



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Pós-graduação em Engenharia Elétrica

AFONSO JANUÁRIO PUJONI SOARES

AVALIAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DO SINAL LORA E
DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA AUXILIAR O
PLANEJAMENTO DE REDES IOT USANDO OTIMIZAÇÃO DO
MODELO DE HATA

Uberlândia
2019

AFONSO JANUÁRIO PUJONI SOARES

AVALIAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DO SINAL LORA E
DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA AUXILIAR O
PLANEJAMENTO DE REDES IOT USANDO OTIMIZAÇÃO DO MODELO
DE HATA

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Uberlândia, como exigência parcial para a
obtenção do título de mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Alan Petrônio Pinheiro
Coorientador: Prof. Dr. Diego de Brito Piau

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S676a

2019

Soares, Afonso Januário Pujoni, 1964

Avaliação da propagação do sinal LoRa e desenvolvimento de um método para auxiliar o planejamento de redes IoT usando otimização do modelo de Hata [recurso eletrônico] / Afonso Januário Pujoni Soares. - 2019.

Orientador: Alan Petrônio Pinheiro.

Coorientador: Diego de Brito Piau.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.1267>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. 2. Internet das coisas. 3. Redes de computadores. 4. Redes inteligentes de energia. I. Pinheiro, Alan Petrônio, 1982, (Orient.). II. Piau, Diego de Brito, 1987, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.3

Angela Aparecida Vicentini Tzi Tziboy – CRB-6/947

AFONSO JANUÁRIO PUJONI SOARES

AVALIAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DO SINAL LORA E
DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA AUXILIAR O
PLANEJAMENTO DE REDES IOT USANDO OTIMIZAÇÃO DO MODELO
DE HATA

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Uberlândia, como exigência parcial para a
obtenção do título de mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

Alan Petrônio Pinheiro (orientador), Dr. – UFU

Diego de Brito Piau (coorientador), Dr. – UFU

Gilberto Arantes Carrijo, Dr. – UFU

Lorenço Santos Vasconcelos, Dr. – UFU

Marcelo Eduardo Vieira Segatto, Dr. – UFES

Uberlândia, 15 de março de 2019

Agradecimentos

Agradeço à minha esposa Marli pelo incentivo e apoio neste e em muitos projetos da minha vida.

Agradeço aos meus orientadores a enorme dedicação em sanar minhas dúvidas e a contribuição para tornar possível a realização dessa pesquisa.

Agradeço aos colegas de trabalho, docentes e técnicos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização desse trabalho.

Pesquisa realizada na:



Universidade Federal de Uberlândia
Programa de pós-graduação em
Engenharia Elétrica



CePEDRI - Centro de P&D em
Redes Inteligentes
www.cepedri.eletrica.ufu.br



Companhia Energética
de Brasília



Agência Nacional de Energia
Elétrica
Programa de Pesquisa e
Desenvolvimento

Financiamento e apoio:

Esta pesquisa foi financiada pela Companhia Energética de Brasília (CEB) por meio do projeto de P&D ANEEL nº 05160-1805/2018

Resumo

De acordo com o paradigma da Internet das coisas (IoT), a demanda por comunicação entre dispositivos vem crescendo continuamente. Vários padrões de comunicação surgiram e hoje competem entre si por nichos de aplicações. Entre esses padrões estão as redes de amplo alcance e baixo consumo de energia (LPWANs), que continuamente vem despertando o interesse da indústria de tecnologia da informação e telecomunicações (TIC). Em especial, a tecnologia de comunicação LoRa® vem ganhando constante destaque, especialmente em aplicações associadas a *smart grids*. Contudo, as iniciativas ainda são incipientes. Face a este cenário, este trabalho tem como um de seus objetivos avaliar alguns cenários de propagação do sinal LoRa e com base em medidas coletadas em campo, usar estes valores para alimentar um modelo adaptado de propagação. Este modelo emprega a técnica de Hata como base e pode ser usado como fonte de informação para o planejamento de redes IoT em cenários aplicáveis às *smart grids*. Além disto, alguns parâmetros de QoS também são avaliados para caracterizar o comportamento em camada física do sinal LoRa. Mesmo em diferentes cenários, os resultados mostraram que células urbanas de raio aproximado de 2 km em banda não licenciada (~915 MHz) conseguem em boa parte dos casos taxas típicas de entrega de pacotes que variam entre 75% a 100%. Com base nos modelos aqui produzidos e em associação com resultados encontrados em outras pesquisas, avalia-se que a tecnologia LoRa é uma forte candidata ao provimento de infraestrutura de comunicação para alguns serviços de *smart grids* e que os modelos gráficos de propagação aqui produzidos podem corroborar as atividades de planejamento de redes IoT.

Palavras-chave: Internet das coisas. LoRa. LPWAN. Planejamento de redes. Redes inteligentes.

Abstract

According to the Internet of Things (IoT) paradigm, the demand for communication between devices has been growing steadily. Various communication patterns have emerged and today compete with each other for application niches. Among these standards are the wide-ranging and low-power networks (LPWANs), which have continuously aroused the interest of the information technology and telecommunications (ICT) industry. In particular, LoRa® communication technology has been gaining constant prominence, especially in applications associated with smart grids. However, the initiatives are still incipient. Considering this scenario, this work has as one of its objectives to evaluate some scenarios of propagation of the LoRa signal and based on measurements collected in the field, to use these values to feed an adapted model of propagation. This model employs the Hata technique as the basis and can be used as an information source for the planning of IoT networks in scenarios applicable to smart grids. In addition, some QoS parameters are also evaluated to characterize the physical layer behavior of the LoRa signal. Even in different scenarios, the results showed that urban cells with an approximate radius of 2 km in unlicensed band (~915 MHz) typically achieve typical packet delivery rates ranging from 75% to 100%. Based on the models produced here and in association with results found in other studies, it is estimated that LoRa technology is a strong candidate for the provision of communication infrastructure for some smart grids services and that the graphic propagation models produced here can corroborate IoT network planning activities.

Keywords: Internet of things. LoRa®. LPWAN. Network planning. Smart grids.

Listas de figuras

Figura 1 - Mercados para aplicações de IoT	17
Figura 2 - Segmentação de tecnologias de conectividade para IoT	25
Figura 3 – Topologia de uma rede LoRa	26
Figura 4 - Arquitetura de uma rede LoRa.....	28
Figura 5 - Classes de dispositivos LoRaWAN.....	28
Figura 6 – Arquitetura de camadas da tecnologia LoRa.	30
Figura 7 - Sinal em <i>upchirp</i>	31
Figura 8 - Orçamento de enlace (<i>link budget</i>) LoRa.	32
Figura 9 – Simulação em 2D de um transmissor LoRa em ambiente plano	32
Figura 10 - Comparaçao dos diferentes SFs LoRa: SF7 a SF12	34
Figura 11 - ToA (Tempo no Ar) LoRa com taxa de codificação 4/5 e largura de banda de 125 KHz	35
Figura 12 - Modelo conceitual de uma SG.....	36
Figura 13 - Mapa das aplicações em SG	39
Figura 14 - Comparaçao entre as tecnologias disponíveis para IoT e WSN.	43
Figura 15 – <i>Hardware</i> utilizado.	49
Figura 16 – Fluxogramas de configuração e funcionamento.	51
Figura 17 – Etapas do método proposto.	52
Figura 18 – Gráficos do modelo de Okumura.	55
Figura 19 – Fluxograma das etapas do AG empregadas na otimização do modelo determinístico de O-H.....	60
Figura 20 – Ilustração gráfica do modelo sugerido	68
Figura 21 – Cenários considerados para análise da propagação.	73
Figura 22 – Cenários para análise da QoS.....	74
Figura 23 – Perfil de elevação geográfica para os pontos do cenário 1.....	75
Figura 24 – Perfil de elevação geográfico para o teste do cenário 7.	80
Figura 25 - Valores de RSSI medidos e previstos pelos modelos de propagação de Hata e Okumura, na cidade de Patos de Minas, utilizando SF12.....	86

Figura 26 - Valores de RSSI medidos e previstos pelo modelo de propagação de Hata, na cidade de Patos de Minas, utilizando SF12	87
Figura 27 – Propagação na área central de Patos de Minas para os pontos de dois logradouros.	90
Figura 28 - Propagação na área urbana de Uberlândia, para 3 diferentes SFs.....	92
Figura 29 - Propagação na área urbana de Brasília.....	94
Figura 30 – Medidas de QoS do cenário 1 com distribuição radial de raio de 730 m....	97
Figura 31 – Medidas do cenário 1 com distribuição linear das medições em campo.	99
Figura 32 – Medições em campo para a Rua Major Gote.	101
Figura 33 – Medidas do cenário 2: medições em campo para a Avenida Brasil.	102
Figura 34 – Medidas de QoS para a Avenida Afonso Pena, para três diferentes SF's.	104
Figura 35 – Medidas de QoS para os pontos do cenário 4, em Patos de Minas. Apenas analisado <i>downlink</i> e SF12.....	105
Figura 36 – Medidas de QoS para os pontos do cenário 5, em Brasília.....	107
Figura 37 – Disponibilidade da comunicação LoRa durante 36 horas ininterruptas, com distância entre TX e RX de 877 m.....	108
Figura 38 – Resultados para o teste rural/suburbano.	109
Figura 39 – Resultados do cenário 8, propagação em ambiente esparsamente urbanizado.	110
Figura 40 – Repetição do procedimento de otimização por AG para um mesmo conjunto de dados de modo a avaliar a variação numérica das cinco constantes do modelo de O-H.....	111
Figura 41 – Erros médios RMS por geração considerando cenários de taxas de seleção.	113

Listas de tabelas

Tabela 1 - <i>Gateways</i> LoRa comerciais para 915 MHz.....	27
Tabela 2 - Sensibilidade (em dBm) e taxa de transferência (bit/s) do receptor LoRa SX1276 para diferentes SF's e largura de banda de 125 kHz.....	35
Tabela 3 – Requisitos das aplicações para SG	40
Tabela 4 – Potenciais tecnologias SGs.....	41
Tabela 5 – Intervalo de variação dos parâmetros a serem otimizados.....	59
Tabela 6 – Cenários analisados na pesquisa.....	71
Tabela 7 – Pontos e suas respectivas distâncias do <i>gateway</i> , para a Rua Major Gote..	76
Tabela 8 – Pontos e suas respectivas distâncias do <i>gateway</i> , para a Avenida Brasil....	76
Tabela 9 – Pontos e suas respectivas distâncias do <i>gateway</i> , para a Avenida Afonso Pena.....	77
Tabela 10 - Pontos e suas respectivas distâncias do <i>gateway</i> , para os pontos dispersos do cenário 4	78
Tabela 11 – Pontos e suas respectivas distâncias do <i>gateway</i> , para o teste em Brasília, DF.....	79
Tabela 12 – Parâmetros otimizados pelo método proposto considerando os cenários aplicáveis.....	83
Tabela 13 - Erros RMS entre os valores medidos e simulados por Hata e Okumura.	86
Tabela 14 - Valores do cálculo do teste qualidade de ajuste Qui-quadrado.	88
Tabela 15 – Classificação dos pontos do cenário 4.	93
Tabela 16 - Valores do cálculo do teste qualidade de ajuste Qui-quadrado.	95
Tabela 17 – Coeficiente de correlação de Pearson para <i>uplink</i> e <i>downlink</i> para a Rua Major Gote.	115
Tabela 18 – Coeficiente de correlação de Pearson para <i>uplink</i> e <i>downlink</i> para a Avenida Brasil.	116
Tabela 19 – Padrão IEEE 1646: requisitos de tempo de comunicação para automação de subestações elétricas.....	119

