onde mais se interessa entender os fenômenos da refração eletromagnética, o índice de refração é aproximadamente 1, sendo normalmente $n = 1,0003$ ao nível do mar (WILLIS, 2007).

O mais importante a se entender no fenômeno da refração é que uma onda muda seu comprimento de onda ao mudar de meio, porém como as frequências se mantêm constantes, por depender apenas da origem, ocorre também uma mudança de velocidade e direção,

segundo a lei de Snell, representada na Figura 9. Esse fenômeno é extremamente importante na propagação de radiofrequência, porque à medida que altitude varia na atmosfera terrestre, o índice de refração vai mudando devido a variação de temperatura e pressão, que caem com a altitude. Portanto, causa um fenômeno de curvatura nas ondas, que permite um maior alcance (WILLIS, 2007).

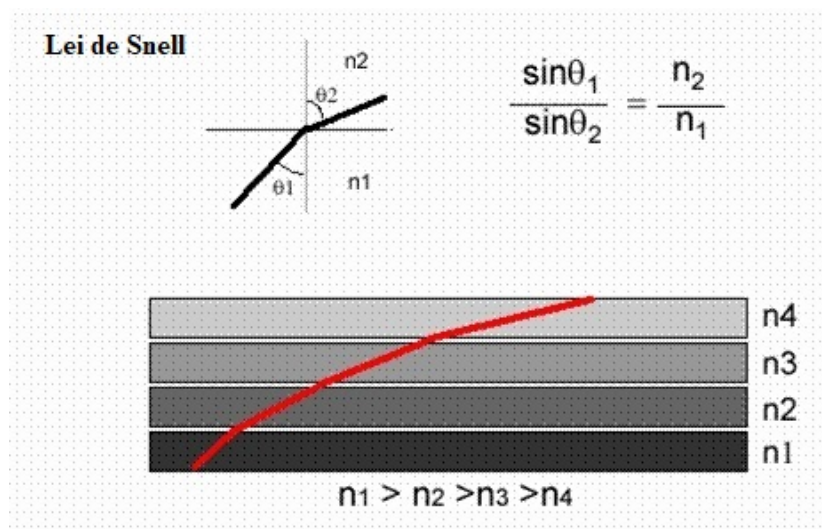


Figura 9 – Representação da Lei de Snell.

Fonte: WILLIS, 2007.

2.6.1.2 Difração

A difração é outro fenômeno ondulatório extremamente importante e que, embora esteja presente em todos os tipos de onda, é fundamental para a propagação de ondas eletromagnéticas. Em simples palavras, a difração é a capacidade de uma onda transpor barreiras encontradas em seu caminho. Embora seja um fenômeno até mesmo visível para alguns tipos de ondas, como ondas na água ou a luz, exige uma matemática complexa para defini-lo, que não será abordada neste trabalho. Na Figura 10 é apresentado um diagrama da difração de uma onda. Nele, após a onda passar por um obstáculo representado por uma barreira física, na região da borda aguçada do objeto ocorre uma mudança de direção da onda, o que origina uma nova onda com uma intensidade menor que a anterior e uma frente de onda diferente, além de uma região de sombra onde a nova onda não alcança (WILLIS, 2007).

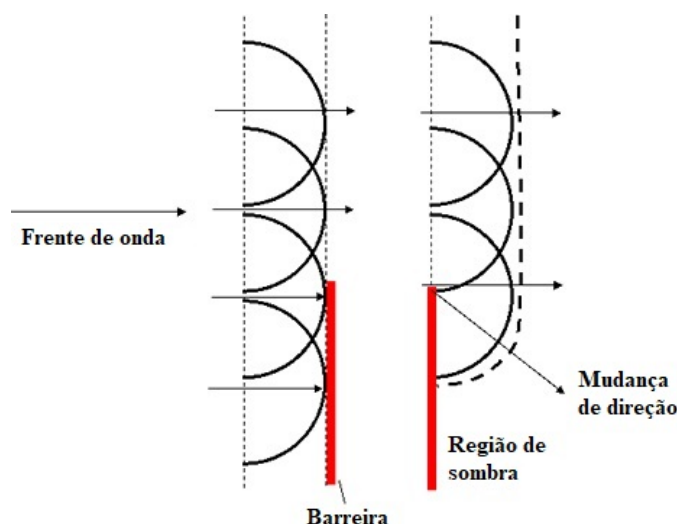


Figura 10 – Digrama da difração de uma onda.

Fonte: Adaptado de WILLIS, 2007.

Ao sofrer uma difração, a onda perde parte de sua intensidade, o que representa uma perda da intensidade do sinal. Essas perdas de sinal são chamadas de perdas do caminho ou PL (*Path Loss*), além disso, podem ser estimadas através de cálculos que são utilizados nos modelos de propagação (WILLIS, 2007).

2.6.1.3 Reflexão

A reflexão é outro fenômeno ondular tão importante quanto os anteriores, sendo extremamente utilizado nos modelos de propagação. Sem a reflexão de ondas eletromagnéticas, apenas as ondas que percorressem o caminho direto do transmissor até o receptor seriam captadas. Mas, felizmente esse fenômeno, que consiste na reflexão das ondas por superfícies de objetos, permite que uma onda percorra múltiplos caminhos de uma fonte até um objeto, o que aumenta exponencialmente as chances de um sinal transmitido chegar ao destino (WILLIS, 2007).

Em uma reflexão ideal, quando a superfície é plana e infinitamente maior que a primeira zona de Fresnel¹⁴, a fase e a amplitude da onda refletida podem ser encontradas a partir do coeficiente de reflexão ρ da superfície. O coeficiente de reflexão é composto pela constante dielétrica do material e pela permeabilidade, sendo que o primeiro influencia na

¹⁴ Zona de Fresnel pode ser definida como uma série de elipses concêntricas em torno da linha de visada, determinando a área em torno da linha de visada na qual poderá existir interferência no sinal, caso ele seja bloqueado por um obstáculo. A primeira zona de Fresnel é o local onde o comprimento do caminho adicional em comparação com o caminho mais curto não excede $\lambda / 2$.

propagação do campo elétrico e o segundo na propagação do campo magnético. Na reflexão ideal, o raio incidente vindo da fonte forma um ângulo com a superfície plana igual ao ângulo formado entre a mesma superfície e o raio refletido, que parte do ponto de reflexão, como ilustrado na Figura 11 (WILLIS, 2007).

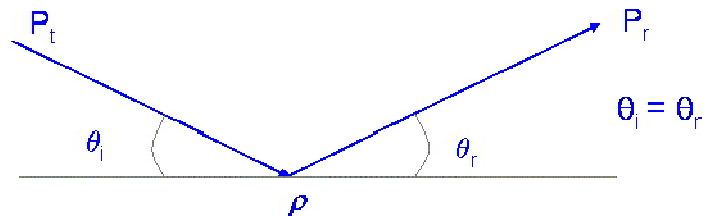


Figura 11 – Reflexão em um plano ideal.

Fonte: WILLIS, 2007.

Em situações reais, no entanto, a reflexão pode causar outros fenômenos importantes para a propagação das ondas eletromagnéticas, porque no mundo real as superfícies refletoras não são planas e infinitamente maiores que o comprimento de onda (WILLIS, 2007).

Assim, fenômenos como o *multi path*, que ocorre quando raios percorrem caminhos distintos de uma fonte até um mesmo destino, podem se somar ou subtrair, dependendo da fase com que chegam ao receptor, causando uma interferência construtiva ou destrutiva no sinal. Esse fenômeno ocorre para ângulos muito pequenos, nos quais o coeficiente de reflexão ($\rho = -1$) e a mudança de fase é de 180° . Essa informação é muito importante para os modelos de propagação, uma vez que os valores da distância entre transmissor (TX) e receptor (RX), a altura de TX e RX, assim como o coeficiente de reflexão, podem contribuir para a interferência ser construtiva ou destrutiva (WILLIS, 2007).

Outra característica importante é a rugosidade da superfície refletora. Diferentemente da superfície ideal, nenhuma superfície é idealmente lisa, sendo composta de inúmeras irregularidades, muitas vezes microscópicas. Essas irregularidades das superfícies provocam uma reflexão difusa, ou seja, os raios refletem para todos os lados. Como a transição entre superfície lisa e rugosa é contínua, deve-se utilizar um critério para aplicar as propriedades de superfície lisa e rugosa nos modelos de propagação. Para isso, utiliza-se o critério de Rayleigh. Resumidamente, de acordo com esse critério, se a diferença entre o caminho dos raios 1 e 2, representado na Figura 12, não for maior que o comprimento de onda, a superfície é lisa. Assim, se a constante $C < 0,1$, a superfície é lisa; caso $C > 10$, a superfície é rugosa.

e, assim, a difusão é tão grande que sua contribuição pode ser considerada desprezível (WILLIS, 2007).

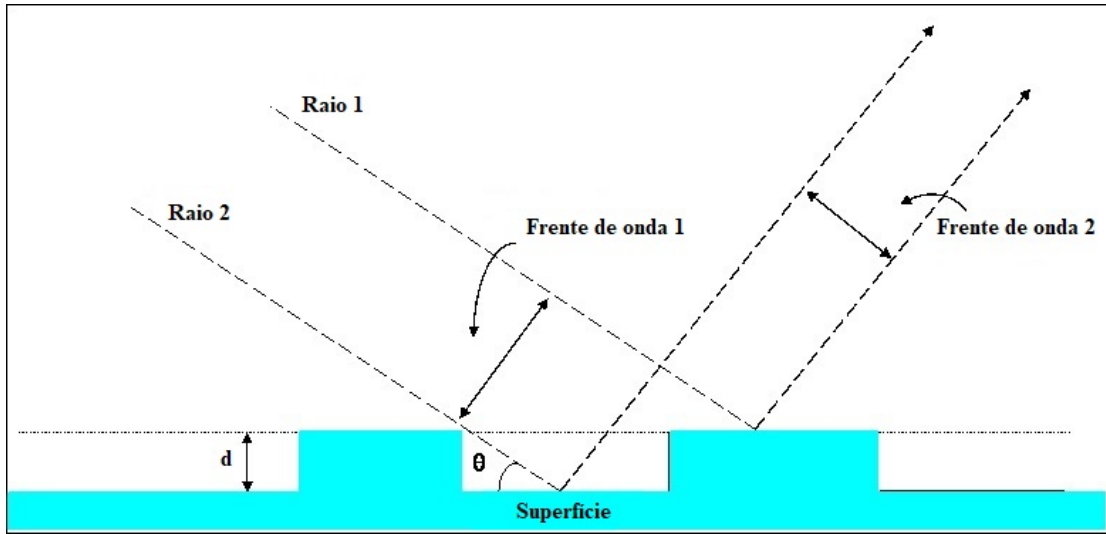


Figura 12 – Reflexão difusa.

Fonte: Adaptado de WILLIS, 2007.

Para a aplicação do critério, por definição, a constante C é dada por

$$C = \frac{4\pi\sigma \sin \theta}{\lambda}, \quad (1)$$

em que: σ é o desvio padrão da rugosidade da superfície (WILLIS, 2007).

2.7 Simulação de propagação de radiofrequência

Existem várias formas de se avaliar o desempenho de uma rede de comunicação sem fio, desde abordagens puramente teóricas a modelagens matemáticas realizadas em simuladores de propagação e previsão de sinal de radiofrequência. A mais pragmática de todas as abordagens é conhecida mais popularmente como teste de campo, na qual os sinais são medidos in loco, o que a torna a mais assertiva de todas. A grande questão dessa abordagem, é que seu custo benefício é ruim. Isso, porque, embora com todos os benefícios de uma avaliação física dos sinais de radiofrequência, da identificação dos problemas reais de sombreamento e atenuação de sinal, ruídos de fundo, problemas de equipamentos, etc., essa técnica não é escalável devido ao seu alto custo (YANG et al., 1998; ZVANOVEC, 2003; GARCIA, 2006).

Uma alternativa muito interessante ao alto custo dos testes de campo e também à alta complexidade dos métodos analíticos são as simulações realizadas por computador, nas quais é possível inserir uma série de parâmetros importantes para a análise e executar uma simulação que utiliza modelos matemáticos que calculam os parâmetros de saída baseado nas entradas do sistema. Esse tipo de recurso é amplamente utilizado na indústria de telecomunicações, sendo importante para o estudo de viabilidade de diversos projetos (YANG et al., 1998; ZVANOVEC, 2003; GARCIA, 2006).

Neste projeto a ferramenta de simulação utilizada é o software Wireless Insite¹⁵, desenvolvido pela empresa Remcom Inc. Trata-se de um pacote de modelos que utilizam algoritmos de traçado de raios (*ray-tracing*) e outros métodos para análises de sistemas de comunicação wireless e propagação de ondas de rádio. O software é capaz de fornecer previsões eficientes e precisas em ambientes internos e externos, mesmo em situações complexas (REMCOM INC, 2017a). Sua funcionalidade para ambientes rurais e urbanos o torna uma ferramenta muito útil para execução do trabalho em questão, visto que as áreas de risco são, no geral, áreas urbanas e rurais.

O Wireless Insite é capaz de executar diversos modelos de propagação para realizar as simulações, sendo que cada um deles tem suas características, mais ou menos adaptados para uma determinada condição. Assim, identificar o melhor modelo para resolver um determinado problema é primordial e, para isso, os documentos de apoio do software, o Guia de Usuário e o Manual de Referência são fundamentais (REMCOM INC, 2017b; c).

Os modelos disponíveis no Wireless Insite se dividem em grupos, sendo o primeiro formado pelos que utilizam algoritmos de *ray-tracing* combinados com ótica geométrica (*Geometric Optics* – GO) e a teoria da difração uniforme (*Uniform Theory of Diffractions* – UTD). O método *ray-tracing* busca os caminhos de propagação do sinal de radiofrequência entre os transmissores e receptores e os dois métodos físicos avaliam o campo elétrico presente em cada um dos caminhos traçados pelos raios. Esse primeiro grupo é composto pelos modelos: X3D, Full 3D, Urban Canyon, e Vertical Plane, que, em geral, possuem tempo de execução longo, devido ao número elevado de iterações realizadas. Além desse grupo, o

¹⁵ Wireless Insite é um software de propagação de radiofrequência que utilizam algoritmos de traçado de raios (*ray-tracing*) e outros métodos para análises de sistemas de comunicação wireless e propagação de ondas de rádio. O software é capaz de fornecer previsões eficientes e precisas em ambientes internos e externos, mesmo em situações complexas.

Wireless Insite fornece opções de métodos de execução rápida, como os modelos Free Space, Hata e Cost-Hata, além de outros dois modelos baseado em diferença finita no domínio do tempo (*Finite Difference Temp Domain* – FDTD), sendo eles: *Urban Canyon FDTD* e *Moving Window FDTD* (REMCOM INC, 2017b).

Na sequência são detalhados os modelos que serão utilizados no trabalho, sendo: Free Space, Hata, Vertical Plane, e X3D, que possuem custo computacional baixo, médio e alto, respectivamente. De modo a melhor organizar esta documentação, também serão abordados os modelos digitais de elevação (*Digital Elevation Model* - DEM), que são utilizados pelos modelos para definir as características do relevo do ambiente de simulação e os algoritmos de *ray-tracing*, utilizado pelos modelos de simulação. É importante frisar que o detalhamento destes modelos foi realizado com base na documentação do Wireless Insite, logo, eles representam exatamente como os modelos foram implementados no software, podendo assim, diferir da forma padrão como os modelos foram definidos na literatura.

2.7.1 Modelo Digital de Elevação

Os modelos digitais de elevação (*Digital Elevation Model* – DEM) são formas de representação do relevo da superfície do globo terrestre que possuem aplicação em diversas áreas. Por meio deles é possível estudar declividades, bacias hidrográficas, exposição solar, coberturas vegetais, entre outros parâmetros importantes para diversas aplicações como áreas para conservação do solo e da diversidade biológica, modelagem hidrológica, ortorretificação de imagens de satélite, avaliação de riscos de desmoronamentos, projetos de simulação de propagação de radiofrequência, etc. (LUIZ, SANTOS, e BRENNER, 2007).

Esses modelos geram arquivos que são uma matriz de pixels formados pelos coordenadas x,y,z, sendo as duas primeiras planimétricas e a última de elevação. Existem diferentes fontes para os DEM, sendo que neste trabalho é utilizado o DEM da Missão Topográfica Radar Shuttle (*Shuttle Radar Topographic Mission* – SRTM), cuja fonte é o Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* – USGS) (USGS, 2017).

A escolha desse DEM para utilização nas simulações se deu pela grande abrangência global, sendo que a área de estudo do trabalho é perfeitamente contemplada pelos arquivos disponibilizados pela USGS. Outro fato importante para a escolha do DEM é a resolução de 1

arco de segundo que corresponde a aproximadamente 30 metros, sendo assim satisfatório para o trabalho (USGS, 2017).

2.7.2 Ray Tracing

Os modelos baseados em traçados de raios ou *ray tracing* possuem uma ideia geral, que consiste em interligar as antenas dos transmissores e receptores através de traços ou raios, que representam a propagação das ondas eletromagnéticas. Da mesma forma como a propagação da luz, que possui características de partícula e de onda, as ondas eletromagnéticas podem ser representadas por raios oriundos de um emissor que se propagam em um movimento retilíneo em direção a um receptor. Assim, os modelos de *ray tracing* usam essa característica das ondas para criar as possíveis rotas por onde o sinal passa para ir de um ponto a outro. Lembrando que, devido às características de reflexão, refração e difração das ondas, não somente os caminhos diretos são considerados e sim os múltiplos caminhos que interligam um transmissor a um receptor. Dessa forma, calculando-se o campo elétrico e o tempo durante todo o percurso, é possível se obter o valor resultante do sinal por meio da soma dos sinais que chegam a um mesmo ponto (ALVES, 2005; REMCOM INC, 2017b; YANG, WU, e KO, 1998).

Existem diversas versões dos algoritmos de *ray tracing*, sendo que no programa Wireless Insite são utilizadas diferentes adaptações dos modelos de propagação, assim como sua combinação com outros algoritmos, como por exemplo os de ótica geométrica. Dessa forma, em cada um dos modelos teóricos apresentados no tópico 2.7, serão citados os algoritmos de *ray tracing* ou suas combinações com outros algoritmos utilizados pelo método em questão. Para melhor estruturar o trabalho e evitar repetições, nos tópicos seguintes é explicado o funcionamento dos algoritmos de *ray tracing* dos modelos utilizados neste projeto, de forma a possibilitar um melhor entendimento.

2.7.2.1 Método Shooting and Bouncing Ray (SBR)

O método do rastreamento de raios forçados (*Shooting and Bouncing Ray* – SBR) consiste na emissão de raios em todas as direções a partir de uma fonte (antena transmissora). Os raios, juntamente com seus pósteros originados das interações com o ambiente por meio da reflexão, refração e difração, são mapeados até atingir ou não os receptores, juntamente com as perdas do espaço vazio e as perdas das interações. O método pode ser utilizado em

geometria bidimensional ou tridimensional, além de uma variante intermediária chamada de 2,5D com dois planos, um vertical e outro horizontal. A geometria utilizada influencia diretamente no custo computacional da solução, sendo que a escolha está associada à capacidade de processamento e à necessidade de precisão do resultado (REMCOM INC, 2017b).

No Wireless Insite, o método SBR é utilizado primeiro para rastrear caminhos de raios através da geometria tridimensional, sem considerar a localização específica dos pontos. Os raios são rastreados a partir da fonte, sendo refletidos pelos obstáculos do ambiente e continuam sendo rastreados até o algoritmo atingir o número máximo de reflexões, ou quando os raios atingem o limite da área de estudo (*Study Area*) em questão. Outro importante ponto de destaque do algoritmo é o uso da teoria geométrica da difração (*Geometrical Theory of Diffraction* – GTD) para identificação dos pontos de difração do ambiente. Segundo essa teoria as difrações ocorrem nos pontos onde o campo é descontínuo, sendo que as discontinuidades são identificadas nos pontos onde raios adjacentes tomam caminhos diferentes através da ótica geométrica (*Geometrical Optics* – GO). Assim, uma borda de difração é apresentada na Figura 13, em que uma seta indica o ponto de difração onde os raios adjacentes tomam trajetórias distintas (REMCOM INC, 2017b).

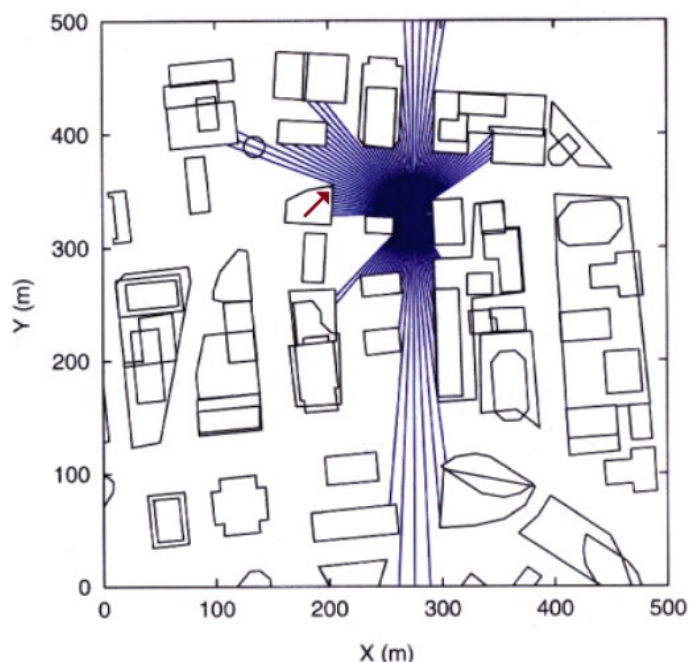


Figura 13 – Raios disparados por uma fonte sendo refletidos, refratados e difratados.

Fonte: REMCOM INC, 2017b.

Com o rastreamento dos raios SBR a partir de um transmissor ou borda, na sequência são construídos os caminhos geométricos distintos de cada ponto de campo, do transmissor ou de uma borda de difração. Como o SBR dispara raios em ângulos discretos, é improvável que um raio passe exatamente através de um ponto de campo. Assim, para compensar o espaçamento que existe entre os raios disparados, constrói-se uma esfera de coleta em torno do ponto de campo, conforme apresentado na Figura 13, no ponto próximo às coordenadas (125, 400). Os raios que passam por pela esfera são usados para construir os caminhos de raio GO e GTD específicos para o ponto de campo (REMCOM INC, 2017b).

Para validação dos raios coletados em uma mesma esfera de coleta, o método SBR geralmente encontrará uma série de raios que seguiram essencialmente o mesmo caminho através da geometria do projeto. Esses raios representam a mesma frente de onda e, portanto, contêm energia duplicada. Para evitar o somatório de energia duplicada no ponto de campo, os raios que interagiram com as mesmas faces geométricas são identificados como duplicatas. Por exemplo, vários raios cruzam a superfície de coleta circular mostrada na Figura 13, assim, a classificação dos raios identifica os caminhos duplicados e, a partir das duplicatas, um caminho exclusivo é selecionado. Normalmente, o raio que passa mais próximo do centro da esfera ou do ponto do campo é selecionado, sendo os demais descartados (REMCOM INC, 2017b).

Muitos caminhos de raios terão um raio de acompanhamento que segue trajetória similar, mas que reflete do chão. Os pontos de reflexão do solo sobre esses raios são encontrados analiticamente usando o método Eigenray, que será definido no tópico 2.7.2.2. Uma vez que os caminhos 3D completos são construídos, os pontos finais de cada segmento do caminho são armazenados em um arquivo na pasta da *Study Area*, juntamente com a sequência de interações. Esses caminhos de raio são usados para calcular a intensidade do campo elétrico (REMCOM INC, 2017b).

Outro ponto importante do algoritmo é como definir o espaçamento angular entre os raios a serem disparados. Assim, existem duas considerações:

- i. a primeira é definir o espaçamento dos raios SBR suficientemente densos para garantir que pelo menos dois raios para cada caminho exclusivo interceptem a superfície de coleta em torno de cada ponto de campo (REMCOM INC, 2017b). Dessa forma a estimativa do espaçamento angular em radianos é:

$$\Delta\phi \approx \frac{R_{coleta}}{D_{m\acute{a}ximo}}, \quad (2)$$

em que $D_{m\acute{a}ximo}$ é a máxima distância da área considerada (m) e R_{coleta} é o raio da esfera de coleta (m);

- ii. a segunda é considerar o espaçamento dos raios em relação à geometria, que deve ser ajustado suficientemente pequeno para que pelo menos dois raios cruzem a maioria das faces de superfícies na linha de visão do receptor. Essa condição é comumente satisfeita ao considerar o espaçamento de raios em relação à superfície de coleta, mas em alguns casos, pode ser o fator determinante na escolha de um espaçamento de raios (REMCOM INC, 2017b).

Segundo o manual do Wireless Insite, após um grande número de testes, os resultados mostraram que um espaçamento de raio de $0,2^\circ$ e uma superfície de coleta 2,5 m de raio funciona bem na maioria dos casos (REMCOM INC, 2017b).

O algoritmo do Wireless Insite foi projetado para suportar percorrer caminhos de raios com até 30 reflexões além das difrações e independente do número de transmissões. A grande questão é que quanto maior for o número de reflexões e transmissões, maior é o custo computacional, o que pode tornar o tempo de simulações muito grande, de acordo com (REMCOM INC, 2017b)

$$\frac{(N_R + N_T + 1)!}{N_R! N_T!}, \quad (3)$$

em que: N_R é o número de reflexões e N_T é o número de transmissões.

O tempo de computação será aproximadamente proporcional ao número de facetas na geometria, com facetas de dois lados contando como duas facetas. Caso ocorra uma única difração, o tempo de computação será aproximadamente proporcional ao número de facetas ao quadrado. Solicitar difrações de superfície adicionais não afetará muito o tempo de execução devido à limitação das bordas coplanares (REMCOM INC, 2017b).

2.7.2.2 Método Eigenray

O método Eigenray de rastreamento de raios é mais simples que o SBR e possui uma abordagem diferente, que envolve a construção explícita dos caminhos dos raios entre cada transmissor e receptor, satisfazendo o Princípio de Fermat de menor tempo gasto. Esse

método é limitado a caminhos de raios com até três reflexões e difrações e não há refrações na transmissão. Como no método SBR, ele encontra até 30 transmissões por caminho de raio. Contudo, esse método possui as seguintes restrições de busca de caminho:

- i. não há mais do que um total combinado de 3 reflexões (R) e difrações (D) por caminho de raio ($Tx - D - D - R - Rx$) ou ($Tx - R - R - R - Rx$);
- ii. os caminhos que difratam, refletem e depois difratam ($Tx - D - R - D - Rx$) não são construídos; e
- iii. caminhos com 3 difrações ($Tx - D - D - D - Rx$) devem difratar fora de bordas paralelas (geralmente todas as bordas verticais ou horizontais) (REMCOM INC, 2017b).

O custo computacional do método Eigenray é aproximadamente proporcional ao número de facetas elevado ao número de reflexões e difrações de um mesmo caminho somados, desde que a soma não supere três. Como o tempo de computação não aumenta significativamente com o número de transmissões, o método Eigenray é uma boa escolha para aplicações que exigem um grande número de transmissões, desde que as restrições sobre o número de reflexões e difrações sejam aceitáveis (REMCOM INC, 2017b).

2.7.2.3 Campo Elétrico

Para a avaliação do valor do campo elétrico, o primeiro passo é determiná-lo na zona distante da antena transmissora, sendo que na zona próxima à antena transmissora o campo não é considerado. No espaço livre, o campo elétrico na direção ($\theta; \varphi$) no campo distante da antena transmissora, a uma distância r pode ser definido como (REMCOM INC, 2017b)

$$E(r, \theta, \varphi) = (A_\theta(\theta, \varphi)\hat{e}_\theta + A_\varphi(\theta, \varphi)\hat{e}_\varphi) \frac{e^{-j\beta r}}{r} , \quad (4)$$

$$A_\theta(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{P_T \eta_0}{2\pi}} g_\theta(\theta, \varphi) , \quad (5)$$

$$A_\varphi(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{P_T \eta_0}{2\pi}} g_\varphi(\theta, \varphi) , \quad (6)$$

$$g_{\theta}(\theta, \varphi) = \sqrt{|G_{\theta}(\theta, \varphi)|} e^{j\psi_{\theta}} , \quad (7)$$

$$g_{\varphi}(\theta, \varphi) = \sqrt{|G_{\varphi}(\theta, \varphi)|} e^{j\psi_{\varphi}} , \quad (8)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} , \quad (9)$$

em que: $G_{\theta}(\theta, \varphi)$ é o componente θ do ganho da antena transmissora; θ é a fase relativa do componente θ do campo elétrico da zona distante; P_T é a potência calculada no tempo irradiada pelo transmissor; e r é a distância do transmissor até o receptor (m).

Para a realização dos cálculos em um ambiente totalmente tridimensional, utilizam-se equações complexas, devido à polarização do campo elétrico incidente em cada reflexão. Isso porque elas não são inteiramente paralelas ou perpendiculares ao plano de incidência, e sim uma combinação desses dois casos. Assim, para o correto cálculo do campo elétrico, deve-se dividir em componentes angulares, usando um sistema de coordenadas fixado por raio em cada reflexão. O campo refletido é, então, calculado a partir do coeficiente de reflexão, em que os componentes do campo elétrico refletido paralelos e perpendiculares ao plano de reflexão são dados por (REMCOM INC, 2017b)

$$\begin{bmatrix} E_{\parallel}^r \\ E_{\perp}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{\parallel} & 0 \\ 0 & E_{\perp} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{\parallel}^i \\ E_{\perp}^i \end{bmatrix} , \quad (10)$$

sendo:

$$E_{\perp}^i = \hat{e}_{\perp} \cdot E^i , \quad (11)$$

$$E_{\parallel}^i = \hat{e}_{\parallel} \cdot E^i , \quad (12)$$

$$\hat{e}_{\perp} = \frac{k \times \hat{n}}{|k \times \hat{n}|} , \quad (13)$$

$$\hat{e}_{\parallel} = \frac{k \times \hat{e}_{\perp}}{|k \times \hat{e}_{\perp}|} , \quad (14)$$

$$\hat{e}'_{\parallel} = \frac{k' \times \hat{e}_{\perp}}{|k' \times \hat{e}_{\perp}|} . \quad (15)$$

Assim, o campo refletido é dado por: $E^r = \hat{e}'_{\parallel} \cdot E_{\parallel}^r + \hat{e}_{\perp} \cdot E_{\perp}^r$, sendo que o vetor k está na direção da propagação do campo incidente, k' está na direção da propagação do campo

refletido e n é o vetor unitário normal à face refletiva. Conforme apresentado na Equação 10, a amplitude do campo elétrico é calculada apenas para um raio que sofre uma única reflexão, sendo que para os raios submetidos a reflexões múltiplas, a amplitude não depende simplesmente de um produto dos coeficientes de reflexão, mas devem ser avaliadas para a matriz de raios fixos criados em cada reflexão (REMCOM INC, 2017b).

Os coeficientes de difração utilizados são semelhantes aos dados em Luebbers (1984). Esses coeficientes incluem os coeficientes de reflexão dependentes do ângulo para a face particular do edifício e, assim, mantêm os campos contínuos nos limites de reflexão. Esses coeficientes de difração são para campos polarizados de forma paralela ou perpendicular à borda de difração. Em duas dimensões isso sempre se mantém, pois os campos são sempre incidentes normais à borda, enquanto que em três dimensões os campos podem ser invocados obliquamente e o campo pode ser polarizado em qualquer direção em relação à borda. Para que os campos permaneçam contínuos nos limites de reflexão, é necessário generalizar os coeficientes usando os resultados para permitir a direção arbitrária do incidente e a polarização (BURNSIDE e BURGNER, 1983; LUEBBERS, 1984).

Os campos incidente e difratado são expressos em termos de um sistema de coordenadas de borda fixa (BURNSIDE e BURGNER, 1983). O vetor unitário l é paralelo à borda de difração, k é o vetor de propagação para o campo difratado e k' é o vetor de propagação para o campo incidente. Os seguintes vetores unitários são definidos como

$$\hat{\phi}' = \frac{-\hat{l}' \times \hat{k}'}{|\hat{l}' \times \hat{k}'|}, \quad (16)$$

$$\hat{\beta}' = \hat{\phi}' \times \hat{k}' . \quad (17)$$

Os componentes do campo incidente são dados por: $E_{\phi'}^i = E^i \cdot \hat{\phi}'$ e $E_{\beta'}^i = E^i \cdot \hat{\beta}'$. Sendo que os componentes do campo difratado no local do receptor (omitindo quaisquer reflexões após a difração) neste sistema de coordenadas são dados por:

$$\begin{bmatrix} E_{\beta}^d \\ E_{\phi}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{ss} & D_{sh} \\ D_{hs} & D_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\beta'}^d \\ E_{\phi'}^d \end{bmatrix} \sqrt{\frac{r_{TD} \cdot r_{DR}}{r_{TD} + r_{DR}}} \frac{e^{-j\beta r_{DR}}}{r_{DR}} . \quad (18)$$

Assim, o campo difratado é dado por:

$$E^d = E_{\beta}^d \hat{\beta} \times E_{\phi}^d \hat{\phi} . \quad (19)$$

A equação díade permite que os campos sejam arbitrariamente polarizados e para qualquer coeficiente de reflexão dependente do ângulo a ser usado. Os elementos da díade de difração são dados por:

$$D_{ss} = D^+(\phi - \phi') + D^-(\phi - \phi') - [R_{\parallel}^0 \cos^2 \alpha_1 - R_{\perp}^0 \sin^2 \alpha_1] D^-(\phi + \phi') [R_{\parallel}^n \cos^2 \alpha_2 - R_{\perp}^n \sin^2 \alpha_2] D^+(\phi + \phi'), \quad (20)$$

$$D_{hh} = D^+(\phi - \phi') + D^-(\phi - \phi') + [R_{\parallel}^0 \sin^2 \alpha_1 - R_{\perp}^0 \cos^2 \alpha_1] D^-(\phi + \phi') [R_{\parallel}^n \sin^2 \alpha_2 - R_{\perp}^n \cos^2 \alpha_2] D^+(\phi + \phi'), \quad (21)$$

$$D_{sh} = -[R_{\parallel}^0 + R_{\perp}^0] \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 D^-(\phi + \phi') - [R_{\parallel}^n + R_{\perp}^n] \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 D^+(\phi + \phi'), \quad (22)$$

$$D_{hs} = [R_{\parallel}^0 + R_{\perp}^0] \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 D^-(\phi + \phi') + [R_{\parallel}^n + R_{\perp}^n] \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 D^+(\phi + \phi'). \quad (23)$$

Os índices sobrescritos 0 e n são usados para designar os dois lados da cunha, e ϕ e ϕ' são os ângulos de observação e incidência (LUEBBERS, 1984; BALANIS, 1999; HOLM, 2000). Os ângulos α_1 e α_2 são determinados por $\sin \alpha_1 = \hat{e}_{\parallel}^0 \cdot \hat{\phi}'$ e $\sin \alpha_2 = \hat{e}_{\parallel}^n \cdot \hat{\phi}'$, onde os vetores unitários $\hat{e}_{\parallel}^0$ e $\hat{e}_{\parallel}^n$ são vetores de raios fixados paralelos ao plano de incidência. As funções $D^+(\phi - \phi')$ e $D^-(\phi + \phi')$ são dadas por

$$D^+(\phi + \phi') = \frac{-e^{-\frac{j\pi}{4}}}{2n\sqrt{2\pi k}} \cot\left(\frac{\pi + (\phi + \phi')}{2n}\right) \cdot F(kLa + (\phi + \phi')), \quad (24)$$

$$D^-(\phi - \phi') = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}} \cot\left(\frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n}\right) \cdot F(kLa - (\phi - \phi')), \quad (25)$$

em que: $F(kLa + (\phi + \phi'))$ e $F(kLa - (\phi - \phi'))$ é a integral de Fresnel definida em diversas referências (BALANIS, 1999; KOUYOUMJIAN e PATHAK, 1974; LUEBBERS, 1984). Quando o campo incidente é normal à faceta e ($\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$), os elementos fora da diagonal são nulos, ($D_{sh} = D_{hs} = 0$) e os elementos da diagonal D_{ss} e D_{hh} reduzem os coeficientes de difração conforme (LUEBBERS, 1984). Sendo que para um condutor perfeito, ($R_{\parallel} = 1$, $R_{\perp} = -1$, enquanto ($D_{sh} = D_{hs} = 0$), e os elementos diagonais reduzem os coeficientes (BALANIS, 1999; KOUYOUMJIAN e PATHAK, 1974).

Na sequência, depois de cada reflexão ou difração ocorrida, o campo elétrico é transformado novamente em componentes cartesianos. Dessa forma, o passo final é determinar os componentes esféricos do campo elétrico no ponto receptor dos componentes cartesianos, por meio de

$$\begin{bmatrix} E_r \\ E_\theta \\ E_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_A \cos \phi_A & \sin \theta_A \sin \phi_A & \cos \theta_A \\ \cos \theta_A \cos \phi_A & \cos \theta_A \sin \phi_A & -\sin \theta_A \\ -\sin \phi_A & \cos \phi_A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}, \quad (26)$$

em que: $(\theta_A; \phi_A)$ são a direção a partir da qual o raio chega ao receptor. Para os campos eletromagnéticos transversais (*Transverse Electromagnetic* – TEM), o componente radial E_r calculado a partir da equação acima deve ser sempre zero.

2.7.3 Modelo Free Space

O modelo Free Space é um dos mais simples entre os disponíveis no Wireless Insite. Nele, é assumido que o campo elétrico decresce linearmente com a distância entre o transmissor e o receptor com uma razão de $1/r$ em todas as direções de propagação. Na predição do campo elétrico, é incluído o efeito provocado pelo padrão da antena utilizada, sendo que, para um determinado receptor bloqueado por qualquer obstáculo do terreno, é assumida uma perda padrão de 250 dB (REMCOM INC, 2017b).

Nesse modelo um único raio é traçado entre o transmissor e o receptor, a fim de determinar a distância entre eles, assim como o tempo de chegada e direções de chegada e partida. Essas informações são usadas, na sequência, para determinar os ganhos das antenas dos transmissores e receptores (REMCOM INC, 2017b). As principais características desse modelo são:

- Ambientes: todos;
- Faixa: ilimitada;
- Alturas da antena: todos;
- Tipos de antena: todos;
- Rastreamento de raios: raio único de Tx para Rx;
- Frequência mínima: depende da aplicação;
- Frequência máxima: depende da aplicação.

Para o cálculo do campo elétrico são utilizadas as equações apresentadas no item 2.7.2.3 (REMCOM INC, 2017b).

2.7.4 Modelo Hata

As fórmulas empíricas para cálculo de perda de trajetória definidos no modelo Hata foram desenvolvidas por Hata (1980). Elas, por sua vez, derivam de medições de perdas do caminho criadas por Okumura (1968). O modelo pode ser aplicado para a faixa de frequência específica de 150 MHz a 1500 MHz, e os fatores de correção utilizados para diferentes tipos de ambientes foram relatados em Rappaport (1996).

No Wireless Insite, a implementação desse modelo assume que o transmissor é a estação rádio base e o receptor é móvel. O modelo foi adaptado de forma simples para fornecer perda de espaço livre nas regiões de visada direta, (*Line of Sight* – LOS), e retornar o cálculo de Hata nas áreas sem visada direta (*Non Line of Sight* – NLOS), onde o receptor está bloqueado pelo relevo do terreno, geometria das construções urbanas ou outros tipos de obstrução. Nas regiões internas das edificações, uma perda de caminho de 250 dB é retornada, conforme definido no manual do Wireless Insite (REMCOM INC, 2017a). Um único raio direto do transmissor para o receptor é construído e usado como o caminho dos raios. Os padrões das antenas transmissoras e receptoras são avaliados usando a direção deste raio; portanto, esse modelo não utiliza efeitos de vários caminhos. Como esse raio direto único é assumido, esse modelo não é recomendado para antenas de recepção direcional em áreas urbanas. O modelo é recomendado para ambientes urbanos, suburbanos e rurais, utilizando fatores de correção para todos estes ambientes. Além disso, o alcance recomendado é de até 20 km e as antenas disponíveis são as isotrópicas (modelo ideal de antena utilizado no Wireless Insite) e as omnidirecionais, com altura que varia de 30 a 200 m para transmissores e de 1 a 10 m para os receptores (REMCOM INC, 2017a).

No modelo Hata o *path loss*, em decibéis, é dado por

$$PL = 69,55 + 26,16\log_{10}(f) - 13,82\log_{10}(h_T) - a(h_R) + (44,9 - 6,55\log_{10}(h_T))(\log_{10}(r_{TR}) - 3) + C_{Amb}, \quad (27)$$

em que:

$$a(h_R) = \begin{cases} (1,1\log_{10}(f) - 0,7)h_R - (1,56\log_{10}(f) - 0,8)dB; & \text{cidades médias} \\ 8,29(\log_{10}(1,54h_R))^2 - 1,1 dB; & \text{cidades grandes (f < 300MHz)} \\ 3,2(\log_{10}(11,75h_R))^2 - 4,97 dB; & \text{cidades grandes (f > 300MHz)} \end{cases}, \quad (28)$$

$$C_{Amb} = \begin{cases} -2 \left[\log \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5,4; & \text{cidades médias, grandes e subúrbios} \\ -4,78(\log_{10}(f))^2 + 18,33\log_{10}(f) - 40,94; & \text{áreas rurais} \end{cases}, \quad (29)$$

sendo: f – frequência em MHz; r_{TR} – distância entre TX e RX em metros; h_T – Altura do transmissor; h_R – altura do receptor.

Assim, obtém-se o campo elétrico por meio do *path loss* como

$$E_\theta = \sqrt{\frac{P_T \eta_0}{2\pi} g_\theta(\theta, \phi)} \sqrt{\frac{4\pi}{\lambda^2} \left(10^{\left(\frac{-PL}{20}\right)} \right)} e^{-j\beta r_{TR}}, \quad (30)$$

em que: $g_\theta(\theta, \phi) = \sqrt{|G_\theta(\theta, \phi)| e^{j\psi_\theta}}$, $G_\theta(\theta, \phi)$ é o componente θ do ganho da antena transmissora; ψ_θ é fase do componente θ do campo na zona distante; λ é o comprimento de onda; $\beta = \frac{\omega}{c}$; e P_T é a potência média no tempo, irradiada pelo transmissor

2.7.5 Modelo Vertical Plane

No modelo de propagação de radiofrequência Vertical Plane, é construído um plano vertical bidimensional que interliga o transmissor e o receptor. Dentro desse plano são traçados inúmeros raios a partir do transmissor em que se rastreiam todos os possíveis caminhos a serem percorridos até o receptor. Esse modelo é recomendado principalmente para terrenos irregulares para as faixas de frequência muito alta (*Very High Frequency* – VHF) e faixas de frequência ultra alta (*Ultra High Frequency* – UHF), sendo assim tem sua aplicação recomendada para este projeto. Nesse modelo, os caminhos de propagação são armazenados com suas respectivas informações de horário e direção, de forma que as contribuições possam ser somadas e assim se possa chegar à resultante (REMCOM INC, 2017b).

Outra característica do modelo é a possibilidade de se utilizar vários padrões de antena, inclusive antenas omnidirecionais que são as mais indicadas para os dispositivos de pequeno porte e baixo custo como os utilizados neste projeto. Nos cálculos, esse modelo considera as características dos materiais e utiliza os índices de reflexão quando os raios interagem com as superfícies. O modelo pode tratar múltiplas reflexões e difrações por meio da utilização de técnicas de ótica geométrica (REMCOM INC, 2017b). No Wireless Insite, o modelo Vertical Plane possui uma série de características e parâmetros que definem como o modelo funciona, listados a seguir:

- Número máximo de reflexões: 30.
- Transmissões máximas: permite apenas transmissões através de recursos de folhagem.
- Número máximo de difrações: 6.
- Ambientes: terreno irregular com recursos urbanos e folhagem opcionais.
- Terrenos: todos os tipos.
- Folhagem: ondas diretas, sem onda lateral.
- Faixa: validado a 20 km, possível 100 km com espaçamento de raio corretamente configurado.
- Alturas da antena: todos.
- Tipos de antena: todos.
- Rastreamento de raios: SBR para caminhos de raios com mais de 2 interações, método de *Eigenray* para caminhos de raios com menos de 3 interações.
- Frequência mínima: 50 MHz.
- Frequência máxima: depende da aplicação.
- Modelo terrestre: plano, 4/3 Terra ou real curvatura da Terra.