Lista de abreviaturas e siglas

Abreviaturas

ABP	<i>Activation by Personalization</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
AFA	<i>Adaptive Frequency Agility</i>
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
AMR	<i>Automatic Meter Reading</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CDMA2000	<i>Code Division Multiple Access</i>
CHIRP	<i>Compressed High Radar Pulse</i>
CR	<i>Code Rate</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CS	<i>Carrier Sense</i>
CSS	<i>CHIRP Spread Spectrum</i>
D-AMPS	<i>Digital-Advanced Mobile Phone Service</i>
DAO	<i>Destination Advertisement Object</i>
DAO-ACK	<i>DAO Acknowledgment</i>
DL	<i>Downlink</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DNS	<i>Domain Name Resolution</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
EIA/TIA	<i>Electronic Industries Alliance/Telecommunication Industries Association</i>
ERB	Estação Rádio Base
FEC	<i>Forward Error Correction</i>

FSK	<i>Frequency Shifting Keying</i>
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shifting Keying</i>
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HAN	<i>Home Area Network</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LBT	<i>Listen Before Talk</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LOS	<i>Line-of-Sight</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long Term Evolution-Advanced</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MAPL	<i>Maximum Allowed Path Loss</i>
MDM	<i>Meter Data Management</i>
NAN	<i>Neighborhood Area Network</i>
NB-IoT	<i>Narrow Band IoT</i>
NLOS	<i>Non-Line-of-Sight</i>
OOK	<i>On-Off Keying</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SG	<i>Smart Grid</i>

SM	<i>Smart Meter</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
ToA	<i>Time on Air</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UL	<i>Uplink</i>
USART	<i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

Siglas

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento
CEB	Companhia Energética de Brasília
GSMA	<i>Global System Mobile Association</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
W3C	<i>World Wide Web Consortium</i>

Sumário

1 Introdução	15
1.1 Apresentação	15
1.2 Objetivos da pesquisa.....	17
1.3 Limitações e convenções	18
1.4 Justificativa	20
1.5 Contribuição.....	21
1.6 Organização do texto.....	21
2 IoT, LoRa e <i>smart grids</i>: aspectos gerais e pesquisas correlatas	23
2.1 Comunicação LoRa.....	23
2.1.1 Aspectos introdutórios.....	23
2.1.2 Arquitetura básica da rede LoRa	25
2.1.3 Classes de operação de dispositivos LoRa	28
2.1.4 Pilha de protocolos	29
2.1.5 Camada física	30
2.1.6 Parâmetros da camada física.....	33
2.2 IoT e <i>smart grids</i>	36
2.2.1 Interligação por dados: geração, transmissão e distribuição.....	38
2.2.2 Serviços vislumbrados pelas <i>Smart Grids</i>	39
2.2.3 Internet das coisas, redes de sensores sem fio e SGs	41
2.3 Trabalhos correlatos	44
2.4 Resumo do capítulo	46
3 Metodologia e desenvolvimento.....	48
3.1 Materiais empregados	48
3.1.1 Protótipo do <i>end-device</i>	48
3.1.2 Protótipo do <i>gateway</i>	50
3.2 Métodos	51
3.2.1 Pré-processamento.....	53
3.2.2 Modelos de propagação de sinais.....	53
3.2.2.1 Modelo de Okumura.....	54
3.2.2.2 Modelo de Okumura-Hata.....	56
3.2.3 Otimização do modelo de propagação usando algoritmos genéticos	57
3.2.4 Incorporação do comportamento estocástico dos sinais por meio da avaliação estatística de <i>Bootstrap</i>	63

3.2.5	Modelo de propagação otimizado	65
3.3	Experimentos	68
3.3.1	Modelo de referência, metodologia de análise e parâmetros de avaliação	69
3.3.2	Cenários analisados	71
3.3.3	Validação e análises estatísticas	80
3.3.3.1	Teste de qualidade de ajuste Qui-quadrado	81
3.4	Resumo do capítulo	82
4	Resultados e discussões	83
4.1	Análise da propagação	84
4.1.1	Análise 1: propagação em ambiente densamente urbanizado	85
4.1.2	Análise 2: otimização do modelo de Hata para o cenário 1	86
4.1.3	Análise 3: avaliação do modelo de Hata por meio do teste de qualidade de ajuste Qui-quadrado, para diferentes cenários	88
4.1.4	Análise 4: propagação em ambiente densamente urbanizado em Patos de Minas	89
4.1.5	Análise 5: propagação em ambiente densamente urbanizado em Uberlândia	91
4.1.6	Análise 6: propagação em ambiente densamente urbanizado em Brasília	93
4.1.7	Análise 7: avaliação do modelo otimizado por meio do teste de qualidade de ajuste Qui-quadrado, para diferentes cenários	95
4.2	Análise da QoS	96
4.2.1	Cenário 1: QoS em propagação radial (1a) e linear (1b)	96
4.2.2	Cenário 2: QoS em ambiente predominantemente com visada direta em Patos de Minas	100
4.2.3	Cenário 3: QoS em ambiente predominantemente com visada direta em Uberlândia	103
4.2.4	Cenário 4: QoS em ambiente fora de linha de visada (NLOS) em Patos de Minas	105
4.2.5	Cenário 5: QoS em ambiente em linha de visada (LOS) e fora de linha de visada (NLOS) em Brasília	106
4.2.6	Cenário 6: avaliação da disponibilidade da comunicação	108
4.2.7	Cenário 7: QoS em ambiente rural/suburbano	108
4.2.8	Cenário 8: QoS em ambiente esparsamente urbanizado	109
4.3	Discussões	110
4.3.1	Otimização do modelo com AG	110
4.3.2	Análise pelo modelo otimizado	111
4.3.4	Smart grids como uma aplicação para IoT-LoRa	118

4.4 Resumo e discussão geral do capítulo.....	122
5 Conclusão e trabalhos futuros	124
5.1 Conclusão.....	124
5.2 Trabalhos futuros	125
Referências	127

1 Introdução

1.1 Apresentação

As comunicações sem fio evoluíram muito nas últimas décadas indo da simples transmissão de voz, até os atuais (e complexos) serviços de Internet e rede existentes, que levam uma ampla variedade de possibilidades de aplicações ao ser humano. E neste sentido de evolução, as comunicações agora começaram a também interligar em larga escala “coisas” dos mais diversos propósitos. A este novo modelo de comunicações que visa levar comunicação aos mais variados objetos (ou processos) possíveis, criou-se o conceito de “**Internet das coisas**” (IoT – *Internet of things*). Segundo [1], a IoT é uma coleção de objetos, sensores, atuadores, *software*, eletrônica embarcada e protocolos de rede que permitem que esses objetos se conectem à Internet (ou a outra rede de dados qualquer). Essa estrutura permite que esses objetos se comuniquem trocando informações que são remotamente controladas por diferentes aplicações, o que possibilita uma integração e comunicação direta entre os mundos físico e digital.

Dado seu vulto, espera-se que a IoT produza uma enorme quantidade de informações que serão usadas para otimizar o consumo de todos os tipos de recursos e melhorar a eficiência de sistemas cada vez mais integrados. A IoT também aumentará ou criará novos serviços para oferecer valor sustentável às empresas, aos consumidores e ao ambiente em geral. Atualmente essa tecnologia já é utilizada em indústrias e empresas de serviços como a automotiva, concessionárias de serviços públicos, iluminação inteligente (de cidades), sensoriamento remoto, serviços de saúde, dentre inúmeras outras aplicações que prometem revolucionar o mundo como o vemos [2].

O impacto de abrangência da IoT chega a envolver uma previsão de conexão de bilhões de dispositivos diversos como máquinas, veículos e sensores espalhados nos mais diversos cenários [3]. Contudo, tais pretensões dependem de um esforço coletivo de

muitos agentes que devem produzir os meios para que tal escalabilidade desejada seja possível e que os muitos desafios técnicos trazidos por tal expectativa possam ser superados. E uma destas vertentes de esforço está no entendimento do comportamento de propagação do sinal (*wireless*) e na criação de ferramentas de simulação e planejamento de rede que facilitem a implantação de IoT.

Até pouco tempo, soluções tradicionais como Bluetooth®, ZigBee®, redes WAN (*Wide Area Network*) cabeadas ou de rádio, WiFi e GPRS/GSM/LTE eram as principais opções de comunicação disponíveis como infraestrutura para os propósitos de IoT. Tais soluções não reúnem, por si só, todas (ou pelo menos boa parte) as características geralmente desejadas para as aplicações que necessitam de: (i) baixo custo de planejamento e implantação, (ii) ampla cobertura, (iii) segurança, (iv) confiabilidade, (v) escalabilidade, (vi) longa vida da bateria, entre outras. Desta forma, houve necessidade de criar uma nova classe de tecnologia de rede voltada ao atendimento destes requisitos. Esta classe foi designada LPWANs (*Low Power Wide Area Network*). E é justamente nesta classe de rede que um amplo nicho de aplicações IoT está inserido. Dentre as principais tecnologias de comunicação para LPWANs pode-se citar: LoRa®, Sigfox® e NB-IoT (ou “LTE Cat NB”).

Neste sentido, esta pesquisa foca seus esforços no estudo da propagação do sinal LoRa¹. Justifica esta escolha o fato de ser entre estas opções a única que é simultaneamente (i) semiaberta² e (ii) opera em banda não licenciada (ou seja, ISM - *Industrial Sientific and Medical*). Também contribui para esta escolha a ampla aceitação que esta tecnologia vem tendo [4], uma comunidade de usuários e aplicações que cada vez mais cresce, assim como também a visibilidade que esta tecnologia vem ganhando no número crescente de trabalhos científicos que a investigam, conforme se pode evidenciar em [5].

¹ O termo LoRa é um acrônimo comercial para *long range* e é uma marca registrada. Esta dissertação vai omitir o termo de registro daqui em diante para fins de simplificação textual.

² Neste sentido, refere-se por semiaberto o fato de que o padrão LoRa de comunicação é aberto (pela LoRa Alliance), ainda que o licenciamento de seu *hardware* seja proprietário e fechado (propriedade da empresa Semtech®, EUA).

Já no que diz respeito ao campo das aplicações, a Figura 1 apresenta alguns possíveis mercados para IoT. Eles estão vinculados a setores como transporte e logística, distribuição de energia elétrica e água, cidades e edifícios inteligentes, consumidores em geral, indústria (manufatura avançada, especialmente), meio ambiente, agricultura de precisão, pecuária e climatologia. Esta pesquisa também direciona seus esforços de análise ao cenário de aplicação de *smart grids* (ou seja: mercado de energia elétrica).

Figura 1 - Mercados para aplicações de IoT.



Fonte: adaptado de [4].

1.2 Objetivos da pesquisa

Em consideração a todas as possibilidades trazidas pela IoT, mais especialmente por meio da tecnologia LoRa, entende-se que seja importante compreender os detalhes da tecnologia, suas limitações e capacidades, a fim de que se possa desenvolver uma rede de comunicação confiável e com a escalabilidade e operação desejadas. Neste sentido, esta pesquisa tem como objetivo principal:

- criar um método que possibilite a otimização de um modelo determinístico de propagação que possa incorporar parte das características de sinais LoRa

coletados em campo. Adicionalmente, permitir a este modelo identificar os limites do comportamento estocástico destes sinais coletados por meio de análises estatísticas. O resultado final deve ser a produção de um recurso gráfico capaz de oferecer à área de planejamento de redes IoT, uma referência que facilite a implantação de redes LoRa (ou similares) ou um recurso capaz de reproduzir (em simulação) com maior fidelidade, o comportamento do sinal LoRa com base em medidas empíricas.

Em decorrência deste, seguem outros objetivos secundários:

- avaliar - preliminarmente - a potencial pertinência da tecnologia LoRa para os principais serviços de *smart grid*;
- além da análise da propagação LoRa, levantar alguns dos parâmetros básicos de QoS a fim de que se possa caracterizar a disponibilidade da rede, levando em conta apenas o sinal em camada física (sem uso de protocolos);
- analisar a validade do modelo de propagação de Okumura-Hata para distâncias inferiores a 1 km, uma vez que esta região é importante para implantação de células urbanas.

1.3 Limitações e convenções

Para que os propósitos básicos desta pesquisa pudessem ser alcançados, foi necessário delimitar algumas questões e estabelecer algumas convenções para que a metodologia proposta pudesse ser realizada dentro da realidade vigente. Dentre as principais limitações, pode-se citar:

- testes realizados em ambientes de média e baixa densidade populacional. Embora desejável, não foi possível (por questões logísticas) estender os experimentos para cenários específicos vinculados às *smart grids* (*e.g.*,

subestações, redes elétricas com transformadores em operação, alta interferência eletromagnética, etc);

- foco restrito ao sinal produzido pela camada física (sem uso de protocolos de camadas superiores, especialmente o LoRaWAN);
- uso de apenas um modelo de rádio transceptor (Semtech SX1272);
- foi usado apenas um modelo de propagação (Okumura-Hata) para fins de otimização;
- foi desprezado o impacto de interferências de sinais no espectro usado pela tecnologia LoRa no Brasil (915 MHz);
- foi desprezada a influência do corpo humano sobre a propagação de sinais de RF, naqueles testes realizados com o *transceiver* posicionado nas costas do pesquisador;
- foi respeitada a legislação local³ que limita, em 915 MHz, radiações superiores a 100 mW e o tempo de radiação de sinais;
- como os propósitos deste trabalho estão mais vinculados à área de planejamento de rede, foram considerados apenas experimentos realizados em áreas externas (*i.e., outdoor*).

Com relação às convenções adotadas, podem-se citar como principais:

- as medidas de RSSI e SNR estimadas pelo próprio *transceiver* LoRa (neste caso, o SX1272) são adequadas para o propósito deste trabalho;
- os cinco parâmetros usados para adaptar o modelo de Okumura-Hata são pertinentes, especialmente porque já têm alguma aceitação na literatura científica [6].

³ Em específico, o ato nº 14448 de 4 de dezembro de 2017 da ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações).

1.4 Justificativa

Apesar das topologias e arquiteturas de redes das atuais LPWANs remontarem aos idos anos de 1980 e 1990, essa denominação surgiu há alguns poucos anos atrás. Sigfox surge no mercado em 2010, enquanto LoRa e NB-IoT, entre 2014 e 2016 [7]. No Brasil, dados divulgados pela Sigfox [8] apontam uma cobertura em todos os estados, ainda que esta esteja limitada às capitais e principais cidades. Em relação à tecnologia LoRa, tomando por base a cobertura disponibilizada pela ferramenta *mapper* da TTN [9] (*The Things Network*), verifica-se que apenas Rio de Janeiro, Curitiba, Porto Alegre, São Paulo e algumas outras cidades pontuais possuem *gateways* ativos funcionais. Considerando o modelo de negócios da tecnologia LoRa, que pode incluir tanto redes públicas como privadas, pode-se afirmar que no Brasil esta tecnologia não se encontra solidamente difundida. Por outro lado, e usando a mesma referência, LoRa encontra-se em forte expansão na Europa, por exemplo.

Levando-se em conta que um dos objetivos desta pesquisa é o fomento da aplicação da tecnologia LoRa em serviços voltados às *smart grids*, podendo as concessionárias criarem e manterem suas próprias redes LoRa-IoT privadas, encontra-se nesta ação íntimo alinhamento com o “plano nacional de Internet das coisas” [2] proposto pelo MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação) e BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento).

O uso de uma rede IoT privada é forte motivador para o uso de LoRa e pode atender a muitos interesses, uma vez que não implicaria em custos mensais com tarifas de utilização de uma rede pública de terceiros, além da segurança de seus dados não trafegarem em redes públicas. Compreender os recursos e limitações da tecnologia LoRa torna-se, assim, mandatório para aqueles que pretendem desenvolver serviços nessa área do conhecimento. Disponibilizar dados confiáveis acerca do comportamento da propagação do sinal LoRa em ambientes diversos, assim como as suas possibilidades de cobertura, de confiabilidade e escalabilidade, pode ser de grande utilidade para aqueles

que desejem desenvolver esforços de projetos nessa promissora área das Telecomunicações que está se tornando a IoT.

1.5 Contribuição

Dentro do contexto aqui previamente exposto, pode-se anunciar que esta pesquisa pretende contribuir com a área de IoT por meio da proposição de uma ferramenta ou método que busca, em alguma medida, simular de forma mais realística possível o comportamento de propagação de um sinal LoRa de forma determinística, mas também incorporando parte de seu comportamento estocástico. Ainda que os cenários ou procedimentos de coleta possam mudar, a natureza do método é preservada, podendo ser facilmente aplicado a outras tecnologias de comunicação de similar propósito.

Se associada a outras ferramentas e recursos, como a de *drive test*, espera-se futuramente construir um poderoso recurso que deve ajudar planejadores de rede a avançar na implantação de tecnologias IoT e a avaliar melhor os recursos de rede necessários para a efetividade e escalabilidade desejadas.

1.6 Organização do texto

No Capítulo 2, são apresentados trabalhos encontrados na literatura acadêmica sobre LoRa. É dado foco à camada física. São apresentados conceitos importantes e é analisado o estado da arte sobre o cenário de telecomunicações para IoT e pesquisas correlatas a esta. Também nesse capítulo é descrita alguma informação sobre os aspectos básicos de comunicação para *smart grids* para que, em capítulos posteriores, possa se estabelecer alguma correlação entre serviços de *smart grids* e IoT.

No Capítulo 3, a metodologia abordada nesta pesquisa é detalhada. Nele são apresentados os cenários de testes e seus objetivos. Também são descritos os modelos

de propagação de Okumura e Okumura-Hata (O-H) e a metodologia da otimização utilizada para adaptar os parâmetros deste último modelo, empregado como referência aqui. Esta metodologia é baseada em algoritmos genéticos. Ao mesmo tempo é também descrito como o comportamento estocástico dos sinais é incorporado na análise, por meio da estimativa de intervalos de confiança das medidas.

O Capítulo 4 traz os resultados e discussões acerca dos resultados alcançados e suas limitações. Análises da propagação e de desempenho da tecnologia LoRa também são feitos, por meio da análise dos parâmetros de QoS registrados. Finalmente, o Capítulo 5 tece as conclusões obtidas por meio dos experimentos desta pesquisa e apresenta sugestões de trabalhos futuros.

2 IoT, LoRa e *smart grids*: aspectos gerais e pesquisas correlatas

Este capítulo reúne informações sobre: (i) a tecnologia LoRa e (ii) algumas informações sobre infraestrutura de telecomunicações para serviços de *smart grids*⁴. Adicionalmente, também são descritas as principais pesquisas sobre LoRa encontradas na literatura técnico-científico. Tais tópicos visam contextualizar esta pesquisa em um cenário global. Ao mesmo tempo, espera-se que permitam ao leitor identificar, mais à frente, os pontos de convergência que estas áreas podem tomar dentro do aspecto de *tecnologias de informação e comunicação* (TIC).

2.1 Comunicação LoRa

2.1.1 Aspectos introdutórios

As famílias de redes voltadas para IoT, chamadas de LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) necessitam de alcances relativamente longos (dezenas de quilômetros), tendo ainda a necessidade de apresentar baixo consumo, com um funcionamento por meses ou até anos com a mesma bateria. Um dilema encontrado nesse tipo de rede é o alcance *versus* a baixa taxa de dados (variando de 300 bps a 5 kbps, tipicamente), o que significa que um maior alcance somente é atingido à custa de uma taxa de transferência mais baixa .

⁴ Vale destacar que neste trabalho a grande área de *smart grids* será delimitada e tratada como uma aplicação de IoT como já é reconhecido na literatura técnica [9]. Por isto, quaisquer outros aspectos vinculados às *smart grids* serão negligenciados por não ser um foco desta pesquisa.

A LoRa Alliance [11], mantenedora da tecnologia, é uma associação aberta, sem fins lucrativos, que foi iniciada por líderes da indústria de tecnologia e telecomunicações, com a missão de padronizar as LPWANs, ajudando a viabilizar iniciativas como IoT, comunicações M2M simplificadas, cidades inteligentes e outras aplicações industriais como a “indústria 4.0”. Os membros da aliança compartilham conhecimento e experiências para garantir o sucesso global do protocolo LoRaWAN⁵ [12]. Neste ponto é importante mencionar que o termo LoRa se refere à tecnologia de propagação e modulação (que é fechada), enquanto o termo LoRaWAN remete ao protocolo empregado nos *transceivers* desta tecnologia. A pilha de protocolos LoRaWAN é aberta, podendo ser alterada para atender às necessidades do desenvolvedor.

Segundo [13], a tecnologia LoRa é baseada em um esquema de modulação adaptada da modulação CSS (*CHIRP Spread Spectrum*) que foi inicialmente projetada para uso em radares nos anos 1940. Ainda hoje é largamente utilizada em comunicações militares que exigem segurança e boa imunidade a ruídos. É caracterizada por sua relativa baixa exigência de potência e robustez à degradação do sinal causada por efeitos de propagação como multi-caminhos, efeito *Doppler*⁶, *fading*⁷ e *jamming*⁸.

A técnica de modulação LoRa torna os transmissores menos onerosos financeiramente, uma vez que seu *hardware* é relativamente simplificado. Mesmo assim, seus receptores podem atingir uma sensibilidade da ordem de -130 a -140 dBm. O desempenho da modulação LoRa é superior aos métodos tradicionais como FSK e torna o padrão adequado para transmissões de longo alcance [17].

Muitas redes LPWAN instaladas utilizam uma arquitetura de rede em malha (*mesh network*) para estender seu alcance. Nesse tipo de arquitetura, um nó se

⁵ LoRaWAN é marca registrada da empresa Semtech.

⁶ Efeito é descrito como uma característica observada em ondas emitidas ou refletidas por fontes em movimento relativo ao observador, que provoca desvios em sua frequência [14].