No modelo Vertical Plane também roda o algoritmo de *ray tracing* para traçar os caminhos entre transmissor e receptor. Assim, para caminhos de raios que possuem duas ou menos interações, o modelo utilizado é o método de Eigenray; caso o número de interações seja superior a duas, o método utilizado para rastreamento dos raios é o SBR – ambos são abordados no tópico 2.7.1 onde o método de *ray tracing* é detalhado (REMCOM INC, 2017b).

2.7.6 Modelo X3D

O modelo de simulação de propagação X3D foi desenvolvido para fornecer um modelo de propagação 3D altamente preciso e completo. Sua implementação o torna capaz de utilizar a capacidade de processamento das popularmente conhecidas como placas de vídeo (*Graphics Processing Unit* – GPU), e também utilizar os recursos de *multi-threading* ou processamento simultâneo, para aproveitar ao máximo os processadores *multi-core* ou de múltiplos núcleos de processamento. Essas características tornam esse método muito robusto, além de possibilitar que projetos de alta precisão sejam executados mais rapidamente em computadores de alta performance. Esse modelo de traçado de raios 3D também usa os algoritmos de correção do caminho exato (*Exact Path Correction* – EPC), em tradução livre,

da Remcom, para superar algumas das falhas dos algoritmos tradicionais. Sendo assim, os principais benefícios do modelo X3D são as acelerações alcançadas pela utilização de GPU e o processamento em paralelo, assim como a precisão alcançada por meio dos cálculos do *Exact Path Correction* (REMCOM INC, 2017b).

O modelo X3D do Wireless InSite também fornece os seguintes recursos:

- i. capacidade de simulação MIMO (*Multiple Input/Multiple Output*), que possibilita simulações com múltiplas antenas ou antenas inteligentes;
- ii. aceleração de geração do caminho adjacente (*Adjacent Path Generation – APG*) para conjuntos densos de receptores, que promove aceleração para conjuntos com grande número de receptores;
- iii. absorção atmosférica, que considera os padrões de absorção atmosférica nas simulações, tornando os resultados mais reais;
- iv. simulações de Monte Carlo com propriedades variáveis do material, potência de transmissão e frequência; e
- v. modelo de Penetração de Construção COST, modificado para propagação do exterior para o interior (REMCOM INC, 2017b).

Além das principais vantagens em relação aos demais métodos é importante ressaltar as características de parametrização do modelo X3D, sendo que as principais são:

- Aceleração com GPU e *multithreading*;
- Reflexões máximas: 30;
- Transmissões máximas: 8;
- Difrações máximas: 3;
- Ambientes: urbano e interior;
- Terreno: qualquer tipo;
- Urbano: todos;
- Folhagem: *Weissberger* ou dB/m;
- Interior: todos;
- Objetos: todos;
- Faixa: depende da aplicação;
- Alturas da antena: todos;
- Tipos de antena: todos;

- Rastreamento de raios: SBR com *Exact Path Correction*;
- Frequência mínima: 100 MHz;
- Frequência máxima: depende da aplicação, mas se estende para as frequências das ondas milimétricas (REMCOM INC, 2017b).

Como os demais modelos do Wireless Insite, o X3D também utiliza técnicas de *ray tracing*, sendo os algoritmos muito parecidos com os descritos no item 2.7.1, embora esse modelo possua algumas particularidades, que são explicadas a seguir:

- As difrações não são identificadas seguindo-se raios adjacentes oriundos de reflexões semelhantes e que tomam direções distintas. Em vez disso, quando uma reflexão ocorre perto o suficiente de uma borda, um conjunto discreto de pontos ao longo dessa borda é considerado, assim, o caminho refletido da faceta, e os caminhos difratados pelos pontos da borda são seguidos (REMCOM INC, 2017b).
- Após encontrar os caminhos pelo SBR, o X3D executa o algoritmo EPC. Diferente do discutido no item 2.7.2.1, onde os caminhos do raio interceptam o receptor utilizando uma tolerância definida por uma esfera, no EPC os pontos de interação reais (reflexões, difrações e transmissões) são ajustados para que o caminho atinja exatamente o centro do receptor. O EPC também valida os ângulos de difração e reflexão e garante que o caminho corrigido não é bloqueado por nenhuma interação com face de objeto. Dessa forma, os caminhos que falham nesta validação são descartados (REMCOM INC, 2017b).

2.8 Medição de intensidade do sinal de radiofrequência

O método de avaliação de desempenho de redes de radiofrequência que oferece o melhor resultado é sem dúvida o teste de campo. Isso ocorre porque se trata de uma avaliação prática, na qual os componentes da rede são testados em situações reais, sendo que obstáculos, interferências, falhas de equipamentos e qualquer outra forma de influências do ambiente são automaticamente considerados. Contra os testes de campo pesam os custos para sua realização, uma vez que toda a infraestrutura da rede deve ser instalada para execução dos testes, além de os resultados serem válidos apenas para o local específico onde o sistema foi testado (RAPPAPORT, 1996; GARCIA, 2006).

Por outro lado, essas características fazem dos testes de campo uma boa ferramenta de validação de projetos de radiofrequência, ao invés de uma ferramenta de desenvolvimento. Isso porque após o desenvolvimento e a implantação de uma rede de radiofrequência, é extremamente necessário realizar a validação de seu funcionamento. Assim, após a infraestrutura da rede planejada e simulada, ser instalada e estar em operação, a melhor forma de se validar, é realizando medições dos sinais a fim de comparar com os resultados dos simuladores.

Mas porque é importante essa validação? Simples, com a validação do funcionamento da rede é possível tomar medidas que melhorem seu desempenho, como remanejamento de ERB, variação de potência de sinal, alteração de canais, substituição de antenas, redução ou aumento do número de clientes conectados, enfim, é um teste prático que permite certificar que a rede irá atender de forma satisfatória a todos os requisitos que foram pré-determinados em projeto.

O principal parâmetro a ser medido em teste de campo é, sem dúvidas, a intensidade do sinal recebido, o RSSI (*Receive Signal Strength Indicator*). Esse parâmetro é o indicador de força do sinal no receptor, que representa o quão forte o sinal transmitido pelo transmissor chegou ao receptor após sofrer todas as perdas do caminho. Ele é extremamente importante porque depende do correto funcionamento da comunicação entre transmissor e receptor. O valor do RSSI não deve nunca atingir a sensibilidade do receptor, pois caso isso ocorra, a comunicação não irá funcionar (RAPPAPORT, 1996; SKLAR, 2001).

Os testes de campo podem ser mais complexos, dependendo, principalmente, do tipo de sistema que se está testando. Por exemplo, para sistemas de telefonia celular, é comum nos testes serem procurados sinais de interferência na faixa de frequência de operação, principalmente para identificar alguma frequência irregular. Durante os testes são realizadas medições do espectro de radiofrequência da região, a fim de identificar alguma irregularidade. Para isso, existem equipamentos específicos que permitem variar a faixa de frequência recebida, a fim de fazer a varredura no espectro (RAPPAPORT, 1996; SKLAR, 2001; WILLIS, 2007).

Como neste trabalho os sistemas de radiofrequência estudados são pertencentes às frequências livres da banda ISM, é comum existir interferências e ruídos de fundo, porém, dificilmente alguma ação pode ser tomada para evitá-los, uma vez que não há proibição de

uso dessas frequências, desde que respeitem as regulamentações da ANATEL. Assim, a imunidade a interferências é uma característica altamente desejável para essas tecnologias, inclusive através do uso de modulações que contribuam para essa imunidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Selecionar uma determinada tecnologia de comunicação para ser avaliada como solução para um determinado projeto pode ser uma tarefa difícil, principalmente se todos os passos e materiais necessários não estiverem bem definidos. Portanto, na sequência os passos da metodologia serão detalhados, assim como os materiais utilizados na execução do projeto.

3.1 Caracterização do perímetro urbano da cidade de Ouro Preto - MG

Como apresentado anteriormente, o trabalho consiste em propor o uso de uma rede de IoT em áreas de risco reais, realizando um estudo de caso na cidade de Ouro Preto – MG, que apresenta grandes desafios para a implementação de um sistema de comunicação para monitoramento e alerta de emergências. Na sequência, a área em questão será caracterizada de forma a permitir que o leitor entenda as dificuldades encontradas durante o projeto, e assim tenha a compreensão do trabalho.

A cidade mineira de Ouro Preto está situada na região central do estado a uma distância de 90 km da capital Belo Horizonte. Geograficamente localizada em um vale entre duas grandes serras, sendo a Serra de Ouro Preto ao norte e a Serra do Itacolomi ao sul. A cidade tem sua origem no ciclo do ouro, ainda no período colonial brasileiro, tendo sido fundada em 1698 da aglomeração de diversos arraiais surgidos da mineração do precioso metal. O apogeu ocorreu no século XVII, quando se tornou o segundo maior centro populacional da América Latina e capital da Província de Minas Gerais (FONTES, 2011).

Desde o período colonial a cidade sofre com a ocupação desordenada de suas encostas, primeiramente estimulado pela corrida do ouro e, a partir de meados do século passado, pelo reaquecimento da economia com a exploração das minas de ferro e bauxita e com a expansão do ensino técnico e superior (CASTRO, 2006). Nem mesmo o recebimento do título de Patrimônio Histórico e Cultural da Humanidade da UNESCO foi capaz de desacelerar este processo, pois a cidade continua com uma ocupação do solo sem controle e que faz as áreas de risco aumentarem conforme a população cresce.

Juntamente com o processo de ocupação desordenado, o histórico de alterações geotécnicas deixado pelas antigas minas de ouro, como alteração dos escoamentos das chuvas, grandes túneis e galerias e áreas com material não compactado, colaboram para o aumento do risco de desmoronamento de massas em diversas regiões da cidade. Somando-se

a isso os altos índices anuais médios de pluviometria que normalmente ocorrem na cidade e que possuem maior incidência no período chuvoso (GUIMARÃES, REIS e LANDAU, 2010), cria-se uma atmosfera propícia a acidentes envolvendo deslocamento de massas, como o ocorrido em dezembro de 2011 e que casou a morte de duas pessoas e o soterramento parcial da rodoviária e da principal via de acesso à cidade histórica (MAGALHÃES e FERREIRA NETO, 2014). Um trabalho geotécnico realizado pelo Departamento de Geotecnia da UFOP mapeou as áreas de risco da cidade de Ouro Preto, classificando-as como de risco baixo, médio, alto e muito alto, como pode ser observado na Figura 14 (FONTES, 2011).

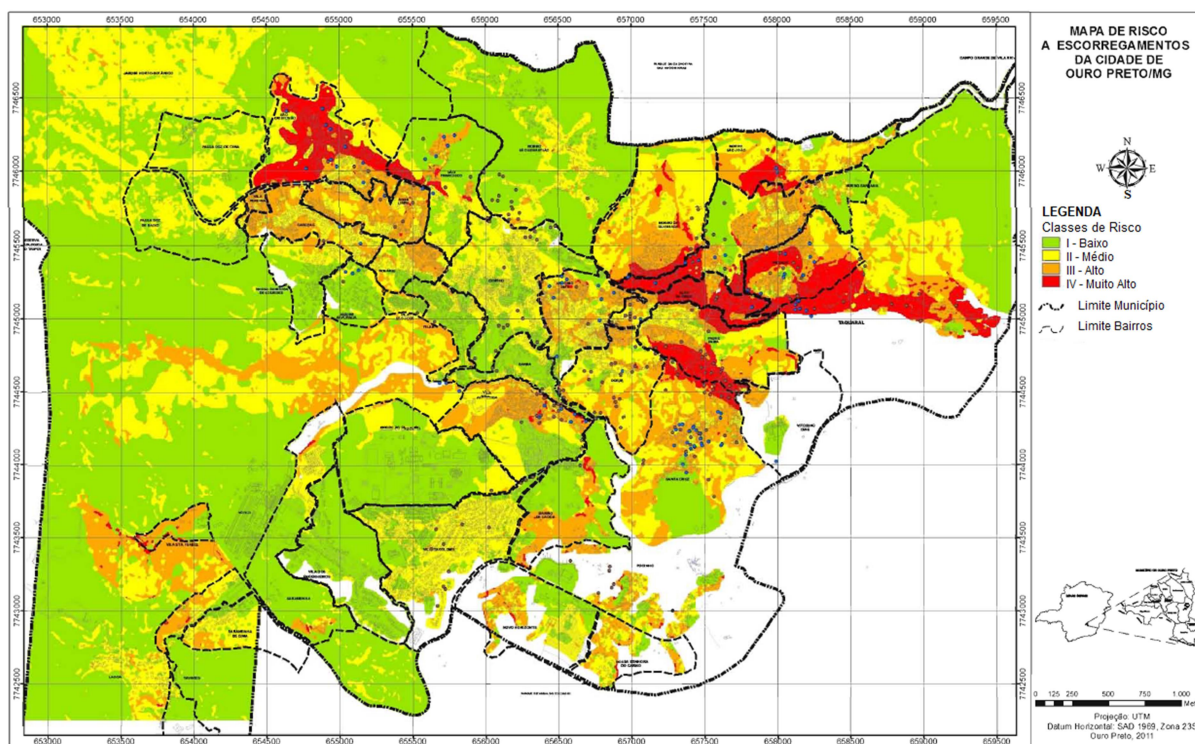


Figura 14 – Mapa de Perigo a Escorregamentos da Cidade de Ouro Preto-MG

Fonte: Adaptado de FONTES, 2011.

Como um agravante à condição de risco apresentada na cidade de Ouro Preto devido às condições geotécnicas apresentadas, a cidade se encontra a jusante de uma barragem de rejeitos de bauxita. Essa barragem, chamada de Barragem Marzagão e pertencente à Hindalco do Brasil Indústria e Comércio de Alumina Ltda, possui um reservatório com 3,8 milhões de metros cúbicos de rejeito do processo de beneficiamento de bauxita, conhecido como lama vermelha. A barragem ainda possui um barramento com 58 metros de altura e um volume do maciço de 220.000 metros cúbicos, sendo pertencente à bacia hidrográfica do Rio Doce (DNPM, 2018).

O mapeamento das áreas de risco, juntamente com a região do vale a jusante da barragem do Marzagão, servem de base para indicar as áreas onde a rede de comunicação deve ter cobertura, de forma a viabilizar o monitoramento online de informações medidas por sensores de monitoramento das áreas de risco, como os inclinômetros, e também possibilitar a instalação de um sistema de sirenes e outros dispositivos de alerta de emergência para essas áreas de risco, podendo ser utilizados pela Defesa Civil do município como ferramenta de apoio.

3.2 Levantamento de dados utilizados no projeto

Durante o desenvolvimento deste trabalho, uma série de dados de fontes diferentes precisaram ser levantados, de forma a possibilitar o estudo em questão, sendo que neste tópico serão elucidados os dados utilizados, assim como suas fontes.

3.2.1 DEM da USGS para região de Ouro Preto

A escolha do DEM da USGS se deu pela grande abrangência global, sendo que a área de estudo do trabalho é perfeitamente contemplada pelos arquivos disponibilizados pela USGS na rede mundial de computadores. Outro fato importante para a escolha do DEM é a resolução de 1 arco de segundo, que corresponde a aproximadamente 30 metros, sendo assim satisfatório para o trabalho em questão, levando-se em consideração o alto custo para mapeamento topográfico da região com uma resolução menor.

O acesso aos dados DEM é livre para download no site da USGS mediante um cadastro prévio. Logo, foi baixado do portal Earth Explorer o arquivo de nome SRTM1S21W044V3 no formato GeoTIFF, que corresponde à menor área onde está compreendida a região de estudo – neste caso a área urbana da cidade de Ouro Preto.

Esse arquivo precisou ser reduzido utilizando um software de uso livre chamado QGIS da empresa Free Software Foundation, Inc. Com a redução do tamanho do arquivo, passando a contemplar apenas a região de estudo, houve uma melhoria de desempenho ao manipular o arquivo no software de simulação de propagação de radiofrequência utilizado no trabalho.

3.2.2 Folhas de dados dos microchips de radiofrequência

Para a realização das comparações entre as tecnologias candidatas, é necessário utilizar as especificações técnicas contidas nas folhas de dados dos microchips de rádio das diversas tecnologias. Sendo assim, por meio do site dos fabricantes dos microchips, os documentos referentes aos microchips foram baixados, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Lista de folhas de dados utilizadas

Modelo	Fabricante	Tecnologia	Tipo	Fonte
SX1272/73	Semtech	LoRaWAN	Device	(SEMTECH, 2015)
XBee 900 HP	Digi	Zigbee	Device	(DIGI INTERNATIONAL INC., 2017)
ATA8520E	Atmel	Sigfox	Device	(ATMEL, 2016)
RN2903	Microchip	LoRaWAN	Device	(MICROCHIP, 2017)
SARA-N2	Ublox	NB-IoT	Device	(U-BLOX, 2017)
NANO-S100	Ublox	Ingenu (RPMA)	Device	(U-BLOX, 2017b)
MTCDTIP-H5-220L	Multi- Tech	LoRaWAN	Gateway	(MULTI-TECH SYSTEMS INC., 2017)
Dragino Shield LoRa	Dragino	LoRaWAN	Device	(DRAGINO, 2018)

3.3 Metodologia

Este trabalho parte da definição das premissas do projeto, sendo esse passo o mais importante para se evitar uma busca desordenada por informações e tornar o trabalho mais dispendioso do que deve ser. Na sequência, será realizado o estudo de possíveis tecnologias LPWAN compatíveis com o problema e com as premissas. Depois de selecionadas as tecnologias, elas serão comparadas com base nos requisitos definidos. Dessa comparação será selecionada a tecnologia mais apta à solução do problema. Assim, serão realizadas simulações de propagação de radiofrequência na área de interesse, para verificar a viabilidade da implantação do projeto. Validada a implantação do projeto, o estudo de caso será executado,

instalando em campo os equipamentos da rede. Por fim, para validar o projeto será realizada a comparação dos resultados de cobertura de sinal em campo com as simulações realizadas.

3.3.1 Definir os requisitos da rede

Como mencionado anteriormente, a definição dos requisitos da rede de comunicação a ser projetada é a principal etapa do projeto. Uma correta definição desses parâmetros pode evitar desperdício de tempo com retrabalho, e, como consequência mais crítica, o desperdício de recursos, inclusive financeiros.

Dessa forma, é necessária uma extensa pesquisa sobre a região onde o projeto será executado, a fim de definir requisitos baseados na topologia do terreno, disponibilidade de infraestrutura física e energia elétrica para instalação de estações rádio base e dos dispositivos finais. As condições de disponibilidade tecnológica da região também são importantes, por exemplo, a existência de cobertura de telefonia celular e de serviços de tráfego de dados. A existência de infraestrutura de *backhaul* para as estações rádio base, seja via rede fixa ou móvel, e quais os protocolos de comunicação disponíveis.

Outro ponto a ser observado são as condições financeiras para implantação do projeto, por exemplo, as redes que utilizam espectro de frequência licenciado são naturalmente mais onerosas, embora apresentem algumas vantagens como a menor probabilidade de interferências. A área de abrangência e a escalabilidade que uma determinada tecnologia pode alcançar é outro fator crítico do projeto, uma vez que pode influenciar diretamente no número de estações rádio base, o que implica no custo.

A sensibilidade dos receptores de rádio deve ser considerada, uma vez que quanto menos sensível for o receptor, a tendência é de um maior número de estações rádio base, o que novamente influencia nos custos de implantação e operação da rede. Lembrando que a legislação limita a potência dos transmissores assim como o ganho das antenas, logo, essas informações devem ser consideradas no projeto.

Em resumo, esses são os principais tópicos a serem avaliados para definir os requisitos básicos da rede, de forma que, se determinado parâmetro for mandatório, pode haver, inclusive, exclusão de determinada tecnologia, por não atender aos requisitos mínimos do projeto.

3.3.2 Comparar as tecnologias

A comparação entre as tecnologias candidatas é um importante passo do trabalho, porque permite eliminar nesta etapa aquelas menos adaptadas aos requisitos definidos como primordiais ao sistema. Desse modo, essa análise ocorre com base na literatura técnica de cada uma das tecnologias e nas informações contidas nas folhas de dados dos microchips de rádios selecionados, conforme disponibilidade no mercado internacional.

O objetivo é construir uma tabela na qual os requisitos serão listados e, por meio dos dados informados nas folhas de dados e na literatura técnica, deve-se preencher a tabela com as informações pertinentes de cada tecnologia. Assim, a partir de uma solução ideal pré-definida a partir dos requisitos, deve-se comparar cada uma das tecnologias e estabelecer notas conforme a aderência à solução ideal. As notas serão definidas conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Definição das notas para avaliação dos requisitos

Notas	Descrição
0	Nenhuma aderência ao requisito
25	Baixa aderência ao requisito
50	Média aderência ao requisito
75	Alta aderência ao requisito
100	Totalmente aderente ao requisito

Após a construção da tabela e avaliação de cada um dos requisitos, será criado um gráfico de comparação das tecnologias. Utilizando o gráfico, serão escolhidas as tecnologias que mais se adaptam aos requisitos e que serão avaliadas na próxima etapa.

3.3.3 Simular propagação de radiofrequência

O objetivo da simulação de propagação de sinais de radiofrequência é predizer se os equipamentos de rádio disponíveis no mercado para as tecnologias avaliadas atendem às necessidades do projeto. Essa etapa é primordial para se evitar custos desnecessários com a

compra de equipamentos que não possuem as condições técnicas de serem solução do problema.