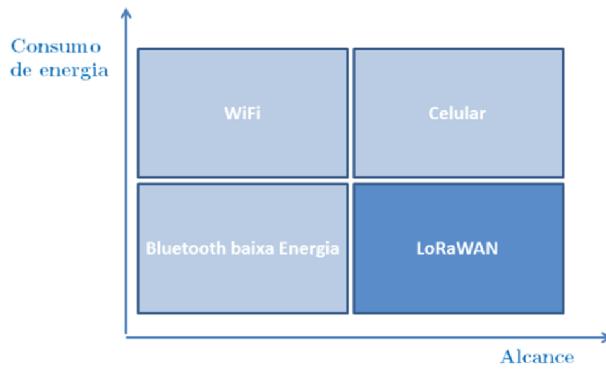
⁷ Desvanecimento: efeito causado por reflexões no solo e na atmosfera durante a propagação, que provoca alterações na amplitude e no caminho percorrido por uma onda eletromagnética [15].

⁸ Bloqueio intencional ou não intencional de um sinal por meio da irradiação de energia eletromagnética [16].

comunica com outros nós, encaminhando os pacotes de modo a aumentar o alcance da rede como um todo, mesmo usando rádios de baixa potência. Essa técnica é uma boa solução para alcançar uma maior abrangência da rede. Contudo, aumenta a complexidade e o consumo de energia dos nós, uma vez que a quantidade de dados em circulação é grande. Uma rede em topologia estrela, de longo alcance, permite reduzir a complexidade dos protocolos de comunicação e o tráfego de dados, aumentando a eficiência energética da rede, a durabilidade das baterias dos nós [18] e melhorando sua gerência e manutenção.

LoRaWAN é a implementação de camada MAC (*Medium Access Control – Controle de Acesso ao Meio*) da tecnologia LoRa e vem ganhando muita atenção quanto às possibilidades de suportar aplicações e serviços de IoT. A Figura 2 apresenta o consumo de energia *versus* o alcance para algumas tecnologias candidatas a prover comunicação em LPWANs. Nota-se que a filosofia LoRaWAN tenta se destacar nas aplicações que exigem baixo consumo de energia e grande alcance.

Figura 2 - Segmentação de tecnologias de conectividade para IoT.



Fonte: adaptado de [1].

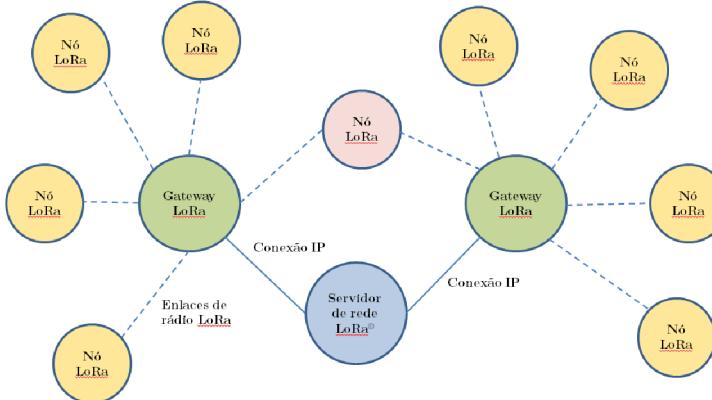
2.1.2 Arquitetura básica da rede LoRa

Uma rede LoRa típica é composta por (i) dispositivos finais (***end devices*** ou ***end nodes*** ou simplesmente “nós”) como sensores ou atuadores, também chamados de *motes*, (ii) concentradores (***gateways***) e (iii) um servidor que coleta e analisa as

informações transmitidas pelos dispositivos finais. Esses dispositivos são organizados em uma arquitetura denominada “estrela-de-estrelas”, que significa que um grupo de *end-devices*⁹ esteja conectado a *gateways* por meio de enlaces de comunicação sem fio baseada em LoRa. Já os *gateways* se conectam a um servidor remoto geralmente empregando uma tecnologia IP (*Internet Protocol*) por meio de acesso (*backhaul*) que pode ser via satélite, telefonia celular, óptico, etc [13].

A Figura 3 ilustra a topologia “estrela-de-estrelas” da rede LoRa, onde os dispositivos finais estão conectados via uma comunicação de único salto a um ou mais concentradores que, por sua vez estão conectados a um servidor de rede por meio de uma conexão padrão de Internet. Os nós enviam mensagens que podem ser recebidas por um *gateway* ou mais, que assim, reenviam ao servidor com uma mensagem da qualidade do sinal de recepção, cabendo ao servidor descartar as informações em duplicidade [19].

Figura 3 – Topologia de uma rede LoRa.



Fonte: adaptado de [19].

Dentre os dispositivos LoRa, os concentradores (ou *gateways*) são os mais complexos. Como peças chave na infraestrutura da rede, são eles que fazem a recepção das mensagens dos nós e as encaminha ao servidor de aplicação. Por isto, tem um papel

⁹ Mesmo embora este termo seja traduzido para o português como “nó”, neste texto usaremos a expressão original *end-device* para descrever o dispositivo que está na borda da rede IoT.

fundamental no projeto de uma rede e devem ser bem especificados. A Tabela 1 relaciona os principais modelos de concentradores atualmente disponíveis no mercado, considerando apenas os modelos que possuem frequências ISM utilizadas no Brasil e Américas.

Tabela 1 - *Gateways* LoRa comerciais para 915 MHz

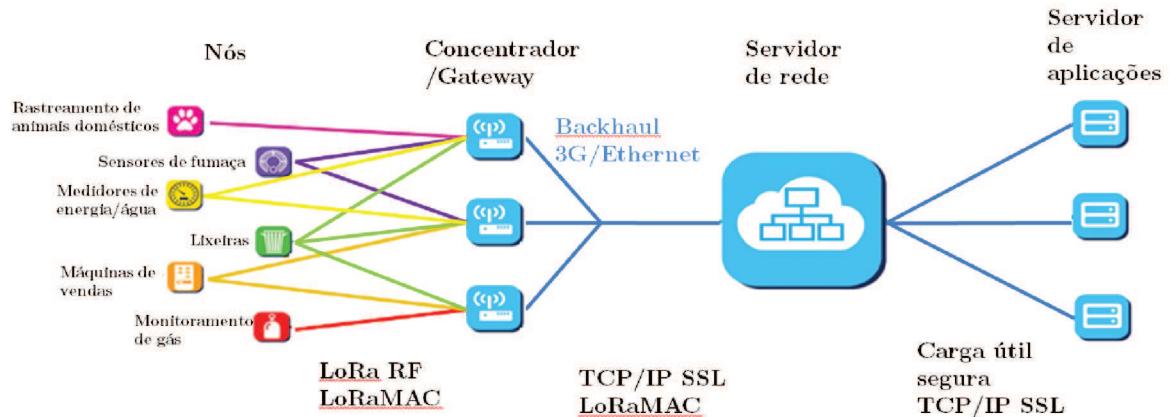
#	Características		Conectividade				
	Fabricante Modelo	Preço (US\$)	Barramento	GPS	Ethernet	3G	Wi-Fi
1	Kerlink® IoT Station	~1300	SPI	Sim	Sim	Sim	Não
2	Gemtek®	~1000	2xUSB	Sim	Sim	Sim	Não
3	Multitech® Conduit	299~450	USB	Acessório externo	Sim	Configurável	Acessório externo
4	RisingHF® RHF2S008	~750	SPI	Acessório externo	Sim	Sim	Não
5	LinkLabs® LL-BST-8	800	USB	Sim	Sim	Configurável	Configurável
6	Cisco® IXM	~2000	USB	Sim	Sim (Gigabit)	Não (4G/LTE)	Sim
7	TTN® Gateway	~350	SPI	Sim	Sim	Não	Sim
8	Dragino® LG01-P 915	98	USB	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: autoria própria.

Em uma rede LoRaWAN os dispositivos enviam dados para todos os concentradores que estão disponíveis na região. Estes, por sua vez, remetem os dados para um servidor de rede por meio de outra tecnologia de rede existente (por exemplo, rede celular, satélite ou Wi-Fi, fibra ótica, etc). A Figura 4 ilustra a ideia. Todo o processo relativo à eliminação de pacotes duplicados, segurança dos dados e envio de pacotes de reconhecimento de recebimento é responsabilidade desse servidor. Nesse tipo de rede a comunicação se dá de forma assíncrona e os nós comunicam quando têm dados para enviar, sem necessidade de agendamento ou sincronização com o concentrador, em um tipo de protocolo referenciado como método ALOHA [12].

Em redes *mesh* ou em redes síncronas, como as redes de telefonia celular, os dispositivos necessitam sincronizar antes de enviar seus dados, o que aumenta consideravelmente o consumo de energia, reduzindo a duração das baterias. Em [20], os autores analisam o consumo de energia de técnicas de comunicação sem fio e módulos em aplicações para a IoT, concluindo a adequação da tecnologia LoRa para a aplicação em redes LPWANs.

Figura 4 - Arquitetura de uma rede LoRa.

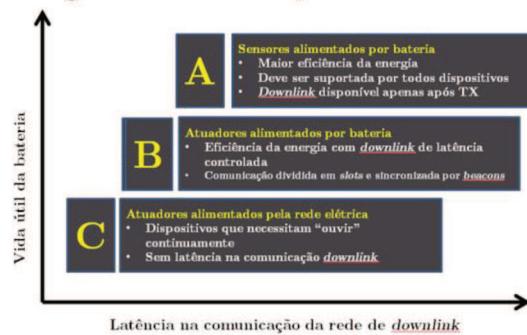


Fonte: adaptado de [21].

2.1.3 Classes de operação de dispositivos LoRa

A fim de atender às diferentes aplicações requeridas em uma rede LoRaWAN, diferentes classes de dispositivos foram implementadas no protocolo. A Figura 5 apresenta as três diferentes classes em um gráfico que associa estas classes a parâmetros de latência e tempo de vida da bateria.

Figura 5 - Classes de dispositivos LoRaWAN.



Fonte: adaptado de [22].

- **Classe A:** trata-se de dispositivos com comunicação bidirecional nos quais uma transmissão (*uplink*) é seguida por duas janelas de recepção (*downlink*). Esta classe é a que possui o menor consumo de energia e é indicada para aplicações que apenas necessitam de recepção após o dispositivo ter enviado dados ao concentrador. Uma transmissão desse para o nó deverá aguardar uma nova transmissão originada no dispositivo final. As características da classe A deverão ser suportadas por todos dispositivos.
- **Classe B:** são dispositivos com comunicação bidirecional que, além das janelas de recepção da classe A, abrem novas janelas de recepção em tempos programados, configurados no concentrador e enviados de forma sincronizada para o dispositivo final. Esta característica permite ao servidor saber quando o nó está recebendo. Utilizada por atuadores da rede, alimentados por bateria.
- **Classe C:** formada por dispositivos com comunicação bidirecional com muitas janelas de recepção. Os dispositivos dessa classe possuem janelas de recepção quase o tempo todo abertas, sendo fechadas apenas quando o dispositivo está transmitindo. Utilizada por atuadores da rede, alimentados pela rede elétrica.

2.1.4 Pilha de protocolos

Conforme tratado em [17], a tecnologia LoRa se refere a duas camadas distintas:

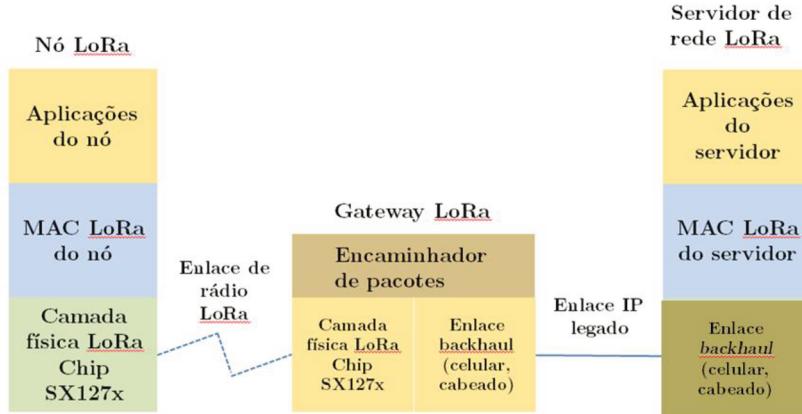
- i. camada física que utiliza a técnica de modulação de rádio CSS; e
- ii. camada de protocolo MAC (*Media Access Control*) designada por LoRaWAN, embora o sistema de comunicações LoRa também implique uma arquitetura de rede de acesso específica.

A carga útil (*payload*) de cada transmissão pode variar de 2 a 255 *bytes* e a taxa de transmissão pode alcançar até 50 kbps quando é utilizada a técnica de agregação¹⁰ de canais. A técnica de modulação LoRa é uma propriedade comercial e proprietária da

¹⁰ Neste sentido, agregação é uma técnica de compactação de dados ou canais.

empresa Semtech, enquanto o protocolo LoRaWAN é um padrão aberto. As mensagens encaminhadas entre os nós e o servidor de rede são encaminhadas de acordo com a arquitetura apresentada na Figura 6. Todos os concentradores que receberem corretamente as mensagens dos nós irão reencaminhá-las para o servidor.

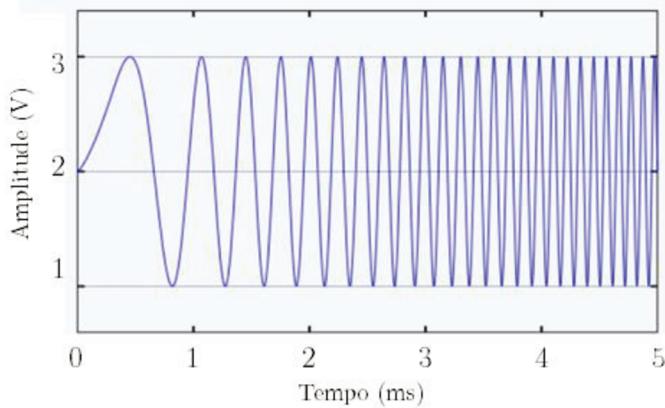
Figura 6 – Arquitetura de camadas da tecnologia LoRa.



Fonte: adaptado de [19].

2.1.5 Camada física

LoRa é a modulação utilizada para criar o enlace de comunicação. É também a camada física da tecnologia e é responsável pelo longo alcance desta. Ao contrário de outras tecnologias que utilizam a modulação FSK (*Frequency Shifting Keying*), LoRa é baseada na modulação “*CHIRP Spread Spectrum*” (espectro espalhado), que aumenta o alcance mantendo as mesmas características de baixa potência da modulação FSK [18]. CHIRP é a abreviação de “*Compressed High Radar Pulse*” e é um sinal cuja frequência aumenta ou diminui com o tempo, mantendo a amplitude constante, técnica muito comumente utilizada em sistemas de radar ou sonar. Nessa técnica o sinal percorre toda a largura de banda, de uma forma linear ou não linear, de um fim ao outro, em certo tempo. Quando a frequência varia, dentro da largura de banda, da mais baixa para a mais alta é chamada de “*upchirp*”, quando ocorre o contrário, “*downchirp*” [23]. A Figura 7 apresenta um exemplo de sinal em *upchirp*.

Figura 7 - Sinal em *upchirp*.

Fonte: adaptado de [23].

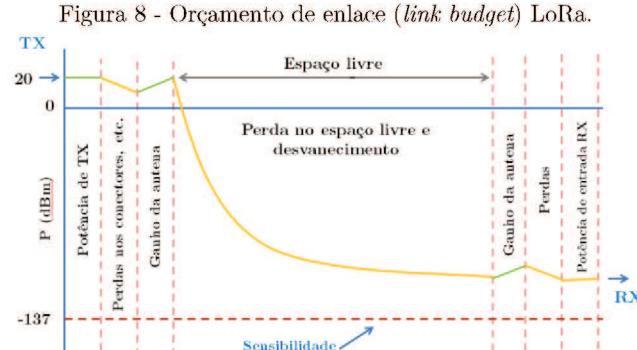
A comunicação LoRa utiliza as bandas ISM de frequências 433 MHz, 868 MHz ou 915 MHz, dependendo da legislação vigente em cada região. No Brasil é utilizada a frequência de 915 MHz, segundo regulamentação da ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações). Essa banda de frequência é dividida em canais, sendo que uma combinação de parâmetros e largura de banda determina o alcance da transmissão. Dependendo da potência de transmissão e da modulação, o *link budget*¹¹ pode alcançar até 157 dBm [25, 26]. Dessa forma é possível determinar a perda máxima permitida em percurso (MAPL - *Maximum Allowed Path Loss*), que permite avaliar o alcance do transmissor. De uma forma geral, a perda máxima em percurso pode ser expressa pela Equação (2.1),

$$MAPL = Pot_{tx} - Perdas_{tx} - Perdas_{rx} - Sens_{rx} - Perdas_{propag} + Gant_{tx} \quad (2.1)$$

onde Pot_{tx} é a potência de transmissão; $Perdas_{tx}$ são as perdas na transmissão; $Perdas_{rx}$ as perdas na recepção; $Sens_{rx}$ a sensibilidade da recepção; $Perdas_{propag}$ as perdas de propagação e $Gant_{tx}$ o ganho da antena do transmissor.

¹¹ Entende-se por *link budget* o cálculo realizado considerando a potência recebida pelo receptor em todo o percurso entre TX e RX, levando em consideração todas as perdas em equipamentos, ganhos de antenas, de amplificadores e efeitos de propagação [24].

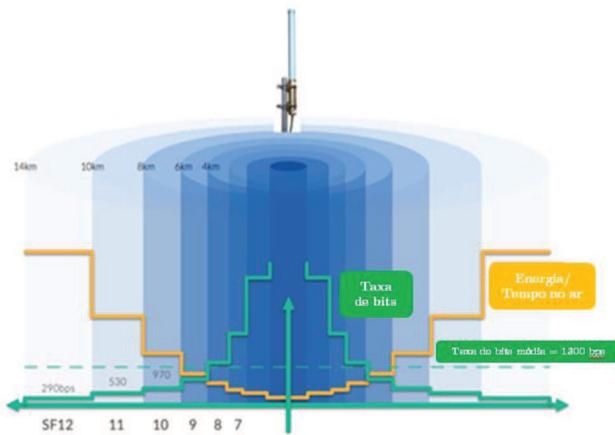
A Figura 8 ilustra esquematicamente a potência de um sinal durante seu percurso até o receptor. Nele, o sinal sai do transmissor com uma potência de 20 dBm (aproximadamente 100 mW) e a medida que vai percorrendo seu percurso, sofre ganhos e atenuações.



Fonte: adaptado de [27].

Já a Figura 9 apresenta características de propagação do sinal LoRa como alcance, taxa de transferência e consumo de energia, em função de diferentes valores de SFs (*spreading factors*) e em ambiente plano. Pode-se notar que, quanto mais elevado o SF, maior o alcance, menor a taxa de transferência, maior o ToA (*Time on Air*), que é o tempo gasto para a modulação LoRa percorrer a largura de banda do sinal (tempo de transmissão) e também maior o consumo de energia.

Figura 9 – Simulação em 2D de um transmissor LoRa em ambiente plano



Fonte: adaptado de [21].

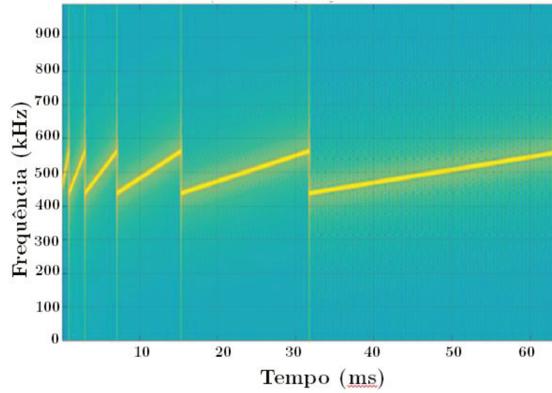
2.1.6 Parâmetros da camada física

Um típico rádio (ou *transceiver*) LoRa possui cinco parâmetros configuráveis: (i) potência de transmissão (**TP**), (ii) frequência da portadora (**CF**), (iii) fator de espalhamento (**SF**), (iv) Largura de banda (**BW**) e (v) taxa de codificação (**CR**). A combinação desses parâmetros é que determina o consumo de energia, o alcance da transmissão e a resistência ao ruído [28]. Alguns destes parâmetros são tratados na sequência.

- **Potência de transmissão** (*Transmission Power* - TP): ajustável de 2 dBm (1,5 mW) até 14 dBm (25 mW) ou 20 dBm (100 mW), dependendo do modelo do rádio.
- **Frequência da portadora** (*Carrier Frequency* - CF): frequência central que pode ser programada de 137 MHz a 1020 MHz ou de 860 MHz a 1020 MHz, também dependendo do modelo. Contudo, mesmo embora o circuito integrado do *transceiver* consiga varrer todo este espectro, os circuitos do *analog front end* limitam esta faixa.
- **Fator de espalhamento** (*Spreading Factor* - SF): é a razão entre a taxa de símbolos e a taxa de *chips*. Um aumento no SF produz um aumento na SNR (*Signal to Noise Ratio*), promovendo, assim, um aumento na sensibilidade e no alcance. Os valores para esse parâmetro são $SF \in \{7, \dots, 12\}$.
- **Largura de banda** (*Bandwidth* – BW): é a largura de frequências da banda de transmissão. Uma maior BW produz uma maior taxa de dados, mas diminui a sensibilidade devido à introdução de ruído adicional. LoRa utiliza três diferentes larguras de banda: 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz.
- **Taxa de codificação** (*Coding Rate* – CR): é a taxa de correção de erros do tipo FEC (*Forward Error Correction*) usada pelo modem LoRa que fornece proteção contra interferências e pode ser ajustada para 4/5, 4/6, 4/7 ou 4/8. Quanto maior a CR, maior a proteção, porém com um aumento no ToA.

Os símbolos LoRa são modulados sobre um *upchirp* de 125 kHz e seis diferentes e ortogonais fatores de espalhamento, ou SF (*Spreading Factors*) enumerados como SF7 a SF12. A Figura 10 ilustra o espectrograma de diferentes SFs em relação ao tempo.

Figura 10 - Comparaçāo dos diferentes SFs LoRa: SF7 a SF12



Fonte: adaptado de [23].