Para se realizar a simulação, é preciso realizar o planejamento da rede que se pretende simular. Nesse planejamento devem ser definidas questões como a área de interesse onde a rede deve ter cobertura, o número de estações rádio base para cobrir essa área e a localização dos dispositivos finais da rede. Enfim, esse planejamento está relacionado a como deve ser realizada a simulação, de forma que a mesma arquitetura desejada em campo seja implementada no simulador para aumentar a precisão dos resultados de predição.

Para o trabalho foram selecionados os modelos, de acordo com as características que atendiam às seguintes premissas do projeto:

- Aplicabilidade do modelo em grandes terrenos – as áreas de risco são grandes terrenos com raio de vários de quilômetros;
- Aplicabilidade do modelo em frequências UHF – as tecnologias candidatas são utilizadoras do espectro não licenciado ISM de 915 MHz e 2,4 MHz.

Sendo assim, foram selecionados os modelos: Free Space, Vertical Plane, Hata e X3D. O Free Space é o modelo mais simples, o que torna seu custo computacional baixo, devido a baixa complexidade dos cálculos, porém, em contrapartida pode apresentar resultados menos precisos. O Vertical Plane é um modelo mais completo e que possui um custo benefício intermediário, exige um custo computacional maior e pode entregar um resultado mais fiel à realidade. O Hata por sua vez, trata-se de um modelo empírico consagrado com bons resultados para a faixa de frequência que se propõe, possuindo assim um bom custo benefício. Por fim, o X3D é o modelo mais complexo, realiza muitos cálculos e analisa diversas possibilidades de caminhos, porém exige um poder computacional grande.

Após a conclusão do planejamento e seleção dos modelos, na etapa de simulação é realizada a parametrização do cenário da rede que se objetiva construir no software de predição de RF, no caso o Wireless Insite, cuja tela inicial é apresentada na Figura 15.

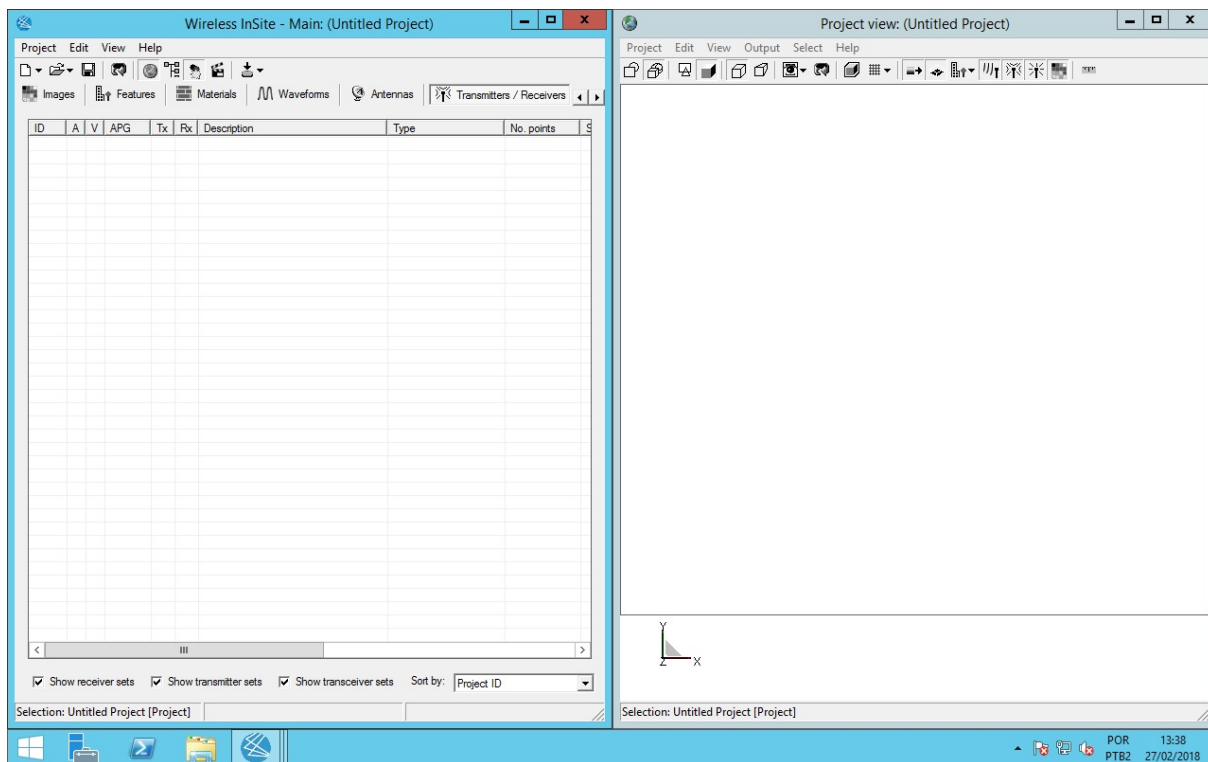


Figura 15 – Telas iniciais do software de simulação de propagação Wireless Insite 3.0.2.3.

A parametrização consiste em uma sequência de etapas de configuração a serem realizadas no software, definidas a seguir:

1. Criação de um novo projeto de simulação no Wireless Insite;
2. Importação do arquivo DEM referente ao terreno da cidade de Ouro Preto, baixado no site da USGS e com recorte realizado no software QGIS;
3. Criação da *Waveform* na frequência de operação da tecnologia selecionada;
4. Criação da antena a ser utilizada no projeto de acordo com as especificações dos dispositivos de rádio da tecnologia selecionada;
5. Criação dos transmissores nos locais pré-definidos no planejamento e com os parâmetros da tecnologia selecionada;
6. Criação dos receptores conforme pré-definido no planejamento e com os parâmetros da tecnologia selecionada;
7. Criação das áreas de estudo (*Study Areas*) para cada um dos modelos que serão utilizados para a simulação, sendo Free Space, Hata, Vertical Plane e X3D;
8. Executar a simulação para cada um dos modelos;
9. Avaliar os resultados de cada um dos modelos, gerando tabelas e mapas de calor com os valores de PL (*path loss*) para a região de interesse;

10. Avaliar se os valores de PL gerados na simulação estão dentro dos parâmetros de sensibilidade dos rádios da tecnologia selecionada;
11. Calcular o *link budget* para os dez pontos de interesse utilizando os valores de PL gerados pelos modelos Hata e Vertical Plane e comparar o pior caso com os valores de sensibilidade do receptor da tecnologia selecionada;
12. Avaliar os resultados das simulações e as especificações técnicas da tecnologia selecionada, de forma verificar se a mesma está apta a ser solução para o problema.

Após a conclusão dos passos da simulação, caso nenhuma tecnologia esteja apta a ser solução do problema, significa que os requisitos definidos no item 3.3.1 não foram corretamente elaborados e deverão ser revistos ou que a seleção das tecnologias candidatas precisa ser refeita.

3.3.4 Implantar a rede comunicação e realizar medições

A implantação do projeto piloto é a etapa que valida todo o estudo realizado, uma vez que possibilita comparar os resultados obtidos no ambiente de simulação com os resultados reais, medidos no local onde a rede foi projetada para ser instalada. Assim, essa etapa permite concluir se a metodologia proposta é eficiente ou não, ou mesmo identificar melhorias para torná-la mais confiável.

Para implantação da rede de comunicação é necessário realizar as especificações dos componentes que serão utilizados. Devido a questões orçamentárias, o projeto piloto consiste na realização do mínimo possível, ou seja, a rede não terá dezenas ou centenas de dispositivos conectados, pelo contrário, os testes de medição de sinal serão realizados com apenas alguns dispositivos finais. Esse passo permite avaliar se o projeto de predição e propagação de RF está coerente com os valores medidos em campo, porém, assume-se que os gateways são capazes de gerenciar milhares de dispositivos conforme abordado na literatura. O prejuízo dessa estratégia é que não é possível verificar o impacto de milhares de dispositivos conectados ao mesmo gateway. Experimentos realizados anteriormente indicam que o número de pacotes recebidos de cada nó cai exponencialmente com o aumento do número de dispositivos conectados (ADELANTADO et al., 2016a).

Os dispositivos serão instalados em dez pontos para medição da intensidade de sinal RSSI. Desses pontos, quatro possuem visada direta (*Line of Sight* – LOS) e quatro não

possueam visada direta (*Non Line of Sight* – NLOS), sendo todos instalados em ambiente externo (*Outdoor*). Outros dois pontos em ambiente interno (*Indoor*) também foram medidos. Os pontos estão localizados em diferentes distâncias, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Pontos de medição de RSSI.

Localização	Visada	Distância (m)	Ambiente
Museu	LOS	286	<i>Outdoor</i>
São José	LOS	450	<i>Outdoor</i>
Lab. Química	LOS	519	<i>Outdoor</i>
S. F. Paula	LOS	1638	<i>Outdoor</i>
Getúlio Vargas	NLOS	486	<i>Outdoor</i>
Pocinho	NLOS	2863	<i>Indoor</i>
S. Francisco	NLOS	387	<i>Outdoor</i>
Santa Casa	NLOS	320	<i>Outdoor</i>
Ponte Seca	NLOS	590	<i>Outdoor</i>
ITV	NLOS	1487	<i>Indoor</i>

Padronizando as medições, para cada ponto de leitura o transmissor enviará 1422 mensagens de 34 bytes ao gateway, totalizando um intervalo de 1:30 horas. Estes valores foram definidos de forma que o número de leituras fosse representativo para os cálculos a serem realizados, e o tempo gasto para cada ponto permitisse a realização das medições em todos os pontos de interesse. Dessa forma, das mensagens transmitidas, é sabido que apenas um percentual será recebido pelo gateway e, conseqüentemente, aos servidores. Assim, será calculado um parâmetro importante em relação à qualidade do link de rede: a taxa de pacotes recebidos (*Packet Reception Ratio* – PRR). Esse parâmetro representa o percentual das mensagens enviadas pelo transmissor que estão sendo efetivamente recebidas pelo receptor. Dessa forma, o PRR será calculado por meio do total de pacotes recebidos pelo gateway em relação ao número de pacotes enviados pelo dispositivo. Então, com as informações dos pacotes recebidos pelo servidor, será calculada a média linear das leituras de RSSI.

É importante ressaltar que, na prática, como se trata de um terreno aberto, pode haver interferências não previstas pelos modelos, como construções, árvores, veículos, outros sinais de RF, etc., além de falhas de fidelidade do DEM ao relevo do terreno da cidade de Ouro Preto. Porém, essa etapa de medição também é importante por possibilitar a medição de

parâmetros práticos que podem ajudar a calibrar melhor os modelos utilizados nas simulações. Sendo assim, mesmo sendo um número baixo de medições, elas podem colaborar significativamente com futuros trabalhos, que pretendam expandir a rede ou mesmo aumentar a densidade de dispositivos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com base na metodologia proposta no item 3.3 do capítulo 3, inclusive com a mesma estrutura de subtópicos, com o intuito de facilitar a leitura do trabalho. Além disso, as discussões a respeito dos resultados serão realizadas em conjunto com a apresentação deles.

4.1 Definição dos requisitos da rede

Baseado no estado da arte, os requisitos do sistema de comunicação foram definidos. Além disso, definiu-se que o meio de tráfego das informações será o espectro não licenciado, no caso a banda ISM, uma vez que o custo de implantação e licenciamento de qualquer sistema licenciado inviabilizaria o projeto piloto. Importante frisar que para outras aplicações onde o custo de licenciamento não seja um problema, espectros licenciados podem e devem ser considerados.

Outro fator predominante é a característica das informações que devem ser trafegadas na rede. Como se tratam de leituras de sinais elétricos de sensores e comandos para atuadores, o tamanho da informação é pequeno, da ordem de bytes. Logo, uma rede com baixa taxa de dados e de alto alcance é uma boa opção, permitindo trabalhar com as LPWAN na frequência de 915 MHz. Dessa forma, complementando os requisitos críticos da rede, a Tabela 7 foi criada, descrevendo todos os requisitos a serem utilizados na comparação tecnológica.

Tabela 7 – Requisitos principais da rede de comunicação.

Característica	Justificativa
<i>Link Budget</i>	Indica o quanto de perda é suportada em um enlace entre transmissor e receptor, assim, quanto maior o <i>link budget</i> , melhor será o alcance da rede.
Longo alcance	Capacidade do sinal alcançar grandes áreas, diretamente associado ao <i>link budget</i> .
Baixo consumo de energia	Como se trata de monitoramento de áreas onde pode não haver energia elétrica disponível, o baixo consumo é fundamental para alimentação por baterias ou pequenos painéis solares.
Frequência de operação	Para reduzir os custos de implantação do projeto é necessário que a frequência seja livre de licenciamento na ANATEL (banda ISM).
Protocolo de comunicação	Integração necessária com rede ethernet, por meio dos protocolos TCP/IP ou UDP/IP.
Sensibilidade de receptores	Alta sensibilidade devido à necessidade de comunicação sem visada direta em áreas de relevo acidentado, inclusive ambiente <i>indoor</i> .
Escalabilidade	Alta escalabilidade da rede, devido ao alto número de sensores a serem interligados.
Criptografia	Necessidade de rede criptografada para evitar roubo de dados, alteração de informações ou acesso por pessoas não autorizadas. Recomendado AES 128 bits.
Interface de dados	Ser compatível com as interfaces de dados mais usuais como UART, SPI, I2C, de forma a possibilitar a integração com microcontroladores.
Número de gateways e repetidores	O número de gateways e repetidores deverá ser o menor possível, reduzindo assim os custos com instalação e manutenção.
Modelo de negócio	O modelo de negócio é importante, porque trata-se de como a tecnologia pode ser utilizada pelo cliente final. No caso deste projeto, é importante que o uso seja livre, sem custos de assinatura, podendo o cliente apenas adquirir os equipamentos.

A definição dos requisitos teve um importante impacto na lista de tecnologias candidatas, sendo assim, para a próxima etapa que envolve a comparação de tecnologias baseadas nesses parâmetros, serão avaliadas as tecnologias LoRaWAN, Sigfox, Ingenu, NB-IoT e Digi XBee Pro.

4.2 Comparação tecnológica

Dentro das especificações levantadas existe uma série de tecnologias concorrentes, que foram comparadas utilizando os requisitos listados anteriormente com uma referencia, ou solução ideal, sendo que para essa solução ideal foram definidos valores ótimos para cada parâmetro. À solução ideal foram comparados os parâmetros encontrados em folha de dados dos microchips de rádios das tecnologias LoRaWAN, Digi XBee, Sigfox, Ingenu e NB-IoT. Assim, a Tabela 8 apresenta as informações das folhas de dados dos microchips selecionados para cada tecnologia. Com base Tabela 5, que estipula valores de pontuação para cada parâmetro, foi obtido o gráfico da Figura 16, sendo que cada uma das tecnologias foi pontuada para cada parâmetro em comparação à solução ideal.

Tabela 8 – Comparação tecnológica dos requisitos.

Parâmetros	Solução ideal	LoRaWAN	Digi	Sigfox	Ingenu	NB-IoT
		SX1272/73	Xbee PRO 900HP	ATA8520E	NANO S100	SARA-N280
Link Budget	Maior melhor	Uplink: 157 dB Downlink: 177 dB	ND	Uplink: 149 dB Downlink: 164 dB	Uplink: 180 dB Downlink: 185 dB	Uplink: 155 dB Downlink: 164 dB
Alcance	Mínimo: Até 3 Km em área urbana.	Urbano: Até 5 Km Rural: Acima de 15 Km	Urbano: 15,5 km (com visada e antena de alto ganho)	Não disponível no datasheet.	Urbano: 6 km Rural: 12 km	20 dB superior ao GSM padrão
Consumo de energia	Quanto menor melhor Máximo: 250 mA	TX: 124,4 mA RX: 11,2 mA Idle: 3,1 mA Deepsleep: 1,4 µA	TX: 215 mA RX: 29 mA Sleep: 2,5 µA	TX: 16,7mA RX: 10,5mA Sleep: 5nA (máximo 600nA)	TX: 245 mA RX: 85 mA Sleep: 15 mA	TX: 220 mA (máximo) RX: 46 mA Modo ativo: 6 mA Modo sleep: 3 uA
Frequência de operação	Banda ISM	900 MHz	900 MHz	900 MHz	2400 MHz	Banda 28 Uplink: 703 a 748 MHz Downlink: 758 a 803 MHz
Protocolo de comunicação*	Gateway: TCP/IP	Gateway: TCP/IP	Gateway: UDP/TCP, DHCP	Gateway: TCP/IP	Gateway: TCP/IP	TCP/IP
Sensibilidade de receptores	Quanto maior melhor Mínimo: -120 dB	-146 dBm	-101 dBm – 200 kbps, -110 dBm – 10 kbps	-121,5 dBm	-133 dBm	-135 dBm
Escalabilidade	Quanto maior melhor Mínimo: 1000 dispositivos/gateway	Até 10000 dispositivos	Até 65000 dispositivos por coordenador de rede	Milhares de dispositivos em um único gateway.	535117 mensagens/hora.	Até 52500 dispositivos/gateway
Criptografia	AES 128 bits	AES 128 bits	AES 128 bits	AES 128 bits	AES 128 bits (no dispositivo)	ND
Interface de dados	UART, SPI, I2C	UART	UART, SPI	SPI	UART, SPI, USB2.0, GPIO	UART, I2C, GPIO
Número de ERB	Quanto menor melhor Ideal: 1 ERB Aceitável: 2 ERB	2 ERB	1 ERB e vários dispositivos repetidores.	2 ERB	2 ERB	2 ERB
Modelo de negócio	Somente compra de equipamentos, sem assinatura.	Livre, sem assinatura para serviços básicos.	Livre, sem assinatura para serviços básicos.	Necessita assinatura anual por dispositivo conectado.	Necessita assinatura anual por dispositivo conectado.	Necessita assinatura anual por dispositivo conectado.
FONTE		(SEMTECH, 2015)	(DIGI INTERNATIONAL INC., 2017)	(ATMEL, 2016; WND, 2017)	(INGENU, 2015; U-BLOX, 2017b)	(SCHLIENZ; RADDINO, 2016; U-BLOX, 2017a)

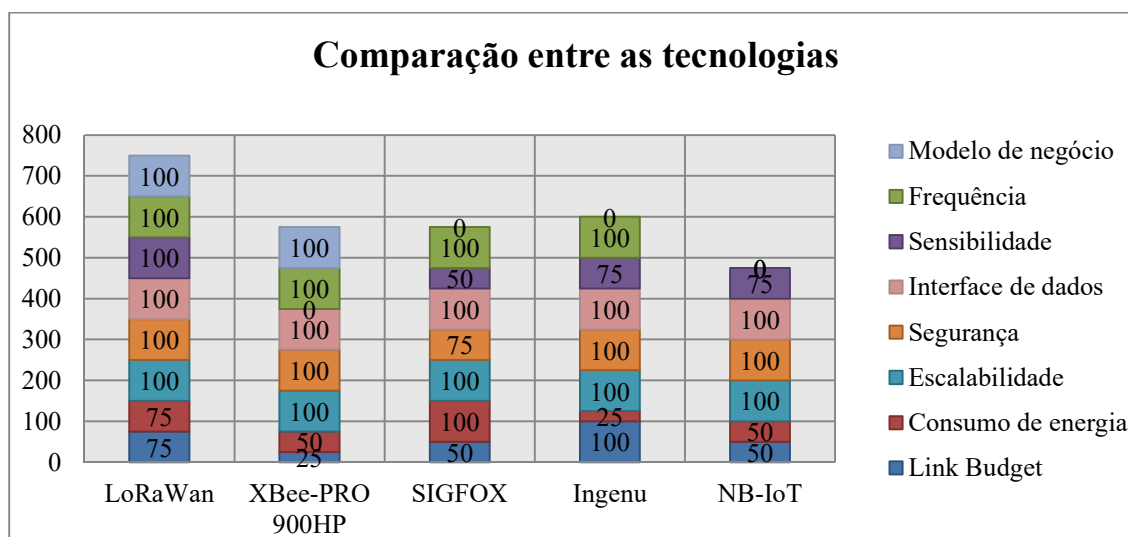


Figura 16 – Gráfico de atribuição de pontuação às tecnologias

Entre as tecnologias avaliadas, o rádio Digi XBee PRO 900HP foi eliminado na comparação de parâmetros, isso por obter nota zero no parâmetro Sensibilidade de Recepção, que no melhor caso chega a -110 dBm, sendo que a solução ideal exige um mínimo de -120 dBm. Outro motivo para a desclassificação do rádio Digi XBee PRO 900HP é que ele necessita do uso de antenas direcionais de alto ganho para atingir o *link budget* máximo, de forma que com antenas omnidirecionais seu alcance diminui, não atendendo assim à aplicação, ou sendo necessário inserir repetidores na rede, o que aumentaria os custos.

A tecnologia NB-IoT também foi desclassificada, uma vez que o NB-IoT utiliza espectro licenciado, a banda 28 conforme apresentado na Tabela 8, sendo assim, para uso dos rádios dessa tecnologia é necessário o licenciamento na ANATEL. Como no Brasil o espectro de frequência da banda 28 pertence a empresas de telefonia celular, a utilização de NB-IoT se dá apenas por prestação de serviços dessas operadoras, o que ainda não começou no país, ou por meio de liberação de uso por parte delas, o que torna a solução de alto custo. Conforme premissa do projeto, a tecnologia deve apresentar isenção de custo de licenciamento para implementação do projeto piloto, logo a NB-IoT foi desclassificada por esse motivo.

Ainda nesta etapa de comparação, outra tecnologia foi eliminada da concorrência, por apresentar um modelo de negócio não interessante para o projeto piloto, trata-se da Sigfox. A Sigfox trabalha com um modelo de negócios em que ela presta o serviço de rede para o cliente, assim ela está construindo uma grande rede mundial por meio de parcerias com outras empresas e o cliente final não precisa construir uma infraestrutura, e sim contratar um serviço.

Dessa forma, a Sigfox possui um preço de serviço por dispositivo conectado a sua rede, sendo que o cliente final deve se preocupar apenas em comprar o dispositivo final e avaliar se na área que deseja instalá-lo existe a cobertura Sigfox. Como o projeto piloto é na cidade interiorana de Ouro-MG e a Sigfox ainda não possui cobertura nessa cidade, mesmo atendendo a boa parte dos requisitos, essa tecnologia foi eliminada. Apesar de existir a possibilidade de implantação de uma infraestrutura privada, o caráter de projeto piloto não confere competitividade a esse tipo de solução, porém capacita a Sigfox a ser uma excelente alternativa a outros projetos, principalmente pelos bons atributos apresentados na comparação de requisitos.

Pelo mesmo motivo apresentado em relação à Sigfox, a tecnologia RPMA da empresa Ingenu também foi eliminada da disputa, por também possuir um modelo de negócio que não é interessante para o projeto piloto em questão. A Ingenu também presta um serviço de enlace de dados a seus clientes, sendo que ela também não possui infraestrutura instalada na cidade de Ouro Preto, na verdade sequer tem infraestrutura no Brasil, sendo que em março de 2017 foi firmada uma parceria com a empresa brasileira Datora Mobile para implantação da rede no país até o final de 2018. Como ainda não há nenhuma informação pública a respeito do status dessa rede e de como a empresa prestará o serviço no Brasil, essa tecnologia que apresentou os melhores resultados em relação aos demais requisitos avaliados será eliminada da disputa, por não possuir condições de implementação do projeto piloto.

Assim, para a etapa seguinte do projeto, na qual ocorrerá a simulação de predição e propagação de radiofrequência, apenas a tecnologia LoRaWAN será avaliada, isso porque, além de atender a todos os requisitos avaliados, a tecnologia possui um modelo de negócio livre, sendo que qualquer pessoa pode comprar os equipamentos para montar uma rede privada, além de poder escolher entre várias plataformas de IoT disponíveis na internet, inclusive gratuitas. Entre elas está a TTN, plataforma que será utilizada como camada de rede no projeto piloto deste trabalho. Como camada de aplicação, será utilizada uma segunda plataforma, a Cayenne¹⁶, também gratuita e que permite, além de criar interface gráfica para apresentar as informações enviadas pelo dispositivo, o envio de comando e o armazenamento de dados históricos.

¹⁶ A Cayenne é a camada de aplicação, trata-se de uma plataforma online que faz a interface entre os usuários dos serviços, sejam eles pessoas ou outros softwares, e os dados da camada de rede, de forma que o caminho entre a informação oriunda do dispositivo de campo e os usuários seja transparente.

É muito importante frisar que a seleção da tecnologia LoRaWAN para continuidade do projeto não significa que ela seja melhor que as demais. Para este estudo de caso específico, no qual o modelo de negócio livre e o uso de espectro não licenciado são premissas, a tecnologia LoRaWAN é a mais adaptada entre as tecnologias avaliadas. Assim, em uma aplicação desta metodologia em outro estudo de caso, pode-se obter um resultado diferente, desde que os valores ideais assumidos para os requisitos sejam outros.

4.3 Simulação de propagação de radiofrequência

No planejamento da rede foram definidos os pontos de interesse para localização dos dispositivos. O critério foi definir a localização conforme o mapeamento dos sensores inclinômetros que monitoram as condições das encostas da cidade de Ouro Preto, além de outros pontos estratégicos para validação da comunicação por meio de medição de RSSI. Além desses pontos, foi definida uma malha de receptores com espaçamento de 30 m, a mesma resolução do DEM, de modo a cobrir toda a área urbana da cidade de Ouro Preto, como apresentado na Figura 17.

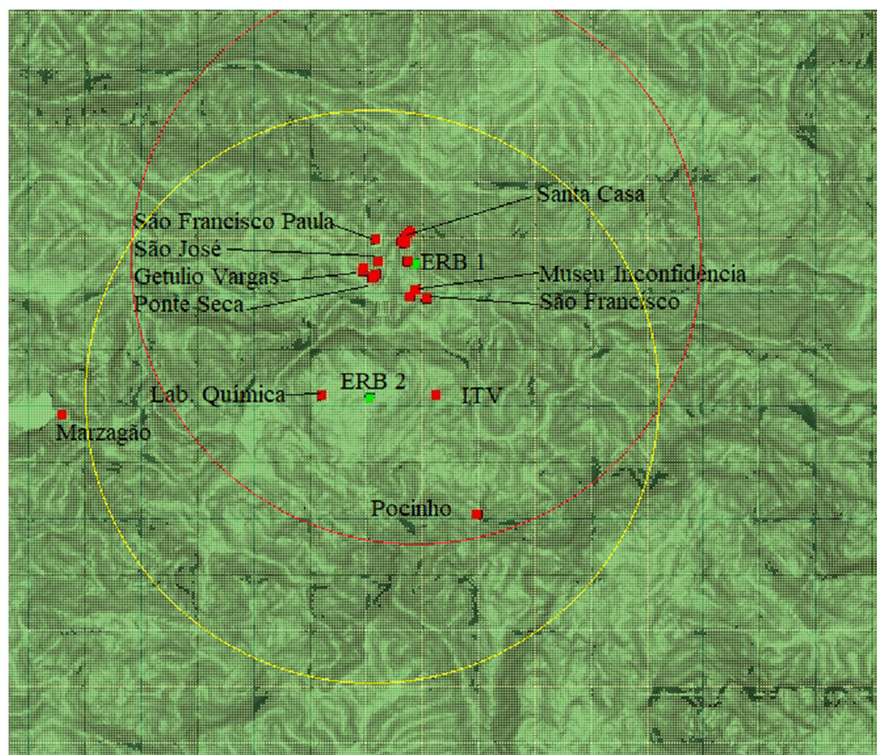


Figura 17 – Vista de cima da distribuição dos receptores no DEM da cidade de Ouro Preto – MG.

Para atender à distribuição física dos dispositivos foi definida a quantidade e a localização das ERB, formando duas células com raio pretendido estipulado em 3 km. A

localização das ERB foi escolhida de acordo com a disponibilidade de local para instalação dos gateways LoRaWAN e antenas, associada à localização geográfica que favorecesse a comunicação com os dispositivos e a disponibilidade de rede ethernet para acesso a internet. Entre os prédios disponíveis para instalação de ERB, definiu-se o prédio de laboratórios da Escola de Minas no Morro do Cruzeiro e o prédio do observatório da Escola de Minas na Praça Tiradentes. Na Figura 18 é apresentada uma imagem de satélite da cidade de Ouro Preto, onde a área de interesse do projeto com as localizações dos ERB e pontos de interesse e referências estão identificadas.

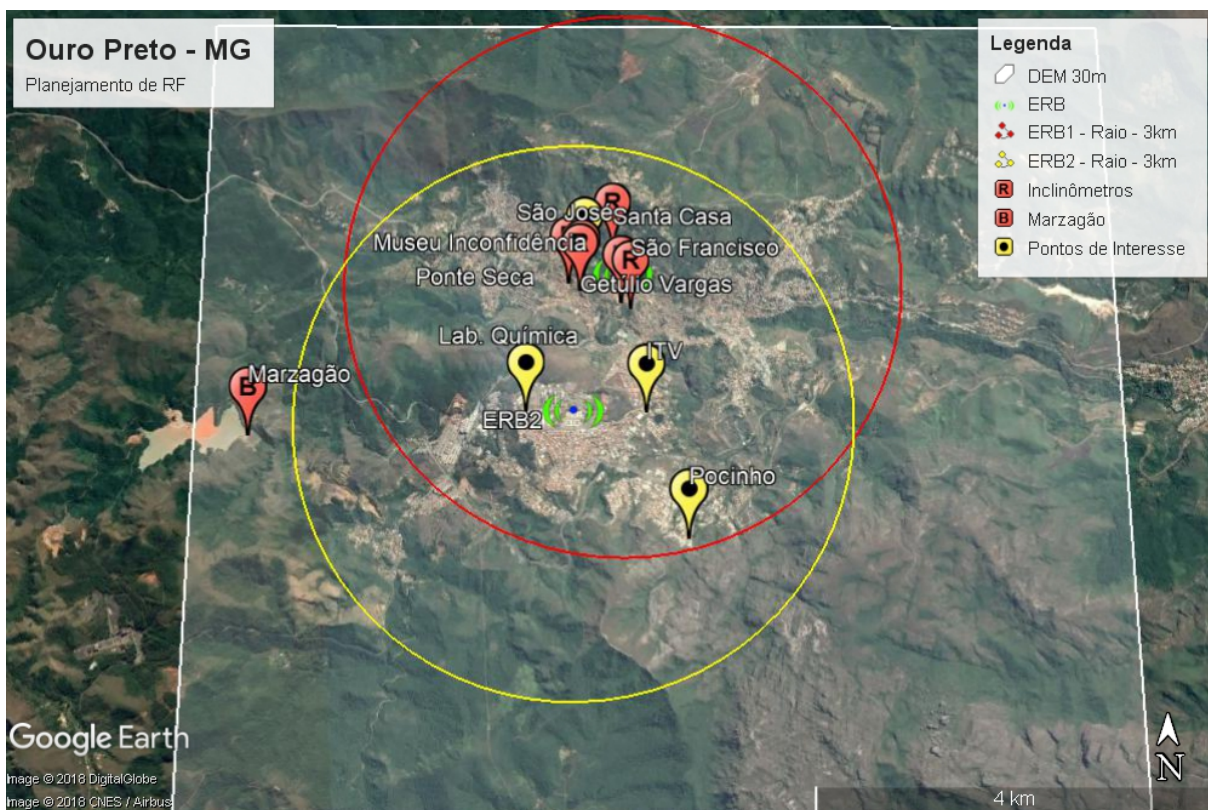


Figura 18 – Planejamento da rede de IoT de Ouro Preto.

Na Figura 18, os balões vermelhos com a letra R indicam os locais onde poderão ser instalados dispositivos para leitura automática de inclinômetros; balões amarelos indicam os demais pontos de interesse; como referência o barramento da barragem do Marzagão é indicado por um balão vermelho com a letra B; e as ERB com o símbolo de antenas em verde. Também são mostrados os círculos com raios de atuação das ERB, estimados em 3 km, sendo o amarelo para a ERB do Morro do Cruzeiro e o vermelho para a ERB da Escola de Minas do Centro. Todas essas indicações estão dentro do retângulo branco, que corresponde à área de abrangência do arquivo DEM utilizado como terreno para as simulações.

4.3.1 Simulações

Após a conclusão do planejamento da rede foram realizadas as simulações de propagação de radiofrequência. Para isso, foi utilizado o software Wireless Insite, versão 3.2.0.3, do fabricante Remcom. As simulações foram realizadas para a frequência ISM de 915 MHz, frequência central utilizada pela tecnologia LoRaWAN, que nessa faixa varia de 902 a 928 MHz. Trata-se de uma boa opção de frequência para a cidade de Ouro Preto, uma vez que o relevo é acidentado e vários pontos de monitoramento não possuem visada direta.

Os modelos de predição utilizados foram o Free Space, o Hata, o Vertical Plane e o X3D, todos eles detalhados na revisão bibliográfica realizada no item 2.7. Com exceção do modelo Hata, recomendado para faixa de 150 MHz a 1500 MHz, os demais modelos são recomendados para predição de propagação das frequências VHF e UHF em terrenos irregulares. Como a frequência de 915 MHz está compreendida nas frequências UHF, todos eles são recomendados para esta aplicação. As simulações foram realizadas para os quatro modelos para efeito de comparação de resultados, uma vez que eles possuem custo benefício distintos.

O importante de se realizar uma análise conjunta dos resultados dos diferentes modelos é justamente analisar se o custo benefício final, que leva em consideração todo o custo computacional, o tempo gasto pelas simulações e os resultados, justificam o uso de um ou de outro modelo em situações onde tempo e processamento são limitações do trabalho. Ou, se ao invés disso, é sempre importante realizar uma análise mais ampla, utilizando todos os recursos disponíveis, aumentando as chances dos resultados representarem melhor a realidade. Isso porque esses modelos podem se complementar em uma análise mais profunda do cenário. Nesse caso, os modelos Hata e Vertical Plane foram utilizados nas análises de PL pontuais, apresentando uma boa correlação para a maioria dos pontos analisados. Por outro lado, utilizando a malha de receptores, embora com resultados diferentes, os modelos Vertical Plane e X3D, apresentaram uma tendência semelhante para os valores de PL.

Detalhando as simulações, elas foram realizadas em dois grupos: sendo o primeiro utilizando uma malha de receptores uniformemente espaçados por toda a região de interesse, e o segundo com receptores pontuais localizados nos 10 pontos de interesse definidos anteriormente na Tabela 6. Para o primeiro grupo o objetivo é observar a tendência do sinal em toda a região de interesse, de forma que, por meio dos mapas de calor gerados pelo

Wireless Insite, possa ser avaliada a cobertura da rede. Os detalhes da configuração das simulações são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parametrização das simulações.

Parâmetro	Configuração utilizada
Modelo	X3D Ray Tracing / Vertical Plane
Antena	Omnidirecional com polarização vertical
Forma de onda	Senoide de 915 MHz
Terreno	DEM USGS com resolução de 30 m
Receptores	Malha com espaçamento de 30 m
Transmissores	Pontual com potência de 0 dB
Altura transmissor	12 metros
Altura receptor	1,6 metros

Para o segundo grupo de simulações o objetivo é validar os resultados pontuais, comparando os resultados de PL com a sensibilidade do receptor, além de realizar o cálculo da potência recebida para cada um dos pontos. Para isso, foram utilizados os mesmos parâmetros da Tabela 9, com alterações nos modelos (foram usados o Hata e Vertical Plane). Para esse caso, o X3D não foi utilizado por limitações constatadas em simulações com receptores do tipo pontual.

Com os resultados das simulações do primeiro grupo, foram gerados mapas de calor da região de interesse. Esses mapas são representações gráficas dos valores de PL calculados pelo Wireless Insite e gerados pelo próprio software. A representação é muito interessante, pois mostra como as duas ERBs possuem função complementar nas regiões de interesse em relação à cobertura do sinal. Observe que na Figura 19 e na Figura 20, a região próxima à ERB, representado pelo cubo verde, possui coloração azul; na sequência, assumindo tons de verde, amarelo, laranja até atingir o vermelho. Isso significa, de acordo com a escala, que o tom azul é a região de sinal mais forte, a partir de -36 dB, diminui gradativamente, até chegar ao vermelho, com sinais de até -250 dB.

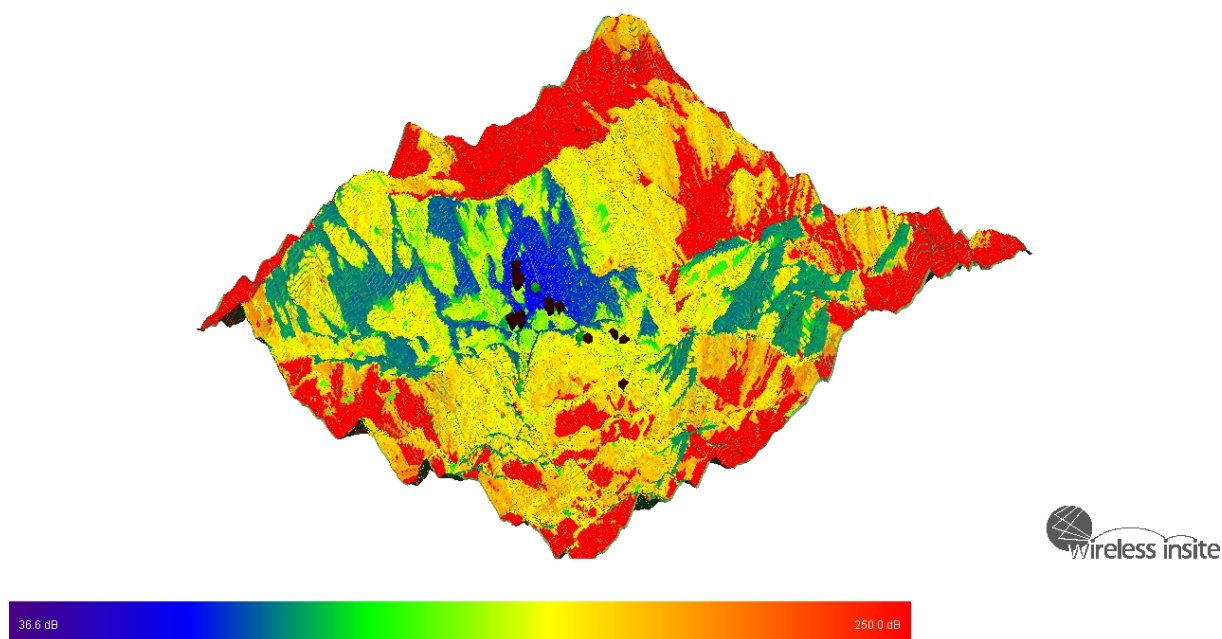


Figura 19 – Mapa de calor do PL para ERB da Escola de Minas do Centro calculado pelo modelo X3D. Mínimo: -36 dB; Máximo: -250 dB.

Ao se fazer uma sobreposição das imagens da Figura 19 e da Figura 20 com o mapa da cidade de Ouro Preto, percebe-se que a cobertura da região, definida como de interesse na Figura 18, é completamente atendida pelas duas ERB definidas no projeto, considerando o valor de corte um PL em torno de -140 dB, que é bem menor que o *link budget* de 157 dB da tecnologia LoRaWAN, apresentado na Tabela 8.

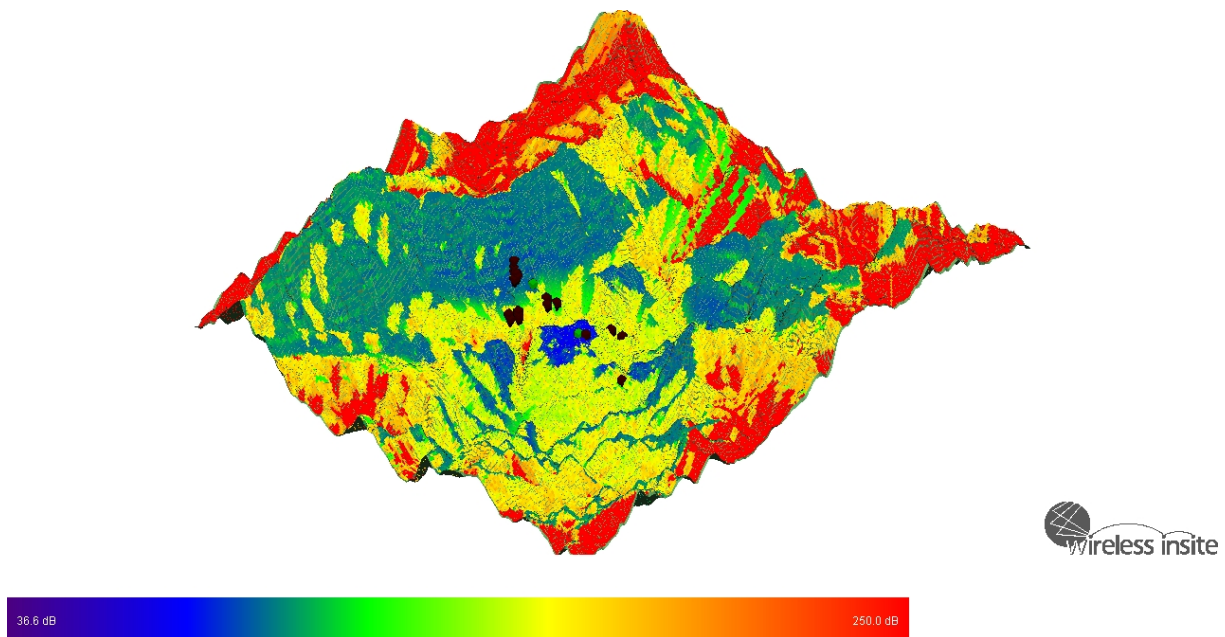


Figura 20 – Mapa de calor do PL para ERB da Escola de Minas do Morro do Cruzeiro calculado pelo modelo X3D. Mínimo: -36 dB; Máximo: -250 dB.

Essa mesma observação também pode ser realizada através dos mapas de calor criados pelo modelo Vertical Plane, que embora mais simples que o X3D, apresentam a mesma tendência, porém com valores de PL geralmente menores, por se tratar de um modelo que realiza menos cálculos e considera menos interações com o ambiente. Analisando a Figura 21 e a Figura 22, é possível identificar a mesma tendência do modelo X3D nos resultados do modelo Vertical Plane, além de observar a maior simplicidade de modelo Vertical Plane, por meio um mapa de calor com cores bem mais homogêneas para a mesma escala de -36 dB a -250 dB, representando um número menor de dados.

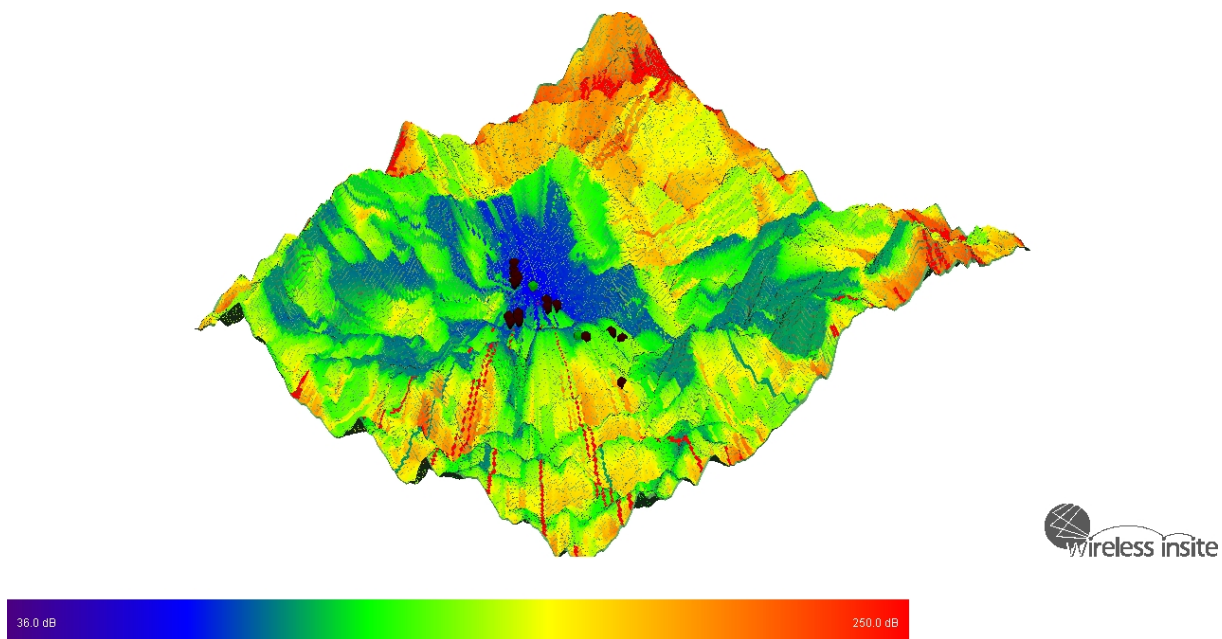


Figura 21 – Mapa de calor do PL para ERB da Escola de Minas do Centro calculado pelo modelo Vertical Plane. Mínimo: -36 dB; Máximo: -250 dB.