A modulação LoRa utiliza a definição do SF na notação logarítmica de base dois. A combinação desses parâmetros influencia a taxa de bits da modulação, sua resistência à interferência causada por ruídos e a facilidade de decodificação dos dados recebidos, sendo a BW o parâmetro mais importante. Um símbolo LoRa é composto por 2^{SF} “chirps”. A duração de um símbolo e a taxa de bit a um dado SF, são proporcionais à BW, e essa relação é dada pela Equação (2.2)

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.2)$$

A taxa de código (CR) é igual a $4/(4 + n)$, com $n \in \{1, 2, 3, 4\}$. Dessa forma a Equação (2.3) permite calcular a taxa de bit útil (R_b) como:

$$R_b = SF \frac{BW}{2^{SF}} CR \quad (2.3)$$

Por exemplo, para $BW = 125$ kHz, $SF = 7$ e $CR = 4/5$, a taxa R_b será igual a 5,5 kbps. Esses parâmetros também afetam a sensibilidade do decodificador. Desta

forma, um aumento na largura de banda diminui a sensibilidade. Uma diminuição na taxa de dados reduz a taxa de erro de pacotes (*Packet Error Rate – PER*). De outra forma, um pacote transmitido com uma taxa de 4/8 será mais resistente à interferência que um com uma taxa de 4/5. A Tabela 2 apresenta os dados constantes na folha de especificações do circuito integrado SX1276 da Semtech.

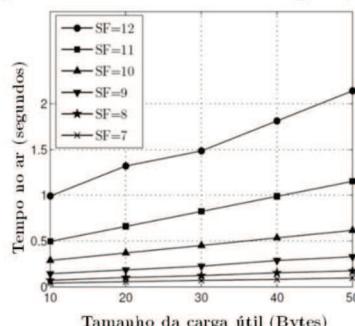
Tabela 2 - Sensibilidade (em dBm) e taxa de transferência (bit/s) do receptor LoRa SX1276 para diferentes SF's e largura de banda de 125 kHz.

Fator de espalhamento	Taxa de bit (bit/s)	Sensibilidade indicada do receptor [dBm]
12	250	-137
11	440	-135
10	980	-133
9	1760	-130
8	3125	-127
7	5470	-124

Fonte: adaptado de [29].

Um concentrador que é totalmente compatível com a tecnologia LoRa permite o processamento paralelo de até nove canais, onde um canal é identificado pela sua sub-banda específica e índice de SF [19]. A Figura 11 apresenta o tempo no ar de um pacote transmitido com taxa de codificação 4/5 sobre um canal com largura de banda de 125 KHz. Conforme citado anteriormente nesta seção, um maior valor de SF resulta em um maior alcance, porém, como pode ser notado na mesma figura, valores mais altos de SF também elevam o ToA e, consequentemente, o atraso na transmissão [30].

Figura 11 - ToA (Tempo no Ar) LoRa com taxa de codificação 4/5 e largura de banda de 125 KHz



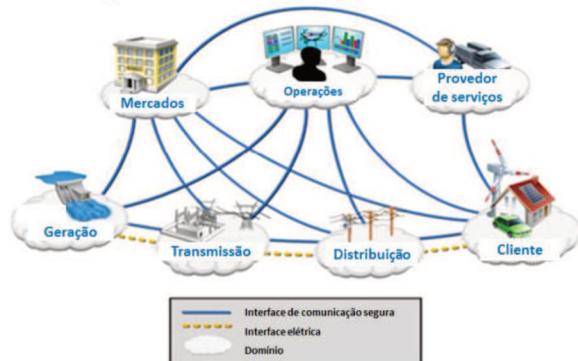
Fonte: adaptado de [30].

2.2 IoT e *smart grids*

As redes elétricas existentes foram desenvolvidas com o objetivo de prover energia de plantas de alta potência (da ordem de centenas de MVA) operando a 50 ou 60 Hz, que seriam interligadas por sistemas de distribuição AC ou DC operando em tensões altas (380 kV, por exemplo, na transmissão). Ao chegar às subestações, são geralmente reduzidas ao nível de distribuição (13,8 kV, por exemplo). Posteriormente, já próximo do consumidor final, podem ser novamente reduzidas para 110 V/220 V para alimentação de cargas residenciais, comerciais e industriais. Esse sistema foi projetado para funcionar como um sistema centralizado, onde a energia elétrica flui de forma unidirecional através das linhas de transmissão e distribuição, das unidades geradoras remotas para as instalações dos clientes.

A “inteligência” das redes está concentrada principalmente nas subestações, enquanto as cargas (leia-se clientes) são quase ou totalmente pensadas como pouco dinâmicas [31]. Por outro lado, tem-se um cenário de crescente demanda por energia, pressões ambientais e o surgimento de novas tecnologias que permitem a geração de energias renováveis, ainda que em menores volumes. Isto tem levado os governos e concessionárias de energia elétrica a investir em grandes transformações das redes elétricas existentes em um modelo mais “inteligente”. Este novo modelo é chamado de ***smart grid (SG)***. A Figura 12 apresenta os conceitos básicos de uma SG.

Figura 12 - Modelo conceitual de uma SG



Fonte: adaptado de [32].

As linhas sólidas da figura representam as interfaces de comunicação entre os diversos elementos do sistema. Já as linhas pontilhadas indicam o caminho da energia elétrica desde a geração, passando pelas linhas de transmissão e distribuição, até as unidades consumidoras finais. Neste sentido, o sistema elétrico de potência passa a ser todo interligado por informações e a fazer uso intenso de tecnologias da informação e comunicação (**TIC**). Por isto, algumas vezes, as SGs são vistas como uma aplicação de Internet das coisas (**IoT**) [33].

Mesmo em pleno século XXI, muitas concessionárias de energia elétrica não possuem capacidade real e efetiva de monitorar (tempo real) e diagnosticar alguns importantes processos da rede elétrica. Por exemplo, os sistemas de distribuição públicos possuem baixo índice de monitoramento. A maior parte dos transformadores de distribuição opera sem nenhum tipo de monitoramento em tempo real e *in loco*. Parte disto pode ser explicada por três principais fatores de natureza essencialmente tecnológica: (i) baixa quantidade de sensores instalados para esses fins, (ii) falta de redes de comunicações economicamente viáveis, e (iii) as redes de dados existentes nem sempre possuem capacidades efetivas de monitoramento e diagnóstico que atendam aos requisitos mínimos de um determinado serviço. Neste sentido, as SGs pretendem, dentre outras coisas, resolver os problemas anteriormente mencionados fazendo uso massivo de TIC.

Elas também viabilizam o uso otimizado de novas formas de energia renováveis que, não sendo despacháveis (são inviáveis de armazenamento), são dependentes de fatores climáticos como incidência solar e vento. Esta aperiodicidade gera alguns transtornos que devem ser contornados. Ainda, a potencial injeção na rede pública de um fluxo de potência produzido por uma unidade microgeradora, pode ocasionar desequilíbrios no sistema trifásico, variações de frequência e outras instabilidades que devem ser controladas por um sistema central capaz de lidar com estes cenários de forma mais eficiente possível. Toda esta demanda necessita de uma comunicação em

duas vias, a fim de que se possa regular o fornecimento e manter a qualidade e estabilidade do sistema de energia.

2.2.1 Interligação por dados: geração, transmissão e distribuição

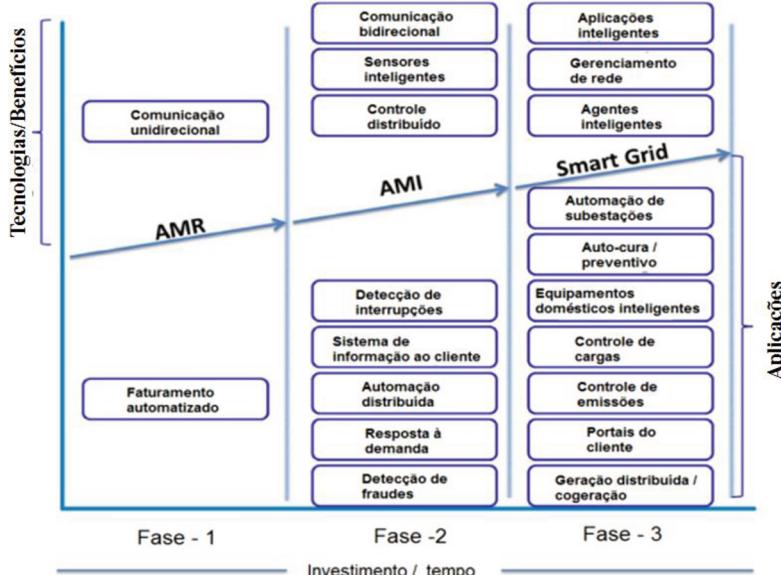
Um dos propósitos básicos, e primeiros, vislumbrados para as SGs é a viabilização de uma estrutura tecnológica para a medição automatizada (conhecida tecnicamente como **AMR** – *Advanced Metering Reading*). Trata-se, basicamente, de uma rede de comunicação(ões), geralmente unidirecional, que proporcionasse pelo menos o faturamento automático de clientes que tivessem medidores inteligentes (**SM** – *smart meters*). Conforme se ilustra na Figura 13, esta seria uma primeira fase (ou funcionalidade) para criação de um sistema elétrico padrão SG.

Em uma etapa posterior, este sistema é aperfeiçoado para um modelo que permita comunicação bidirecional e o emprego de sensores avançados, sistemas de monitoramento mais sofisticados (de consumo de energia, gerência de consumo, detecção de fraudes, etc.), sistemas de gerenciamento de dados, dentre outros. Tudo isto constituiria a dita “infraestrutura de medição automatizada” (**AMI** - *advanced metering infrastructure*).

Essa infraestrutura deve permitir à concessionária de energia a implementação de uma série de serviços pensados para as SGs. Dentre eles, pode-se citar (i) a coleta remota de dados (telemedição) nos clientes ou no monitoramento de ativos ou equipamentos da rede pública, (ii) o controle remoto de elementos da rede (telecontrole), (iii) sincronização em tempo real com os consumidores para aplicações relacionadas à tarifação inteligente, gerência do consumo, estimativa de carga preditiva baseada em perfis mais precisos de consumo, dentre outras aplicações que poderiam ser exploradas por esta série de recursos tecnológicos. Muito além da implantação de medidores inteligentes, a AMI inclui diversos sistemas para gerenciamento da rede elétrica e uma complexa rede de comunicação e infraestrutura de TIC presentes, tanto nas salas de controle da concessionária, quanto no cliente.

A Figura 13 resume este processo tecnológico evolucionário de uma perspectiva AMR para a AMI, onde foi incorporada uma série de avanços, tanto em termos de comunicações, quanto em termos de serviços prestados, especialmente.

Figura 13 - Mapa das aplicações em SG



Fonte: adaptado de [34].

Nota-se que as tecnologias de comunicação exercem papel primordial na prestação de serviços para as SGs. Contudo, a definição das melhores tecnologias de comunicação a serem utilizadas na AMI vai depender de fatores como (i) cobertura desejada para a infraestrutura, (ii) número de clientes por área, (iii) disponibilidade de conexão à Internet, (iv) da escalabilidade, (v) da taxa de dados exigida, (vi) do atraso (*i.e.*, latência) de comunicação aceito pela aplicação [13], (vii) da disponibilidade da rede, dentre outros fatores associados aos serviços que se pretende prestar.