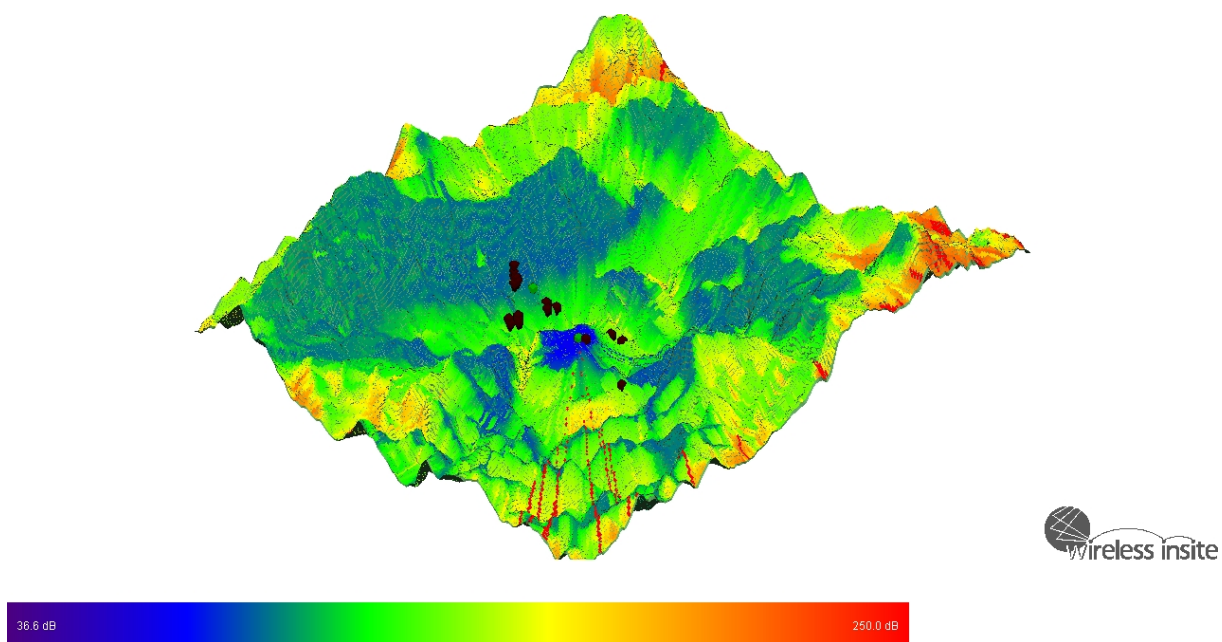


Figura 22 – Mapa de calor do PL para ERB da Escola de Minas do Morro do Cruzeiro calculado pelo modelo Vertical Plane. Mínimo: -36 dB; Máximo: -250 dB.

Como pode ser visto nos mapas de calor apresentados, os resultados das simulações de propagação de radiofrequência indicam que o planejamento realizado pode atender a toda a área de interesse da cidade de Ouro Preto, principalmente porque a tecnologia selecionada

para o projeto piloto, a LoRaWAN, possui receptores com alta sensibilidade e pode alcançar um *link budget* de até 157 dB de *uplink*.

Complementando a análise, são apresentados na Tabela 10, os cálculos de potência recebida (P_{RX}) usando o processo de *link budget* para *uplink*, calculado a partir dos valores de PL, obtido nas simulações para os 10 pontos fixos de interesse. Para cálculo de potência recebida (P_{RX}) por meio do *link budget* foi utilizada a equação

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - PL + G_{RX} - L_{RX} \quad (31)$$

em que: P_{RX} é a potência recebida no receptor; P_{TX} é a potência do transmissor (20 dBm); G_{TX} é o ganho da antena do transmissor (3,35 dBi); L_{TX} são as perdas no transmissor devido aos cabos e conectores (2 dB); PL é o PL calculado (perdas do caminho); G_{RX} é ganho da antena do receptor (3 dBi); e L_{RX} são perdas do receptor devido a cabos e conectores (1,5 dBi).

Tabela 10 – Potência recebida de *uplink* baseado em simulações de PL.

Localização	Vertical Plane (dBm)	Hata (dBm)	Distância (m)	Visada
M. Inconfidência	-77,98	-88,78	286	LOS
Santa Casa	-82,43	-91,60	320	NLOS
São Francisco	-67,90	-92,31	387	NLOS
São José	-59,86	-62,00	450	LOS
Getúlio Vargas	-59,29	-62,70	486	NLOS
Lab. Química UFOP	-79,76	-103,03	519	LOS
Ponte Seca	-122,08	-105,01	590	NLOS
ITV	-95,47	-72,39	1487	NLOS
São Francisco Paula	-72,29	-73,19	1638	LOS
Pocinho	-74,50	-78,05	2863	NLOS

A Tabela 10 apresenta o pior caso de potência recebida no ponto referente à Ponte Seca, com o valor de -122 dBm para o modelo Vertical Plane, sendo que para o modelo Hata, o pior caso também foi neste ponto com valor de -105 dBm. Assim, comparando esse valor do pior caso com a sensibilidade de recepção do gateway Multi-tech, que utiliza rádio Semtech de -146 dBm, pode-se assumir que, segundo os resultados das simulações, todos os enlaces dos 10 pontos de interesse possuem viabilidade técnica. Dessa forma, o próximo passo é

realizar as medições de RSSI em campo após implantação da rede para que essa viabilidade possa ser validada.

4.4 Implantação da rede de comunicação e resultado das medições

Baseado no planejamento de RF realizado no item 4.3, definiu-se que para implantação do projeto piloto serão necessários os itens da Tabela 11 como o mínimo necessário, de forma a construir uma estrutura de duas células e ter disponibilizado um número mínimo de dispositivos clientes para realização das medições, tudo conforme o planejamento de RF e as simulações realizadas.

Tabela 11 – Componentes mínimos para o projeto piloto.

Item	Quantidade	Descrição	Localização
1	1	Gateway	Escola de Minas do Morro do Cruzeiro
2	1	Gateway	Escola de Minas da praça Tiradentes
3	3	Dispositivos	Circularão nos pontos de interesse
4	1	Servidor de rede	Servidor em nuvem para conexão com os gateways e gerenciamento dos dispositivos e dados
5	1	Aplicação	Servidor em nuvem para criação da aplicação onde os dados dos dispositivos serão tratados

A partir desses itens foram especificados os componentes da tecnologia LoRaWAN a serem adquiridos para a montagem da rede e realização dos testes, assim como servidores de rede e aplicação. A Tabela 12 apresenta a quantidade de cada componente e sua descrição técnica.

Tabela 12 – Especificação de componentes da rede LoRaWAN.

Item	Quantidade	Descrição
1	2	Multitech Conduit LoRa Gateway 3G Outdoors IP67 & mLinux 915 MHz, modelo MTCDTIP-H5-220L.
2	3	Dragino LoRa/GPS Shield Arduino
3	3	Arduino UNO
4	1	Servidor de rede TTN
5	1	Servidor de aplicação Cayenne

4.4.1 Instalação da rede LoRaWAN em Ouro Preto

Conforme o planejamento de RF realizado, os gateways das ERB da rede LoRaWAN de Ouro Preto foram instalados nos prédios previamente definidos. Assim sendo, a ERB 2 foi instalada no prédio de laboratórios da Escola de Minas do Morro do Cruzeiro, mais precisamente no topo de uma escada de marinheiro que dá acesso à caixa d'água entre os prédios de laboratórios de automação, mecânica e produção e o novo prédio de laboratórios construído pelo ITV, conforme ilustrado pela Figura 23.



Figura 23 – Instalação da ERB 2 no prédio de laboratórios da Escola de Minas do Morro do Cruzeiro.

A ERB 1 foi instalada em uma área anexa ao observatório do Museu da Escola de Minas do centro, em um local aberto, mas que conforme solicitação da direção da Escola de Minas, não pode ser visto das ruas da cidade, devido ao impacto visual e exigências do IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional). Na foto da Figura 24 pode ser visto o local de instalação, em uma pequena torre próxima à escada de acesso à estação 3 de monitoramento da qualidade do ar.



Figura 24 – Instalação da ERB 1 ao lado do observatório do Museu da Escola de Minas do Centro.

Ambas as instalações foram executadas conforme planejado, sendo que além das estruturas físicas cedidas pela direção da Escola de Minas, foi necessário criar uma infraestrutura com pontos de rede ethernet com acesso a internet, desde os painéis de *backhaul* de tecnologia da informação até os locais de instalação dos ERB.

Com uma montagem simples e sem a necessidade de infraestrutura, os dispositivos da rede também foram preparados para os testes de medição de sinal, nesse caso, como o rádio LoRaWAN adquirido já possui uma placa com *shield* para Arduino UNO, foi necessário apenas realizar a conexão e a alimentação do conjunto por uma bateria portátil, conforme apresentado na Figura 25. A programação do Arduino foi realizada por meio de bibliotecas para comunicação com o rádio LoRaWAN, com os servidores da TTN e da Cayenne. Para mais detalhes sobre a programação deve-se verificar (MEIRELES et al., 2018).

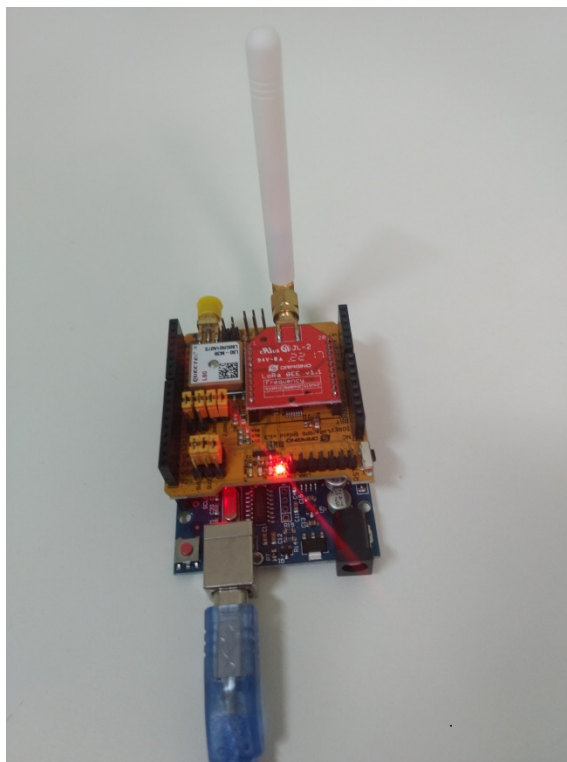


Figura 25 – Dispositivo LoRaWAN composto por Arduino UNO com shield Dragino.

Com essas instalações, a infraestrutura física da rede LoRaWAN de Ouro Preto foi concluída, uma vez que ambos os gateways estão devidamente instalados e conectados à internet e os dispositivos prontos para serem conectados aos gateways. Sendo assim, o próximo passo da instalação se deu por meio da configuração dos gateways e dos dispositivos na plataforma de serviços de rede, nesse caso a plataforma da organização TTN, cujo acesso é gratuito para um determinado nível de serviços, sendo o suficiente para os testes.

A configuração dos gateways na plataforma TTN foi realizada por meio de uma sequência de passos, sendo em resumo: a criação de um usuário no site da plataforma; a configuração dos gateways; a configuração da aplicação; e, por último, a configuração dos dispositivos. Todas essas configurações são realizadas através do site da organização que pode ser acessado pelo endereço <https://www.thethingsnetwork.org/>. Para maiores detalhes sobre as configurações, recomenda-se o acesso ao artigo: Coisas para se saber sobre a Internet das Coisas – Um Guia Prático, referenciado no tópico de publicações desse trabalho e aos documentos da TTN (MEIRELES et al., 2018; THE THINGS NETWORK, 2018).

Para a criação da aplicação, foi utilizada a plataforma parceira da TTN, a Cayenne. Da mesma forma que para a TTN, na Cayenne existe uma série de passos para configuração dos

dispositivos. Para maiores detalhes, recomenda-se também o acesso ao artigo: Coisas para se saber sobre a Internet das Coisas – Um Guia Prático, referenciado no tópico de publicações desse trabalho, e aos documentos da plataforma (CAYENNE, 2018; MEIRELES et al., 2018).

Assim, na Figura 26, é apresentada a tela da plataforma TTN com o gateway 01GTW01 configurado e online, recebendo mensagens dos dispositivos. Os destaques enumerados na figura representam: 1 – menu de overview com as informações gerais do gateway; 2 – endereço e descrição do gateway; 3 – estado do gateway, se conectado ou não aos servidores da rede; e 4 – tempo decorrido após última mensagem recebida e número de mensagens recebidas e transmitidas.

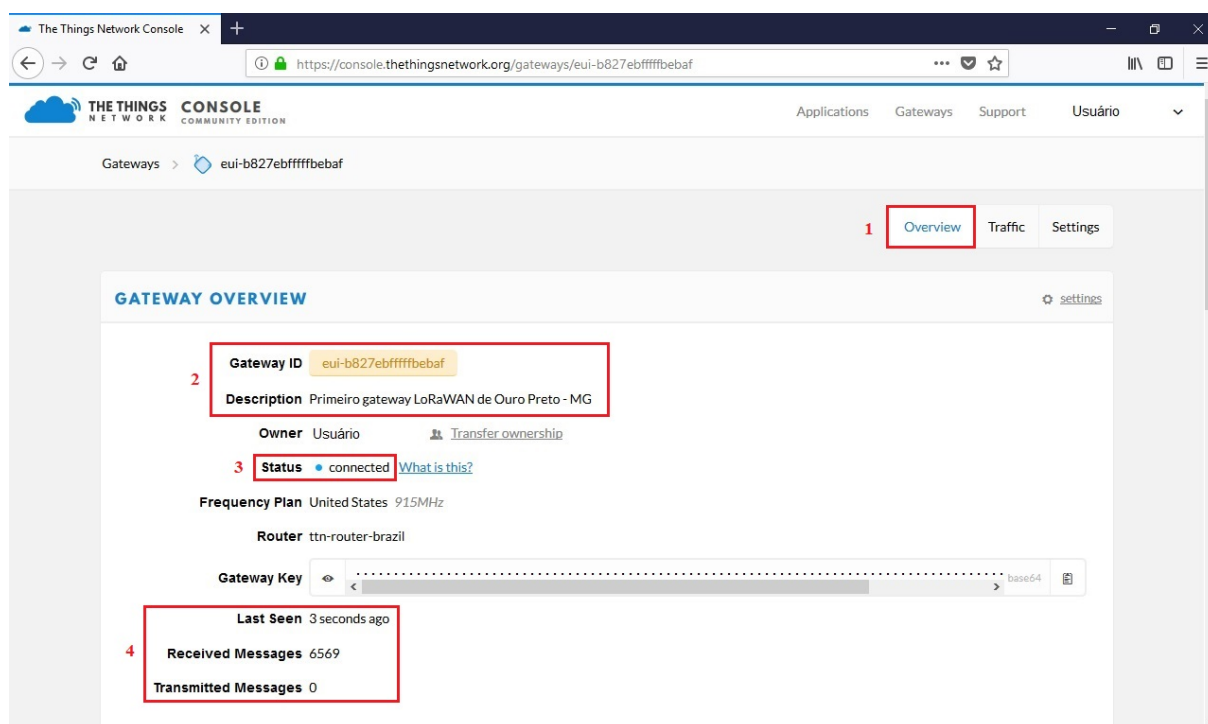


Figura 26 – Interface de monitoramento de gateway na plataforma TTN.

Na sequência, a Figura 27 apresenta as telas de overview dos dispositivos 01sensor01 e 01sensor03, na versão *mobile* da plataforma TTN, ambos online, enviando mensagens. Os principais pontos indicados pelos marcadores enumerados representam: 1 – nome do dispositivo monitorado; 2 – estado da comunicação do dispositivo com o gateway, informando o tempo decorrido desde a última mensagem; 3 – número de mensagens enviados pelo dispositivo e 4 – número de mensagens recebidas pelo dispositivo. A interface gráfica da versão *mobile* foi muito utilizada durante os testes de campo, uma vez que permitia o monitoramento dos dispositivos no próprio local das medições.

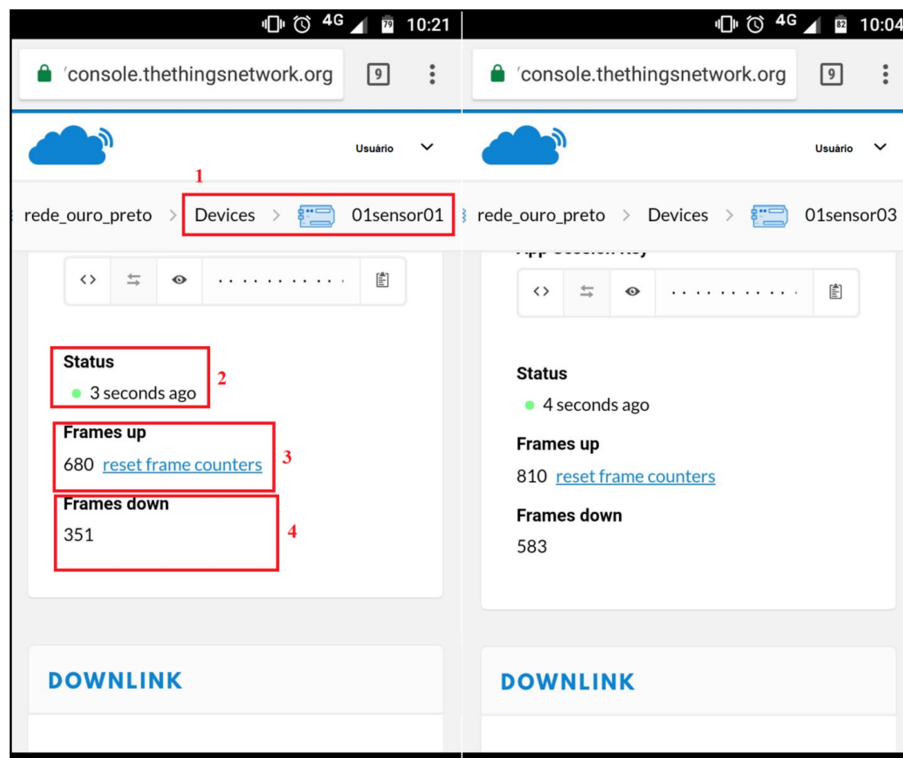


Figura 27 – Interface *mobile* de monitoramento de dispositivos na plataforma TNN.

Por último, na Figura 28, é apresentada na plataforma Cayenne a interface gráfica de monitoramento dos dispositivos, exibindo o dispositivo 01sensor03, com os valores instantâneos das variáveis medidas, assim como a localização geográfica representada no mapa. Essa interface possui uma série de funções, na qual as mais importantes que estão destacadas pelos marcadores enumerados, serão detalhadas seguir: 1 – nome do projeto exibido na interface gráfica; 2 – opções para criar nova interface, submeter um projeto, acessar a comunidade de desenvolvedores, acessar a documentação de desenvolvimento ou o menu de opções; 3 – lista dos dispositivos configurados no projeto; 4 – função de overview, que permite visualizar os dados do dispositivo na janela principal; 5 – Base de dados, que possibilita acessar uma tabela com os dados históricos do dispositivo selecionado, além de possibilitar filtrar por períodos de tempo e exportar para arquivo .csv; 6 – janela principal de monitoramento do dispositivo, nessa aplicação representa os dados do GPS plotados em um mapa de origem do Google, permitindo o rastreamento do dispositivo; e 7 – demais informações do dispositivo, como analógicas de RSSI, SNR, e outras entradas e saídas programadas no dispositivo. Como detalhado, a interface gráfica é muito completa e possibilita o monitoramento dos dispositivos, tal como um sistema de supervisão.

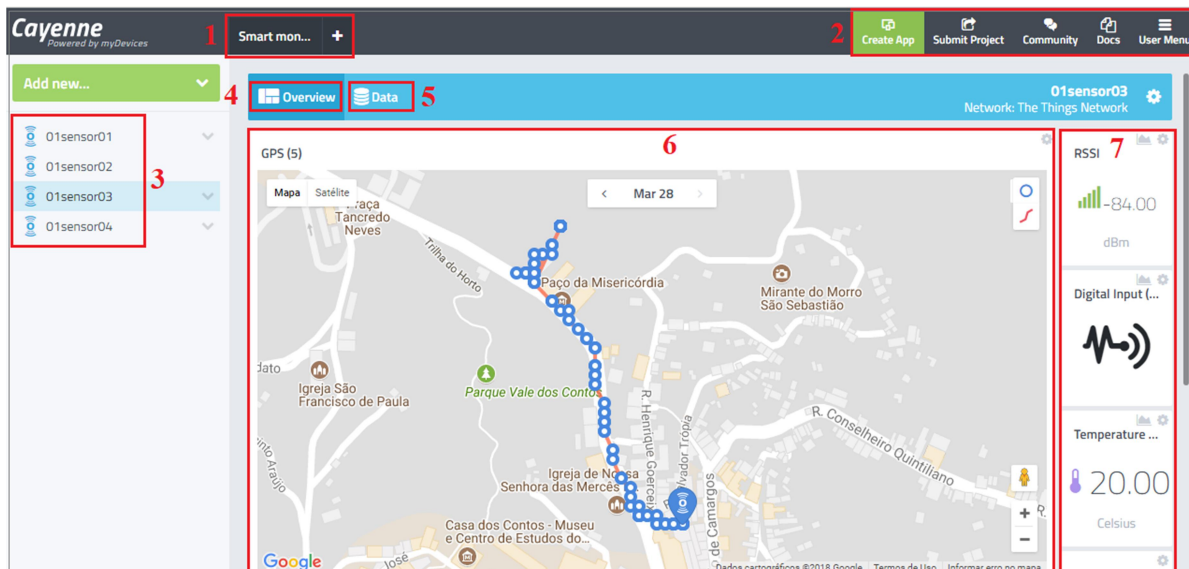


Figura 28 – Interface gráfica do dispositivo 01sensor03 na plataforma Cayenne.

Com toda a configuração dos gateways da rede e dos dispositivos concluída, iniciou-se a etapa de medição dos valores de RSSI nos dez pontos previamente definidos. Dessa forma, a próxima etapa do trabalho trata-se da realização dessas medições.

4.4.2 Medição de intensidade de sinal nos receptores

Para realização dos testes foi utilizado o hardware especificado na Tabela 12, sendo:

- (i) gateway Multitech Conduit mLinux modelo MTCDTIP – H5 – 220L - 915, com potência de saída de 26 dBm, antena omnidirecional de 3 dBi e sensibilidade de recepção de – 146 dBm; e
- (ii) dispositivo Dragino LoRa/GPS Shield com Arduino UNO, com potência de saída de 20 dBm, antena omnidirecional de 3,35 dBi e sensibilidade de recepção de -128 dB.

Para as medições em campo foram realizadas configurações nos gateways e dispositivos de modo que a comunicação entre eles fosse padronizada e assim garantisse a mesma condição de medição em todos os pontos. Dessa forma, os gateways e dispositivos foram configurados para comunicarem na banda G1 do padrão norte americano, também utilizado no Brasil. Para *uplink*, a faixa de frequência utilizada foi entre 903,9 MHz e 905,7 MHz, a largura de banda (*Bandwidth* – BW) foi de 125 kHz, o fator de espalhamento (*Spreading Factor* – SF) igual a 7, e taxa de codificação (*Coding Rate* – CR) de 4/5. Para *downlink* foram configurados um BW de 500 kHz, um SF de 9 e um CR de 4/5 para a faixa de frequência de 923,9 a 925,7 MHz. Para a configuração utilizada, a taxa de dados (*Data Rate* - DR) máxima foi calculada conforme equação

$$DR = SF \frac{BW}{2^{SF}} CR , \quad (32)$$

e os resultados estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Cálculo da Data Rate máximo.

Link	Bandwidth (kHz)	Coding Rate	Spreading Factor	Data Rate (bps)
<i>Uplink</i>	125	7	4/5	5468,75
<i>Downlink</i>	500	9	4/5	7031,25

Essa taxa máxima é suficiente para os testes, uma vez que os *payloads* de *uplink* e *downlink* configurados foram, respectivamente, 34 bytes e 17 bytes.

Portanto, para realização das medições de RSSI foi necessário deslocamento até os pontos de instalação dos inclinômetros e demais pontos de interesse, conforme definido previamente no planejamento de RF. Assim, nas Figura 29, Figura 30 e Figura 31, são apresentados os oito pontos de medição em ambiente *outdoor* onde as medições foram realizadas, de forma a melhor caracterizar os locais.



Figura 29 – Inclinômetros dos pontos: Santa Casa, Museu e Ponte Seca respectivamente.

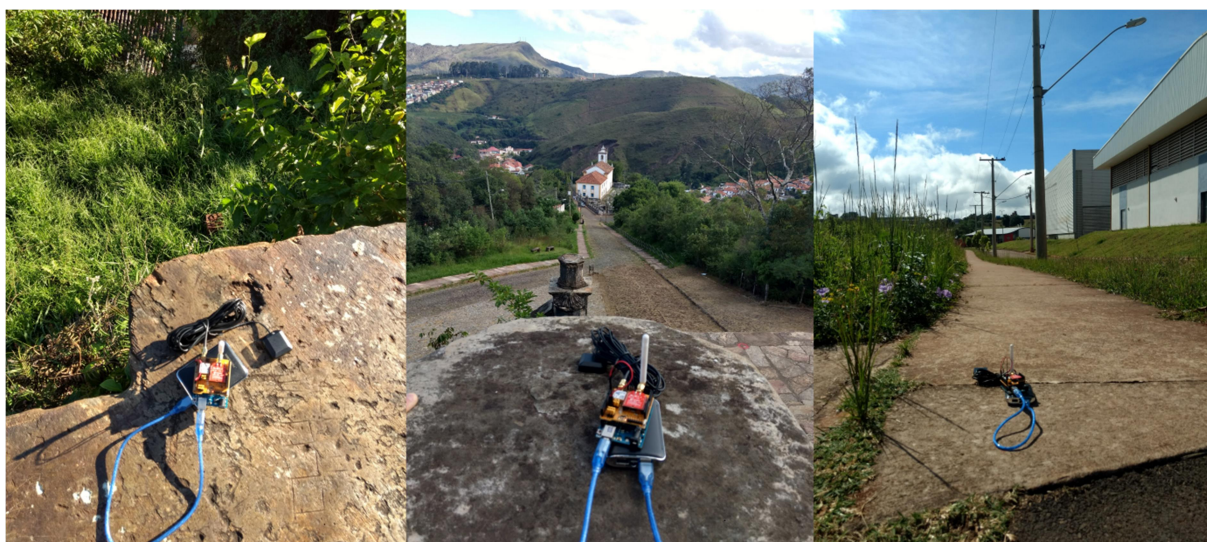


Figura 30 – Inclinômetros dos pontos: Getúlio Vargas, S.F. Paula e Lab. Química respectivamente.



Figura 31 – Inclinômetros dos pontos: São José e S. Francisco respectivamente.

Dessa forma, após as medições de RSSI, com os dados coletados e armazenados na base de dados da plataforma Cayenne, foram realizados os cálculos do RSSI médio e do PRR, seguindo os critérios definidos no tópico 3.3.4. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores das medições de RSSI e PRR.

Localização	RSSI (dB)	Visada	Distância¹⁷ (m)	PRR (%)	Ambiente	Gateway
Museu	-83,86	LOS	286	75,18	<i>Outdoor</i>	ERB 1
São José	-85,88	LOS	450	78,41	<i>Outdoor</i>	ERB 1
Lab. Química	-88,80	LOS	519	63,36	<i>Outdoor</i>	ERB 2
S. F. Paula	-95,51	LOS	1638	53,94	<i>Outdoor</i>	ERB 2
Getúlio Vargas	-101,98	NLOS	486	79,11	<i>Outdoor</i>	ERB 1
Pocinho	-103,92	NLOS	2863	65,05	<i>Indoor</i>	ERB 1
S. Francisco	-109,55	NLOS	387	72,5	<i>Outdoor</i>	ERB 1
Santa Casa	-109,58	NLOS	320	61,32	<i>Outdoor</i>	ERB 1
Ponte Seca	-117,63	NLOS	590	52,88	<i>Outdoor</i>	ERB 1
ITV	-118,77	NLOS	1487	30,24	<i>Indoor</i>	ERB 1

Na Tabela 14, observa-se que os pontos LOS apresentaram maior nível de RSSI, devido ao caminho direto, livre de obstruções, percorrido pelas ondas eletromagnéticas. Prova disso é que o ponto S. F. Paula, apresentado na Figura 32, a uma distância de 1638 metros, apresentou o RSSI maior do que todos os pontos NLOS, mesmo aqueles a distâncias muito menores. É importante frisar que esse ponto apresentou uma taxa de perda de pacotes PRR maior que os pontos NLOS mais próximos, indicando a influência de possíveis interferências na perda de pacotes, porém, como não foi possível analisar o espectro na região com um analisador de sinais, não foi confirmada uma interferência.

¹⁷ Distância calculada obtida no software Wireles Insite.



Figura 32 – Linha de visada LOS do ponto S.F. Paula a uma distância de 1638 metros.

Para possibilitar a comparação entre os valores de RSSI medidos em campo e os valores de potência recebida calculados pelos modelos Hata e Vertical Plane, foi gerado o gráfico da Figura 33. Nesse gráfico é possível observar que os valores medidos em campo possuem a mesma tendência que os resultados de potência recebida calculados a partir do PL obtido pelos modelos. Também é observado que os modelos possuem resultados muito próximos para a maioria dos pontos de interesse, além disso, os resultados medidos mantem uma diferença semelhante para os resultados calculados na maioria dos pontos. Um resultado esperado e confirmado é que os pontos com visada direta possuem o RSSI menor em relação a pontos sem visada direta, mesmo estes estando a distâncias menores em relação à ERB.

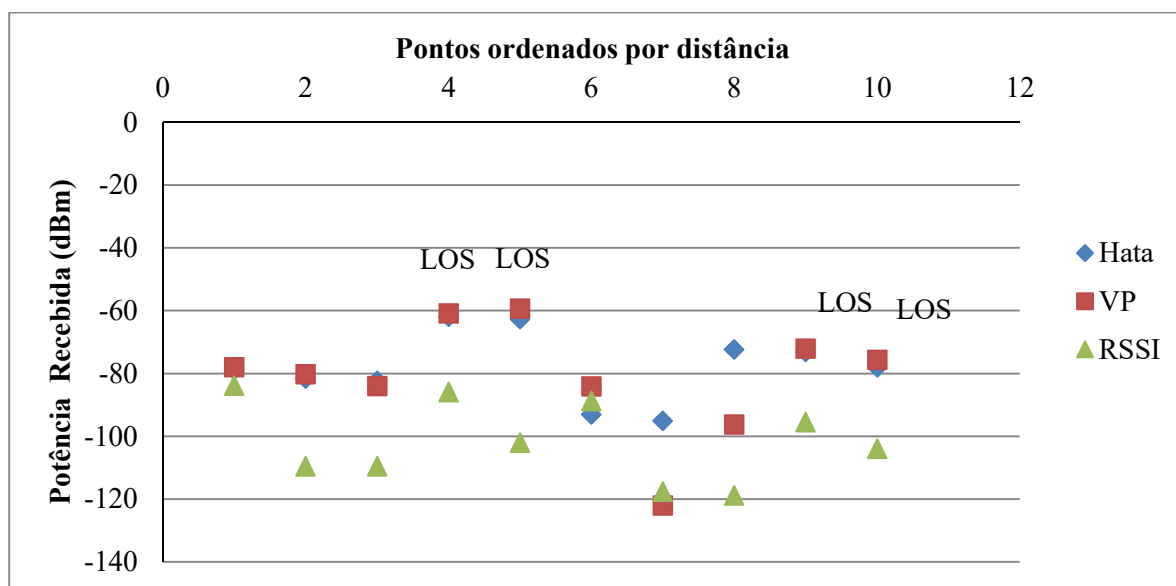


Figura 33 – Comparação de potência recebida calculada e RSSI.

É notável que em alguns pontos como 1, 6, 7 e 8 a tendência da diferença entre as medições e os valores calculados são diferentes dos demais. Esse resultado também já era esperado, uma vez que, os cálculos de PL realizados pelo Wireless Insite tomaram como base um DEM de resolução baixa, além de não considerar a morfologia do terreno e as construções. Por isso, em condições semelhantes, as simulações devem ser consideradas apenas como uma referência. Sempre que possível deve-se utilizar as informações disponíveis para calibrar os modelos matemáticos e assim obter melhores resultados, porém, quando não for possível, como nesse estudo de caso, deve-se considerar uma margem de segurança.

Outra observação importante deve ser feita em relação ao ponto Pocinho, pois, mesmo com uma distância de 2863 metros entre TX e RX e estando em ambiente *indoor*, apresentou grande capacidade de alcance da rede LoRaWAN em ambiente urbano, com RSSI médio de -103,92 dB e um PRR de 65,05%. Ressalta-se porém, que a altitude entre TX e RX para esse ponto é muito semelhante, uma vez que a linha de visada é obstruída apenas por construções. O ponto ITV também possui uma particularidade, localizado no primeiro andar de um prédio com três andares e que por isso possui uma grande atenuação, mostrou a capacidade de penetração do sinal em ambiente *indoor*, mesmo estando localizado no lado oposto à direção do gateway.

Mais uma observação foi feita no ponto Lab. Química, onde foi evidenciado um fenômeno da propagação de RF, que é um desafio a mais para os engenheiros de RF quando se trata de cenários de projetos de IoT. Durante a campanha de medição desse ponto, foi

necessário realizar duas alterações em sua localização, em torno de 50 cm. Ao analisar os dados coletados, foi visto que após essas mudanças de localização os valores de RSSI mudaram de patamar, como apresentado na Figura 34.

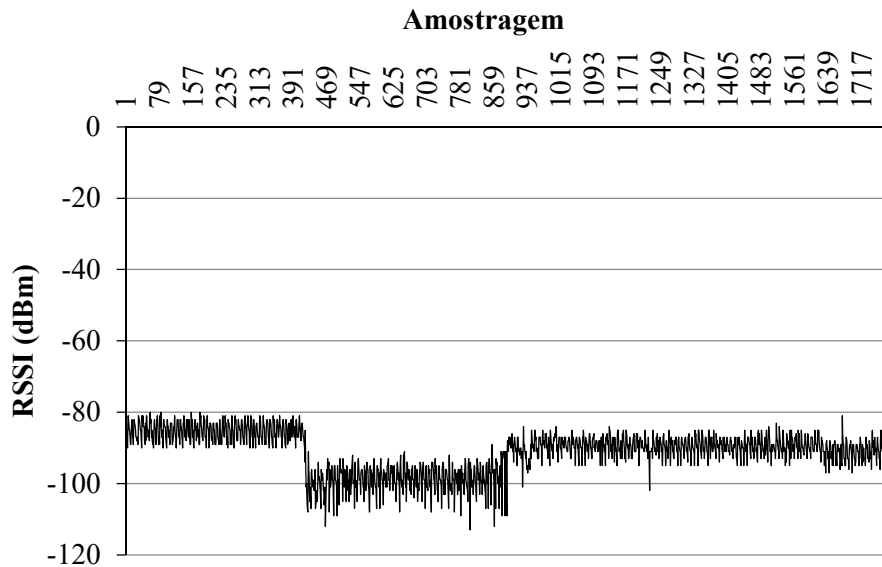


Figura 34 – Variação de RSSI medido no ponto Lab. Química.

Essas mudanças se devem a interferências construtivas e destrutivas das ondas eletromagnéticas, que ocorrem em movimentações acima de $\lambda/2$, que para a frequência utilizada é torno de 33 cm. Nesse caso, ouve variação de RSSI de -84 dBm para -97 dBm e, depois, para -88 dBm, alterações consideráveis e que justificam as margens de segurança utilizadas em diversos projetos de RF para redes móveis. Por outro lado, para dispositivos IoT estáticos, esse pode ser um problema caso o dispositivo seja instalado em uma área de interferência destrutiva. Isso vai requerer um cuidado a mais na definição dos pontos por parte dos projetistas das redes IoT, incluindo uma etapa de testes em diferentes pontos em uma mesma região, de modo a encontrar um local com melhor sinal.

Ainda durante os testes de campo foi validada uma das funções da camada de rede da TTN atuando no gerenciamento da rede. Segundo a literatura técnica, os servidores de rede LoRaWAN são responsáveis por determinar a melhor rota de comunicação entre os dispositivos e os gateways. Na prática, os servidores verificam os níveis de sinal RSSI entre gateways de uma determinada região e os dispositivos dessa mesma região. Assim, a leitura dos dados de campo será realizada pela melhor rota. A Figura 35 mostra o exato momento em que uma rota de comunicação de um determinado dispositivo é alterada, nesse momento o nível de sinal RSSI muda repentinamente, sendo que isso ocorreu porque um segundo

gateway com melhor nível de sinal entrou em operação, oferecendo uma rota melhor para o dispositivo. Esse gerenciamento é transparente para o usuário e foi observado em campo no momento do comissionamento do segundo gateway na Escola de Minas do Centro.

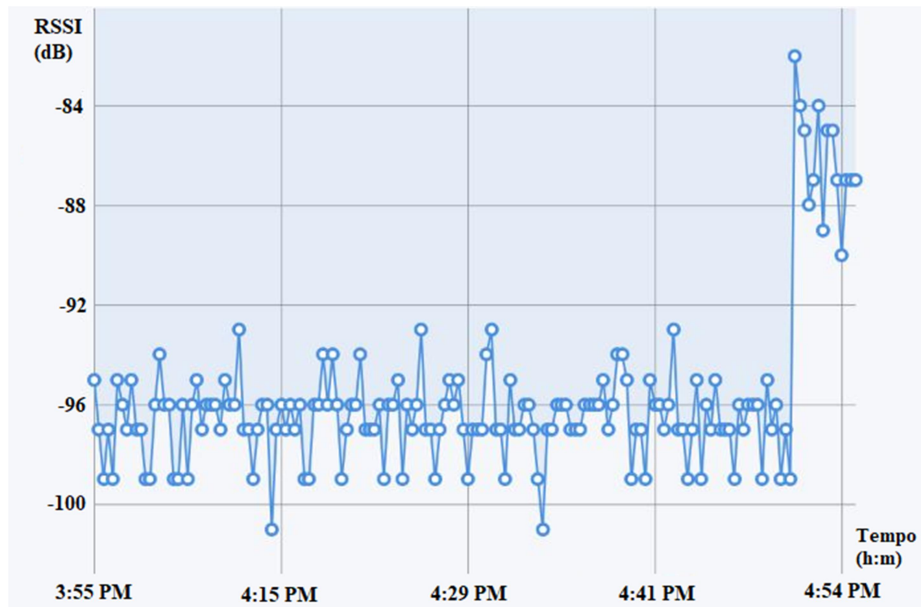


Figura 35 – Alteração do nível do RSSI após mudança de ERB.

Isso aconteceu porque o segundo gateway conectado à rede estava mais próximo ao dispositivo e, conseqüentemente, em uma melhor condição para estabelecer a comunicação. Dessa forma, o dispositivo que estava conectado ao ERB 2 com o RSSI em torno de -97 dB migrou para o ERB 1, alterando o RSSI para -86 dB, comprovando o bom gerenciamento realizado pela camada de rede da TTN.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho alcançou seu objetivo principal, que foi a construção de uma rede sem fio de longo alcance e baixo consumo de energia (LPWAN), cobrindo a área de interesse da cidade de Ouro Preto – MG. Projetada para priorizar as regiões onde existem instrumentos que monitoram o deslocamento de encostas e terrenos, os inclinômetros, o alcance da rede atendeu todos os pontos de interesse nas simulações de propagação de radiofrequência realizadas, sendo confirmado nos testes de campo. Nesses testes, as medições de RSSI mostraram que, para os dez pontos de interesse predeterminados, incluindo todos os pontos onde existem inclinômetros instalados, a comunicação foi efetiva.

Nos testes foram realizadas medições em quatro pontos com visada direta (LOS) em ambiente externo para diferentes distâncias, chegando até 1678 metros. Também foram realizadas medidas em quatro pontos sem visada direta (NLOS), em ambiente externo com distância de até 590 metros. A fim de testar ainda mais a capacidade da rede, foram realizados dois testes em ambiente fechado (*indoor*), onde conhecidamente existe uma grande atenuação de sinal. Os resultados mostraram que a tecnologia LoRaWAN pode ser utilizada nesse tipo de ambiente, de relevo acidentado em área urbana, sendo observado enlace funcional com uma distância de até 2863 metros.

Este trabalho validou a metodologia utilizada como uma opção a ser aplicada em projetos de características similares, ou seja, com necessidade de baixo custo de implantação, dispositivos com baixo consumo de energia e implantação em regiões de relevo montanhoso. Dessa forma, conclui-se que a definição das premissas do projeto é uma etapa fundamental para sua execução, pois permite reduzir consideravelmente as opções e, assim, concentrar a atenção e os recursos apenas em tecnologias que atendam aos requisitos críticos do projeto.

O uso de modelos de propagação de RF também se mostrou muito útil para este tipo de projeto, uma vez que permitiu dimensionar o tamanho das células e, consequentemente, o quantitativo de equipamentos a serem adquiridos, evitando desperdícios de recursos. Mesmo com a ausência de dados reais para calibração dos modelos de propagação utilizados e com a utilização de um DEM de baixa resolução, os resultados encontrados foram importantes no dimensionamento da rede e na definição da tecnologia LoRaWAN.

6 TRABALHOS FUTUROS

Este projeto deixa um legado tecnológico importante para a comunidade acadêmica e para a população de Ouro Preto. Em época de discursos sobre indústria 4.0 e cidades inteligentes, a existência de uma infraestrutura de rede IoT de baixo custo, possibilita a criação de inúmeras aplicações voltadas ao desenvolvimento dos alunos e para benefício da população, além de colocar a cidade de Ouro Preto na vanguarda da era tecnológica, se comparando a grandes capitais e polos tecnológicos do Brasil e do mundo.

O trabalho mostrou ainda um enorme potencial que as tecnologias de internet das coisas têm em relação à melhoria da qualidade de vida das pessoas. Atualmente em nosso país existem milhares de pessoas que residem ou trabalham em áreas de risco, seja por razão de desastres naturais ou por ações humanas. Assim, os resultados indicam que é possível criar sistemas de baixo custo para monitoramento e alerta em áreas de risco.

Como fruto deste trabalho, surgiu em 2017 uma startup de base tecnológica chamada Warning Band. Trata-se de uma empresa cuja missão é desenvolver uma plataforma digital para gestão de riscos na indústria e nas cidades. Baseada nas tecnologias de internet das coisas e inteligência artificial, essa plataforma digital irá gerenciar dispositivos portáteis capazes de alertar individualmente empregados da indústria e cidadãos que convivem com o risco em seu dia a dia. Os dispositivos devem ser pequenos o suficiente para serem utilizados como *wearables*, mas precisam se comunicar com uma rede sem fio de amplo alcance e serem capazes de alertar as pessoas que os utilizam através de som, vibração e luzes. Além disso, é de suma importância que a plataforma e os dispositivos sejam de alta confiabilidade para que os alertas sejam sempre efetivos. O consumo de energia é outro ponto fundamental em relação aos dispositivos, sua performance deve sempre preservar a bateria de modo que, em casos de emergência, o alerta seja realizado corretamente. O trabalho desenvolvido mostrou que é factível alcançar esses objetivos, sendo assim, tornar a Warning Band uma empresa reconhecida nacionalmente como referência em uso de tecnologia para salvar vidas é o grande projeto do autor deste trabalho e de seus companheiros da WB.