2.2.2 Serviços vislumbrados pelas *Smart Grids*

Com a criação de uma infraestrutura TIC capaz de cobrir todas as áreas dos sistemas elétricos de potência (da geração até a distribuição), vislumbrou-se uma série de serviços, aplicações e usos que estas tecnologias poderiam oferecer. A Tabela 3 lista algumas destas principais aplicações. Todas elas com características e requisitos

(latência, banda, etc.) específicos que devem ser levados em consideração na definição de uma tecnologia para atendimento a um determinado conjunto de serviços ou aplicações para SG. Embora não haja amplo consenso aos valores apresentados, ainda assim, esses constituem, em alguma medida, um norte para o desenvolvimento de novas tecnologias de comunicação.

Tabela 3 – Requisitos das aplicações para SG

Aplicação/serviços	Largura de banda	Confiabilidade	Latência
Automação de subestação	9,6~56 kbps	99,0~99,99%	15~200 ms
Monitoramento de linha de transmissão aérea	9,6~56 kbps	99,0~99,99%	15~200 ms
Gerenciamento de energia doméstica (HEM)	9,6~56 kbps	99,0~99,99%	300~2000 ms
Infraestrutura de medição avançada (AMI)	10~100 kbps/SM	99,0~99,99%	2000 ms
Conciênciia situacional de área ampla (WASA)	600~1500 kbps	99,0~99,99%	15~200 ms
Gerenciamento de resposta à demanda	14~100 kbps	99,0%	100 ms~2 seg
Gerenciamento de interrupções	56 kbps	99,0%	2 seg
Automação da distribuição (DA)	9,6~56 kbps	99,0~99,99%	20~200 ms
Gerenciamento da distribuição	9,6~100 kbps	99,0~99,99%	100 ms~2 seg
Gerenciamento de ativos	56 kbps	99,0%	2000 ms
Gerenciamento de dados de medições	56 kbps	99,0~99,99%	2000 ms
Recurso de energia distribuída e armazenamento	9,6~56 kbps	99,0%	300 ms~2 seg
Veículo para rede (V2G)	9,6~56 kbps	99,0~99,99%	2 seg~5 min
Carga de veículos elétricos	9,6~56 kbps	99,0~99,99%	2 seg~5 min

Fonte: adaptado de [31].

Os textos mais tradicionais [35] apontam algumas tecnologias de comunicações candidatas a soluções no contexto das SGs. A Tabela 4 resume, de forma comparativa, algumas destas tecnologias.

Tabela 4 – Potenciais tecnologias para SGs.

Tecnologia	Espectro	Taxa de dados	Alcance	Aplicações	Limitações
GSM	900-1800 MHz	Até 14,4 kbps	1-10 km	AMI, Resposta de demanda	Baixa taxa de dados
GPRS	900-1800 MHz	Até 170 kbps	1-10 km	AMI, Resposta de demanda	Baixa taxa de dados
3G	1.92-1.98 GHz 2,11-2,17 GHz (licenciada)	384 kbps - 2 Mbps	1-10 km	AMI, Resposta de demanda	Taxas dispendiosas de uso do espectro
WiMAX	2,5 GHz, 3,5 GHz, 5,8 GHz	Até 75 Mbps	10-50 km (LOS) 1-5 km (NLOS)	AMI, Resposta de demanda	Não muito difundido
PLC	1-30 MHz	2-3 Mbps	1-3 km	AMI, detecção de fraudes	Ambiente com canal de elevado ruído
ZigBee	2.4 GHz, 868-915 MHz	250 kbps	30-50 m	AMI	Baixa taxa de dados, curto alcance

Fonte: adaptado de [35].

2.2.3 Internet das coisas, redes de sensores sem fio e SGs

O número de dispositivos conectados ao redor do mundo tende a crescer em um ritmo acelerado. Grande parte dessas conexões poderá ser realizada utilizando tecnologias já consolidadas de comunicação sem fio, como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, Z-Wave e outras que são adequadas para comunicação de curto alcance. Porém, o consumo de energia e a vida das baterias é hoje um grande problema para estas tecnologias convencionais. Na impossibilidade de utilizar um sistema de cabeamento e dependendo do valor comercial dos dados, pode-se utilizar a rede de telefonia celular existente ou um enlace de satélite para a coleta dos mesmos [26].

Para tratar algumas das questões levantadas anteriormente e atender as necessidades criadas pela IoT, algumas soluções foram desenvolvidas. Segundo [36], uma das questões mais relevantes do paradigma da IoT é a conectividade. Tradicionalmente, as duas principais abordagens empregadas para esta conectividade tem se baseado em (i) tecnologias de múltiplo salto utilizando comunicações de curto alcance, organizadas em uma topologia de rede em malha (*mesh*), ou (ii) nas redes de telefonia celular 2G/GSM/GPRS. Ainda, de acordo com os mesmos autores, esses

modelos tradicionais estão sendo desafiados pelo surgimento de novas tecnologias com outras características, tais como, por exemplo, alto alcance, baixo consumo de energia, alta imunidade às interferências eletromagnéticas, baixa taxa de dados, e uso de faixas de frequências não licenciadas¹² abaixo de 1 GHz¹³. Tais tecnologias tem sido empregadas para criação de comunicações de amplo alcance (redes **WAN** – *Wide Area Network*) e, em virtude de alguns de seus aspectos característicos, foram referenciadas como tecnologias para **LPWANs** (*Low Power WANs*) ou LR-LPWANs (*Long-Range LPWANs* ou *Low-Rate LPWANs*).

Estas novas tecnologias LPWAN, mais alinhadas aos preceitos de IoT, e por consequência também às SGs, estão sendo utilizadas para substituir onerosos enlaces de comunicação, especialmente os de celular. Dentre estas novas tecnologias, a **LoRa**^{®14} vem se destacando. Basicamente, ela é uma comunicação sem fio que emprega bandas abertas ISM e possui longo alcance e baixo consumo de energia.

Outra tecnologia similar, a **Sigfox**^{®15}, também tem sido amplamente comentada [39] neste contexto. Contudo, esta última é uma rede proprietária baseada em assinatura, desenvolvida pela empresa homônima, que já ergueu torres de comunicação em várias cidades e países. Essa tecnologia tem como sua maior vantagem o baixo custo dos seus rádios e como desvantagem o pagamento de taxas de uso dependentes do volume de dados transmitidos por dia [40]. Outra terceira concorrente do setor inclui a **Ingenu** [41], totalmente proprietária e que leva significante vantagem sobre as demais em relação aos requisitos de suas estações rádio base. Uma quarta solução neste contexto de IoT (e SGs) é a **NB-IoT** (*Narrow Band IoT*) [42], também conhecida por

¹² As bandas não licenciadas geralmente são chamadas de faixas ISM (*industrial scientific and medical*). Trata-se de bandas reservadas internacionalmente (podem variar de país para país) para o desenvolvimento de novas tecnologias e emprego de pequenos dispositivos de alcance limitado. Mesmo embora a faixa seja aberta, existem regulamentações próprias para seu uso.

¹³ Tecnologia geralmente referenciada como “sub-GHz”. Geralmente, quanto mais baixa a faixa de frequência, maior seu poder de propagação/alcance.

¹⁴ LoRa é uma marca registrada da Semtech [36].

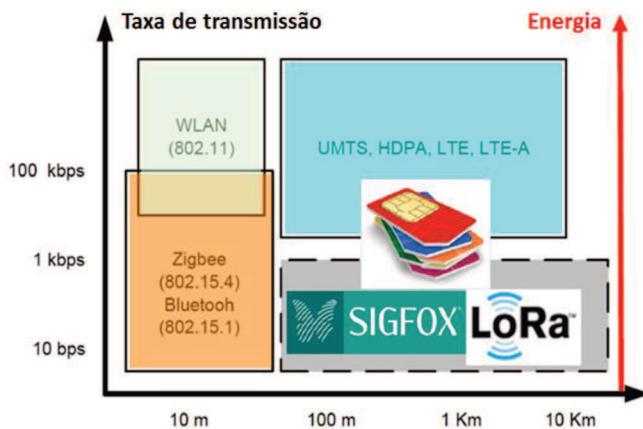
¹⁵ Sigfox é uma marca registrada da empresa homônima [37].

LTE Cat NB1. Ela utiliza as atuais redes 4G para IoT dedicando uma faixa bem limitada de seu espectro para aplicações de IoT.

Uma rede de comunicação voltada à SGs deve enfrentar condições complexas e severas intrínsecas a sua aplicação, tais como, por exemplo, interferências eletromagnéticas, obstruções, desvanecimento, etc. Em virtude disto, torna os enlaces sem fio extremamente dinâmicos e imprevisíveis. Várias tecnologias e protocolos bem conhecidos já foram avaliados e quase todos, senão todos, foram considerados insuficientes para aplicações em SGs. Os enlaces de comunicação de WSNs (*Wireless Sensors Network*) em aplicações de SGs apresentam pouca confiabilidade e qualidade volátil. Considerando a criticidade de algumas aplicações de SGs, como, por exemplo, no monitoramento de linhas de transmissão ou telecontrole de subestações, diferentes requisitos de QoS (*Quality of Service*) são necessários (ver Tabela 3).

A Figura 14 apresenta uma comparação entre o alcance e a taxa de transmissão de diversas tecnologias disponíveis para a IoT e/ou rede de sensores. Também é apresentado o consumo de energia dessas tecnologias. Pode-se notar que LoRa e Sigfox possuem longo alcance, baixo consumo de energia e baixa taxa de transmissão (abaixo de 100 kbps). Mesmo assim, ainda suficiente para atender a diversas necessidades de IoT e serviços na área de SGs.

Figura 14 - Comparaçao entre as tecnologias disponíveis para IoT e WSN.



Fonte: adaptado de [31].

2.3 Trabalhos correlatos

Mesmo embora se trate de tema recente, foi encontrada uma quantidade relativamente significativa de trabalhos relacionados à tecnologia LoRa na literatura especializada. Aqui serão abordados somente os de maior relevância. Nisto, pode-se ainda identificar dois tipos de focos apresentados por estes trabalhos: (i) no uso da tecnologia LoRa em aplicações práticas, com o objetivo de prover soluções para problemas encontrados, especialmente em circunstâncias nas quais tecnologias convencionais não eram capazes de resolvê-los; e (ii) trabalhos que focaram seus esforços nos testes de desempenho e robustez da tecnologia e de seus protocolos. Ambas as abordagens são tratadas na sequência.

Em [43] foi implementada uma solução baseada em comunicação LoRa, a fim de permitir o rastreamento de gado em ambientes desprovidos de acesso à Internet. Tal sistema envia informação de localização dos animais por meio de colares transmissores, em forma de SMS, para habitantes de localidades rurais na África subsaariana. [44] realizou um estudo da tecnologia LoRa de forma a desenvolver um sistema de vigilância visual de baixo consumo, baixo custo e longo alcance, utilizando imagens monocromáticas de baixa resolução e técnicas de compressão de imagens. Em [45] e [46], foi analisado o uso da LoRa em aplicações de IoT, como tecnologia acessível para abordar necessidades das comunidades rurais africanas. Em [47], os autores realizaram uma pesquisa sobre um sistema de leitura de medidores de consumo de água com base na comunicação LoRa.