Outra questão que o trabalho fomentou, é que inúmeros sensores de baixo consumo de energia e baixo custo precisam ser desenvolvidos ou adaptados para utilização com as redes LPWAN e, assim, o monitoramento de áreas de risco pode ser mais efetivo do que ocorre atualmente. Na cidade de Ouro Preto, onde hoje as medições do inclinômetros são manuais,

pode-se desenvolver instrumentos elétricos que possam ser conectados à rede LoRaWAN que foi construída na cidade. Além desses instrumentos, outros que possam medir os níveis dos córregos que cortam a cidade para alertar em caso de enchentes, a umidade do solo para prevenir riscos de deslizamento de terra, além de piezômetros elétricos para monitoramento da barragem do Marzagão. Uma parceria com o NUGEO pode ser muito interessante para descobrir novas aplicações para rede de IoT da cidade, agregando ainda mais valor ao projeto.

Concluindo, este trabalho foi extremamente valioso para o autor, que objetiva com os resultados motivar e engajar a comunidade acadêmica de Ouro Preto, em especial os integrantes dos cursos de Engenharia de Controle e Automação e do mestrado profissional PROFICAM. Que os trabalhos futuros citados, possam ser desenvolvidos na academia, e que a rede de internet das coisas seja o primeiro passo para o desenvolvimento de uma cidade inteligente. A cidade de Ouro Preto tem potencial para ser uma referência no Brasil, é berço da engenharia nacional e uma referência cultural, com o engajamento da academia, novos trabalhos podem contribuir para melhorar a qualidade de vida da população.

REFERÊNCIAS

ADELANTADO, F.; VILAJOSANA, X.; TUSET-PEIRO, P.; MARTINEZ, B.; MELIA, J. Understanding the limits of LoRaWAN. p. 8–12, 2016.

ALMEIDA, A. B. A gestão do risco em sistemas hídricos: Conceitos e metodologias aplicadas a vales com barragens. Actas do 6º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, p. 647–661, 2003.

ALMEIDA, A. B. de. Curso sobre Operação e Segurança de Barragens. In: **Curso sobre Operação e Segurança de Barragens**. p. 120, 1997.

ALVES, F. A. **Modelo 2,5D de predição de propagação para ambientes interiores utilizando o método do traçado de raios**. 2005. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005. Disponível em: <<http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/handle/123456789/15267>>. Acesso em: 16 jan. 2018.

ANA. **Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens SNISB**. Disponível em: <<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/graficos/datazen>>. Acesso em: 29 maio. 2018.

ATMEL. **Single-Chip Sigfox RF Transceiver**, 2016. . Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-9409-Smart-RF-ATA8520E_Datasheet.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2018.

BALANIS, C. A. **Advanced engineering electromagnetics**. John Wiley & Sons, 1999.

BALBI, D. A. F. **Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para imundações induzidas por barragens: estudo de caso: Barragem de Peti-MG**. 2008b. UFMG, 2008. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/258M.PDF>>. Acesso em: 28 fev. 2018.

BALBI, D. F.; VIEIRA, E. C. F. Planos de emergência de Barragens na CEMIG GT. **Revista Cier**, v. 56, p. 90, abr. 2010.

BURNSIDE, W.; BURGNER, K. High frequency scattering by a thin lossless dielectric slab. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 31, n. 1, p. 104–110, 1983.

CASTRO, J. M. G. **Pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de Ouro Preto**. 2006. PÓS – GRAD Universidade Federal de Ouro Preto, 2006. Disponível em:

<http://nugeo.com.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/dissertacao-pluviosidademovimentomassa.pdf>. Acesso em: 23 out. 2017.

CAYENNE. **Cayenne Docs**. Disponível em: <<https://mydevices.com/cayenne/docs/lora/>>. Acesso em: 5 abr. 2018.

CEMADEN. **Histórico da criação do Cemaden – Cemaden**. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/historico-da-criacao-do-cemaden/>>. Acesso em: 31 out. 2017.

CEPED. Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: volume Brasil. **Relatórios Técnicos**, p. 94, 2012.

CRED. **Classification EM-DAT**. Disponível em: <<http://www.emdat.be/classification>>. Acesso em: 10 out. 2017.

CUNHA, R. D. S. da; ANDRADE, D. A. de. Risk Communication and External Emergency Plan in Angra dos Reis, Brazil. **World Journal of Nuclear Science and Technology**, v. 6, p. 301–308, 2016.

DIGI INTERNATIONAL INC. DIGI XBEE-PRO 900HP. p. 1–2, 2017.

DNPM. **Cadastro Nacional de Barragens de Mineração — Agência Nacional de Mineração**. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

DNPM. **Portaria nº 14, de 15 de janeiro de 2016 DOU de 18/01/2016**, 2016. .

DRAGINO. **Lora/GPS Shield - Wiki for Dragino Project**. Disponível em: <http://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora/GPS_Shield#LEDs>. Acesso em: 6 abr. 2018.

EGLI, P. R. **LPWAN Technologies for Internet of Things (IoT) and M2M Scenarios**. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/PeterREgli/lpwan/4>>. Acesso em: 3 nov. 2017.

FONTES, M. M. M. **Contribuição para o desenvolvimento da metodologia de análise, gestão e controle de riscos geotécnicos para a área urbana da cidade de Ouro Preto**. 2011. Universidade Federal de Ouro Preto, 2011. Disponível em: <[http://www.tede.ufop.br/tde_arquivos/13/TDE-2013-03-11T164023Z-893/Publico/NUGEO-Diss-Michel Moreira Morandini Fontes.pdf](http://www.tede.ufop.br/tde_arquivos/13/TDE-2013-03-11T164023Z-893/Publico/NUGEO-Diss-Michel%20Moreira%20Morandini%20Fontes.pdf)>. Acesso em: 12 jul. 2017.

GARCIA, L. G. U. **Aumentando o desempenho do enlace direto de redes UMTS FDD através de conceitos avançados de antenas – Uma análise sistêmica** –. 2006. Universidade

Federal do Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2006-1/2006022301-2006022301/file>>. Acesso em: 26 out. 2017.

GOES, A. G. D. A.; ARAUJO, J. B. The evolution and improvements of the external emergency plan of Angra dos Reis nuclear power plants. **2013 International Nuclear Atlantic Conference -INAC 2013**, 2013.

GUBBI, J.; BUYYA, R.; MARUSIC, S.; PALANISWAMI, M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. **Future Generation Computer Systems**, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013.

GUIMARÃES, D. P.; REIS, R. J.; LANDAU, E. C. Índices pluviométricos em Minas Gerais. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, p. 90, 2010.

HATA, M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. **IEEE transactions on Vehicular Technology**, v. 29, n. 3, p. 317–325, 1980.

HAUWEI, T. C. L. **NB-IoT - Enabling New Business Opportunities**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.huawei.com/minisite/4-5g/img/NB-IOT.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2017.

HOLM, P. D. A new heuristic UTD diffraction coefficient for nonperfectly conducting wedges. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 48, n. 8, p. 1211–1219, 2000.

HUNN, N. LoRa vs LTE-M vs Sigfox. **Creative Connectivity**, n. 1, p. 1–9, 2015.

INGENU. An Educational Guide: How RPMA Works. p. 1–5, 2015. Disponível em: <<http://www.ingenu.com/get-started/resources/>>.

INGENU. HOW RPMA WORKS: The Making of RPMA. **Www.Ingenu.Com**, p. 92, 2016a. Disponível em: <<http://www.ingenu.com/get-started/resources/>>.

INGENU. How RPMA Handles Interference. p. 6, 2016b. Disponível em: <<http://www.ingenu.com/get-started/resources/>>.

INGENU. 7 NB-IoT Surprises. p. 12, 2016c. Disponível em: <<http://www.ingenu.com/get-started/resources/>>

INTERNATIONAL RIVERS. **Human Impacts of Dams**. Disponível em: <<https://www.internationalrivers.org/pt-br/human-impacts-of-dams>>. Acesso em: 29 maio.

2018.

KOUYOUMJIAN, R. G.; PATHAK, P. H. A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 11, p. 1448–1461, 1974.

LAWTON, G. Machine-to-machine technology gears up for growth. **Computer**, v. 37, n. 9, p. 12–15, 2004.

LIN, X.; ADHIKARY, A.; SUI, Y.; BERGMAN, J.; RAZAGHI, H. S. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things (NB - IoT). p. 1–8, jun. 2017.

LORA-ALLIANCE. **A technical overview of LoRa and LoRaWAN**. Disponível em: <https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_ed71ea1cd969417493c74e4a13c55685.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2015.

LORA-ALLIANCE. **Lora-Alliance Technology**. Disponível em: <<https://www.lora-alliance.org/technology>>. Acesso em: 3 nov. 2017a.

LORA-ALLIANCE. **LoRaWAN 101 A Technical Introduction**. . Disponível em: <https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_20fe760334f84a9788c5b11820281bd0.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2017b.

LUEBBERS, R. Finite conductivity uniform GTD versus knife edge diffraction in prediction of propagation path loss. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 32, n. 1, p. 70–76, 1984.

LUIZ, S.; SANTOS, A. R. S.; BRENNER, T. L. Geração de Modelo Digital de Elevação a partir de Imagens Reference Stereo do Satélite IKONOS. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis. Florianópolis: 2007. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.15.41.56/doc/581-587.pdf>>. Acesso em: 8 nov. 2017.

MAGALHÃES, P.; FERREIRA NETO, J. A. Análise de escorregamento de encosta em Ouro Preto para minimizar eventos semelhantes em tempos futuros. v. 32, n. 10, p. 881–884, 2014.

MCT. **Criador do termo internet das coisas discute comunicação e cotidiano — Governo do Brasil**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/ciencia-e-tecnologia/2015/01/criador-do-termo-internet-das-coisas-discute-comunicacao-e-cotidiano>>. Acesso em: 12 dez. 2017.

MEIRELES, L. V.; GUILHERME, L.; GARCIA, U.; RÊGO, K. Coisas para se saber sobre a Internet das Coisas – Um Guia Prático. XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT 2018, Campina Grande, 2018.

MICROCHIP. RN2903 Datasheet. p. 1–26, 2017.

MULTI-TECH SYSTEMS INC. **MultiConnect Conduit Base Station IP67 Getting Started Guide**. Disponível em: <<http://www.multitech.net/developer/wp-content/uploads/2017/12/S000665.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2018.

NESP-PUCMINAS. Um perfil do setor produtivo de minério no Estado de Minas Gerais. **Ano III**, n. 16, 2015.

OKUMURA, Y. Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile service. **Rev. Elec. Comm. Lab.**, v. 16, n. 9, p. 825–873, 1968.

QUADRO, A. L. L. Aprendizagem, inovação e comunicação: a dinâmica evolutiva de um plano de emergência nuclear. 2014. Disponível em: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/135/46135919.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2016.

RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. Prentice Hall 1996.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low Power Wide Area Networks: An Overview. **IEEE Communications Surveys & Tutorials** **1**, p. 18, 2017. Disponível em: <http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html>. Acesso em: 15 dez. 2017.

REMCOM INC. **Wireless Insite Propagation Software**. Disponível em: <<https://www.remcom.com/wireless-insite-em-propagation-software/>>. Acesso em: 9 nov. 2017a.

REMCOM INC. **Wireless Insite User's Guide**, 2017b. .

REMCOM INC. **Wireless Insite Rerence Manual**, 2017c.

SANTOS, R. A. H. dos. **Reconstituição da ruptura da barragem das minas da Fonte Santa. Análise da propagação da onda de cheia no vale a jusante** Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2012. .

SCHLIENZ, J.; RADDINO, D. **Narrowband Internet of Things Whitepaper**. Disponível em: <[https://cdn.rohde-](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf)

[schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf)>. Acesso em: 15 dez. 2017.

SEMTECH. SX1272/73 Datasheet. n. March, p. 1, 2015. Disponível em: <<http://www.semtech.com/images/datasheet/sx1272.pdf>>.

SESDEC-RJ, S. de E. de S. e D. C. **Plano de Emergência Externo do Estado do Rio de Janeiro para Emergência Nuclear na NCAAA**. 2008.

SKLAR, B. **Digital Communications Fundamentals and Applications**. Prentice Hall, Second Edition, 2001

THE THINGS NETWORK. **The Things Network | We are building a global open free crowdsourced long range low power IoT data network**. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/>>. Acesso em: 5 abr. 2018.

U-BLOX. SARA-N2 Power-optimized NB-IoT (LTE Cat NB1) modules DATASHEET. p. 26, 2017a. Disponível em: <https://www.u-blox.com/sites/default/files/SARA-N2_DataSheet_%28UBX-15025564%29.pdf>.

U-BLOX. **NANO-S100 RPMA module**. Disponível em: <https://www.u-blox.com/sites/default/files/NANO-S100_DataSheet_%28UBX-16025707%29.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2018b.

UEMURA, S. **Instrumentos de avaliação e gestão de impactos gerados por rupturas de barragens**. 2009. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-09092009-133145/>>. Acesso em: 11 dez. 2016.

USGS. **EarthExplorer**. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 8 nov. 2017.

VANGELISTA, T. L.; ZANELLA, A.; ZORZI, M. Long-range IoT technologies: the dawn of LoRa. 2015. Disponível em: <<http://www.patavinatech.com/en/>>. Acesso em: 15 dez. 2017.

WISEU, T.; ALMEIDA, A. B. de. Gestão do risco nos vales a jusante de barragens. **Territorium**, v. 18, p. 33–42, 2011. Disponível em: <http://www.nicif.pt/riscos/Territorium/numeros_publicados>. Acesso em: 11 dez. 2016.

WANG, Y. P. E.; LIN, X.; ADHIKARY, A.; GRÖVLEN, A.; SUI, Y.; BLANKENSHIP, Y.; BERGMAN, J.; RAZAGHI, H. S. A primer on 3gpp narrowband internet of things (nb-iot). 2016. **arXiv preprint arXiv:1606.04171**, 2016.

WILLIS, M. Belief propagation tutorial. p. 1–87, 2007. Disponível em: <<http://www.mike-willis.com/Tutorial/PF1.htm>>. Acesso em: 9 nov. 2017.

WMO, W. M. O. **Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes** (Michael Williams and Sylvie Castonguay (WMO), Ed.) **WMO No. 1123**. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_998_en.html>.

WND, B. **Uma visão técnica da Rede Sigfox**. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/uma-visao-tecnica-da-rede-sigfox/>>. Acesso em: 8 dez. 2017.

WU, J. H. **CAT-M and NB-IoT Design and Conformance Test**. Disponível em: <https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/20170612-A4-JianHuaWu-updated.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2018.

YANG, C.-F.; WU, B.-C.; KO, C.-J. A Ray-Tracing Method for Modeling Indoor Wave Propagation and Penetration. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 46, n. 6, 1998. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/f693/9db60b4191dfbf6af5bf5da2c0c2a6dfc9b4.pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2017.

ZVANOVEC, S.; PECHAC, P.; KLEPAL, M. Wireless LAN networks design: site survey or propagation modeling? **Radioengineering**, v. 12, n. 4, p. 42–49, 2003. Disponível em: <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32218186/03_04_42_49.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1517342554&Signature=sA15coJ7GMfzc%2Br1hxBlAulT97A%3D&response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DWireless_LAN_Networks_Design_Site_>. Acesso em: 30 jan. 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Relação de patentes relacionadas ao projeto.

TÍTULO: “Método, e Estação Central”

Inventores: Arunkumar K., Nukala Sateesh Kumar, Senthilnathan Gnanasekaran.

Depositante: Honeywell International INC (US)

Número de Publicação: PI 10048474 (A2)

Data de publicação: 12/03/2013

Status: Pedido de patente definitivamente arquivado no INPI

O documento revela um sistema e método de monitorar zonas quanto a condições de alarme e automaticamente alertar indivíduos em uma pluralidade de zonas sobre a segurança de uma zona particular são apresentados. O método inclui fornecer um mapa de local de uma área predefinida, configurar uma pluralidade de zonas na área predefinida, receber dados de condição ambiente e dados de localização de uma pluralidade de dispositivos sem fio localizados na área predefinida, computar um nível de alarme para cada zona na pluralidade de zonas com base nos dados de condição ambiente e nos dados de localização recebidos e transmitir notificações de alerta para a pluralidade de dispositivos sem fio. A notificação de alerta enviada a cada dispositivo sem fio é baseada no nível de alarme computado da zona na qual esse dispositivo sem fio está localizado em relação ao nível de alarme computado das outras zonas na pluralidade de zonas (K., KUMAR e GNANASEKARAN, 2010).

De acordo com K., Kumar e Gnanasekaran, (2010), o sistema pode incluir uma infraestrutura sem fio, uma estação central e uma pluralidade de dispositivos sem fio (fixos ou portáteis ou móveis), por exemplo, uma pluralidade de pontos de acesso. A estação central pode incluir um conjunto de circuitos de controle, um processador programável e software de configuração e monitoramento armazenado em meio legível por computador local. Os dispositivos sem fio de acordo com a presente invenção podem ser fixos ou portáteis ou móveis e incluir conjuntos de circuitos sensores, de controle e/ou sem fio e um detector de condição ambiente e/ou uma pluralidade de sensores ou detectores. Por exemplo, um dispositivo sem fio pode incluir um detector de fumaça, um detector de calor, um detector de gás ou qualquer combinação dos mesmos (K., KUMAR e GNANASEKARAN, 2010).

O documento ainda revela que, com base no nível de alarme computado de cada zona, um algoritmo de zoneamento associado com a estação central pode determinar o tipo de alerta a ser enviado a um dispositivo sem fio, dependendo de onde esse dispositivo está localizado. A estação central pode, então, enviar notificações de alerta para a pluralidade de dispositivos sem fio na área. A estação central pode enviar uma notificação de pré-alerta para um dispositivo sem fio que está perto de uma zona ativa. A estação central pode determinar se um indivíduo associado a um dispositivo sem fio particular é conduzido na direção de uma zona ativa e enviar uma notificação pré-alerta para evitar a zona ativa (K., KUMAR e GNANASEKARAN, 2010).

TÍTULO: “System and method for managing safety of facility”

Depositante: DAWOOLENG CO LTD (KR)

Número de Publicação: KR20160121706A

Data de concessão: 20/10/2016

Status: patente concedida na Coréia do Sul sem correspondente brasileiro

O documento revela um sistema e método para gerenciar a segurança de uma instalação, que pode gerenciar contramedidas de segurança e emergência de uma instalação industrial. O sistema para gerenciar a segurança de uma instalação compreende: um dispositivo de detecção de segurança que é usado para gerenciar a segurança de uma instalação industrial baseada em comunicação máquina-máquina e internet de coisas (IoT); um servidor de gerenciamento de segurança da instalação que monitora uma situação perigosa na instalação industrial através da comunicação com o dispositivo de detecção de segurança, com base em *big data* e informações geográficas; um terminal que fornece um estado do servidor de gerenciamento de segurança da instalação para um gerente e um usuário; e um registrador de dados que é responsável pela coleta e transmissão de dados entre o dispositivo de detecção de segurança e o servidor de gerenciamento de segurança da instalação (DAWOOLENG CO LTD, 2016).

TÍTULO: “Personal hazard detection system with redundant position registration and communication ”

Depositante: UNIVERSAL SITE MONITORING UNIT TRUST (AU)

Número de Publicação: WO2016005805 (A1)

Data de publicação: 14/01/2016

Status: Pedido internacional sem entrada na fase nacional brasileira

O documento revela um sistema para monitorar a segurança de funcionários em um local de trabalho, fornecendo aos trabalhadores no local monitores de segurança com bateria portátil equipados com alarmes, sensores para detectar condições perigosas, pelo menos duas formas de localização geográfica e duas formas de telecomunicação por voz e dados, e duas CPUs compartilhando a carga de computação, cada CPU equipada para monitorar e redefinir o outro em caso de falha na função, com cada monitor capaz de servir como um nó em uma rede de malha e retransmitir informações relativas a alarmes detectados incluindo a sua localização para outros monitores na rede de malha (UNIVERSAL SITE MONITORING UNIT TRUST, 2016).

TÍTULO: “Alarm method and apparatus thereof”

Depositante: ZTE CORP (CN)

Número de Publicação: WO2016201915 (A1)

Data de concessão: 22/12/2016

Status: pedido internacional sem entrada na fase nacional brasileira

O documento revela um método de alarme e um aparelho. O método de alarme compreende: monitorar um estado operacional de um dispositivo de Internet of Things (IoT); e quando ocorre um estado anormal, destacando um ícone de apresentação em uma coordenada de localização relativa de um mapa de sistema de informações geográficas correspondente a uma coordenada de localização geográfica real do dispositivo, em que o ícone de apresentação é uma marca correspondente do dispositivo na coordenada de localização relativa do mapa do sistema de informação geográfica. O método de alarme pode efetivamente alertar sobre um estado anormal do dispositivo (ZTE CORP, 2016).

TÍTULO: “Method and system for an emergency location information service (E-LIS) for Internet of Things (IoT) devices”

Depositante: MAIER NICHOLAS M (US); EISNER GERALD R (US)

Número de Publicação: US2017238129 (A1)

Data de publicação: 17/08/2017

Status: pedido de patente americano sem correspondente brasileiro

O documento revela um método e sistema para determinar e verificar uma localização de dispositivos de rede conectados à uma rede de Internet das Coisas (IoT). O método e o sistema fornecem uma localização geográfica física atual para tais dispositivos de rede IoT e / ou um usuário do dispositivo de rede IoT em uma situação de emergência, tal como acidente, risco de saúde, aptidão física, incêndio, ataque terrorista, incidente militar, clima, evento de inundação, etc. e encaminhando a localização geográfica física atual para uma rede de emergência (R; M, 2017).