Em [48] foi avaliado o desempenho do protocolo LoRaWAN em diferentes condições de ruído eletromagnético em um ambiente no qual o canal de comunicação é perturbado por um gerador de sinais ligado a uma antena. Os autores, em [40], realizaram uma comparação entre LoRa e Sigfox por meio da avaliação de frequência de mensagens e da qualidade da cobertura Sigfox em regiões da grande São Paulo, enquanto em [20] foi realizada uma comparação do consumo de energia entre ZigBee,

Low Power Wi-Fi, 6LowPAN e LoRaWAN. Em [19] foram realizadas discussões sobre soluções para LPWAN, com atenção especial para LoRa. Já em [26], o desempenho da camada física da tecnologia foi analisado em diferentes ambientes, na presença de múltiplos concentradores, na área do centro comercial da cidade de Glasgow, Escócia.

Ainda em [17], os autores apresentaram uma visão geral da tecnologia LoRa e uma análise aprofundada dos seus componentes funcionais foi realizada. Realizaram ainda uma avaliação das camadas física e de enlace por meio de testes de campo e simulações, apresentando propostas de melhoramentos de desempenho. Os autores de [36] apresentaram a tecnologia LoRa como uma nova abordagem para aplicações de IoT, discutindo suas vantagens sobre o paradigma estabelecido para a construção de LPWANs, comparando-a principalmente com redes 2G/GSM/GPRS, em termos de eficiência, eficácia e projeto de arquitetura. Foram realizados testes de implantação na cidade de Pádua, Itália, com análise da cobertura do sinal e um plano de cobertura para a cidade de aproximadamente duzentos mil habitantes, assim como a comparação com o número de ERBs necessário para se obter a mesma cobertura de telefonia celular. Foi concluído que a tecnologia LoRa precisaria de menor quantidade de *gateways* do que de ERBs para cobrir toda esta cidade.

Continuando, em [49] os autores realizaram a avaliação do alcance do sinal transmitido por um concentrador instalado a 24 m de altura e recebido por um *end-device* instalado no teto de um automóvel e outro em um barco, fixado no mastro da antena do rádio. Foram utilizados equipamentos comercialmente disponíveis, sendo os estudos conduzidos na cidade de Oulu, Finlândia. Resultados chegaram a alcances de 15 km em terra e 30 km de extensão na água.

Outros trabalhos, ainda que voltados a outras tecnologias de RF, procuraram analisar a propagação e ajustar os modelos de propagação aos cenários em que foram desenvolvidos. Entre eles são citados a seguir, os mais relevantes, de acordo com os objetivos dessa pesquisa.

Foram realizados em [50], estudos adicionais com o modelo de predição de Okumura-Hata para adequar seus parâmetros à comunicação de sinais de controle, na faixa de frequência de 900 MHz, no cenário de redes ferroviárias em Portugal. O objetivo do trabalho foi aplicar o modelo ajustado no processo de planejamento de cobertura dessas redes. Em [6], três desses mesmos autores, utilizando outra metodologia de abordagem no ajuste do modelo, o algoritmo genético, realizaram a validação do modelo ajustado em quatro diferentes cenários de propagação, todos relacionados à comunicação GSM-R.

Um modelo foi desenvolvido em [51], para avaliar o desempenho do protocolo LoRaWAN em termos de latência e de probabilidade de colisão. Apesar dos estudos terem sido realizados para a banda de 868 MHz utilizada na Europa, segundo os autores, a análise também é válida para outras bandas que utilizam limitação de ciclo de trabalho, como no Brasil (regulado pelo Ato 14.448 da Anatel).

Por fim, em [52] foi utilizado o método dos mínimos quadrados para ajustar quatro modelos de propagação (Okumura-Hata, CCIR, Cost231-HATA e Cost231-WIM), utilizando a tecnologia 3G, a fim de otimizar o planejamento de cobertura em cidades chinesas.

De toda forma, a grande parte dos trabalhos citados anteriormente apontou, ainda que para diferentes aplicações ou cenários, resultados encorajadores que estimulam ainda mais o estudo da tecnologia LoRa, voltada a um cenário de SGs.

2.4 Resumo do capítulo

As diversas tecnologias disponíveis para aplicação em SG foram analisadas quanto às suas características neste capítulo e foram verificados os prós e contras das principais delas. Observou-se pela análise, que uma única tecnologia não atende a todos os requisitos de uma SG, sendo necessário o uso de mais de uma, dependendo da abordagem, da criticidade da aplicação e outros fatores. A

tecnologia LoRa aparece no cenário, juntamente com outras de longo alcance e baixa potência, com potencial para uso em diferentes tipos de aplicações e serviços dentro das SGs.

Analisando os requisitos de uma SG voltada ao atendimento de serviços de redes de distribuição urbanas e rurais, os serviços de telemedicina e telecontrole aparecem ser os mais desafiadores, justamente pela dificuldade de alcance das tecnologias comuns e de seu custo. Contudo, com o surgimento de tecnologias de comunicação LPWAN, surgiu uma nova perspectiva que, em uma primeira análise, aparenta ter forte potencial de aplicação neste relevante nicho. Contudo, esta aplicação só deve ser confirmada por meio de testes e avaliações mais criteriosos da tecnologia, a título de prova de conceito. No próximo capítulo é proposta uma série de testes e avaliações da tecnologia LoRa, adotando um ponto de vista mais próximo dos serviços de SGs.

3 Metodologia e desenvolvimento

Neste capítulo é apresentada a ideia básica do método proposto para auxiliar no planejamento de redes IoT usando tecnologia LoRa. É importante destacar que, como descrito no Capítulo 1, o objetivo não é a construção de uma ferramenta final que auxilie em tal tarefa, mas sim na proposição de uma metodologia que auxilie no planejamento de implantação de redes IoT-LoRa, em cenários diversos. Desta maneira, os esforços de trabalho aqui são restritos ao desenvolvimento da ideia (ou método) e sua validação. Em virtude desta característica embrionária, boa parte do esforço metodológico aqui descrito é dada ao procedimento, análise e a avaliação das etapas que compõem o método proposto.

Tendo isto por base, este capítulo pode ser subdividido em três partes, a saber: (i) a primeira delas descreve o *setup* de *hardware* montado do *end-device* e do *gateway*, para se construir uma rede LoRa; (ii) a segunda foca nos procedimentos de simulação, modelos de propagação, otimização numérica empregando algoritmos genéticos (AG) e incorporação do comportamento estocástico ao modelo, tomando por base as medidas em campo; e (iii) por fim, os cenários de testes e coletas de dados empregados nesta pesquisa para desenvolver e validar o método proposto. Adicionalmente, uma avaliação estatística também é empregada na validação do modelo.

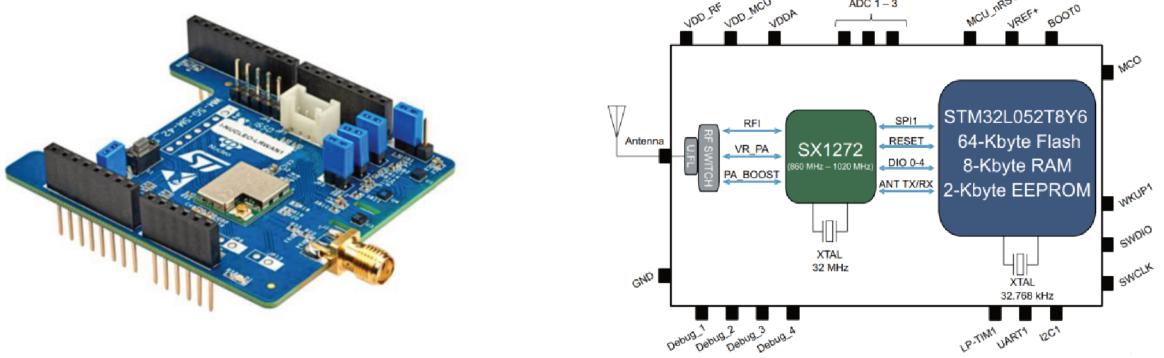
3.1 Materiais empregados

3.1.1 Protótipo do *end-device*

Os experimentos com a comunicação LoRa foram realizados utilizando-se duas unidades do módulo de comunicação I-NUCLEO-LRWAN1 do fabricante

STMicroelectronics® e USI®. Esse modelo é certificado para operar em classe A e suporta a classe C do protocolo LoRaWAN, possuindo um conector SMA e uma antena de 50Ω com 3 dBi. O rádio *transceiver* embarcado é o Semtech SX1272 que suporta modulações LoRa além de outras (FSK, GFSK, MSK, GMSK e OOK). Conforme as especificações da folha de dados do fabricante, as principais características são: alta sensibilidade de recepção (até -137 dBm) e potência de saída de 14 a 20 dBm. A Figura 15 ilustra o módulo empregado e sua arquitetura interna. As perdas de inserção¹⁶ no circuito do *analog front end* foram desprezadas.

Figura 15 – *Hardware* utilizado. (a) Módulo I-NUCLEO-LRWAN1. (b) Arquitetura interna



Fonte: adaptado de [53].

O módulo empregado tem sua configuração baseada no conjunto de comandos conhecido por “comandos Hayes” (ou simplesmente “comandos AT”) desenvolvidos nos anos 1980 pela companhia Hayes. Muito conhecidos na área técnica, seu objetivo era automatizar as ligações de comunicações entre modems por meio das linhas telefônicas convencionais da época. Tornou-se padrão mundial em 1992 com a publicação da norma EIA/TIA-602 (*Data Transmission System And Equipment - Serial Asynchronous Automatic Dialing And Control*).

¹⁶ Neste sentido, considera-se aqui como “perdas de inserção” aquelas perdas percebidas no sinal recebido pela antena que, ao passar pelo *analog front end*, ou melhor dizendo, os circuitos de condicionamento de sinais (filtros, capacitores de acoplamento, casamento de impedância dentre outros) encontrados entre o *transceiver* e a antena, recebe alguma atenuação indesejada (fruto, especialmente de baixos fatores de qualidade de componentes).

Uma vez que o *firmware* do módulo possui todos os comandos embarcados, não foi necessário utilizar-se uma biblioteca específica para a programação. Bastou enviar os comandos AT diretamente pela porta *serial* do módulo em questão. A relação de comandos, assim como a sua sintaxe pode ser consultada em [54]. Esta simplicidade decrementa o tempo de processamento dos dados podendo ser relevante para estimativas mais realísticas de alguns parâmetros de QoS (como, por exemplo, *delay* de comunicação), já que algumas destas medidas são elaboradas pelo próprio microcontrolador embarcado. Nesta pesquisa utilizou-se a plataforma ATMEGA328® com conversor USB/*serial* para enviar os comandos AT ao módulo LoRa empregado. Os pacotes LoRa recebidos pelo módulo são enviados pela porta *serial* e armazenados em um cartão de memória.

O módulo receptor, ou *end-device*, foi programado para o modo de recepção contínua na frequência central de 915 MHz, podendo ser definido o SF como desejado, por meio de comandos AT específicos.

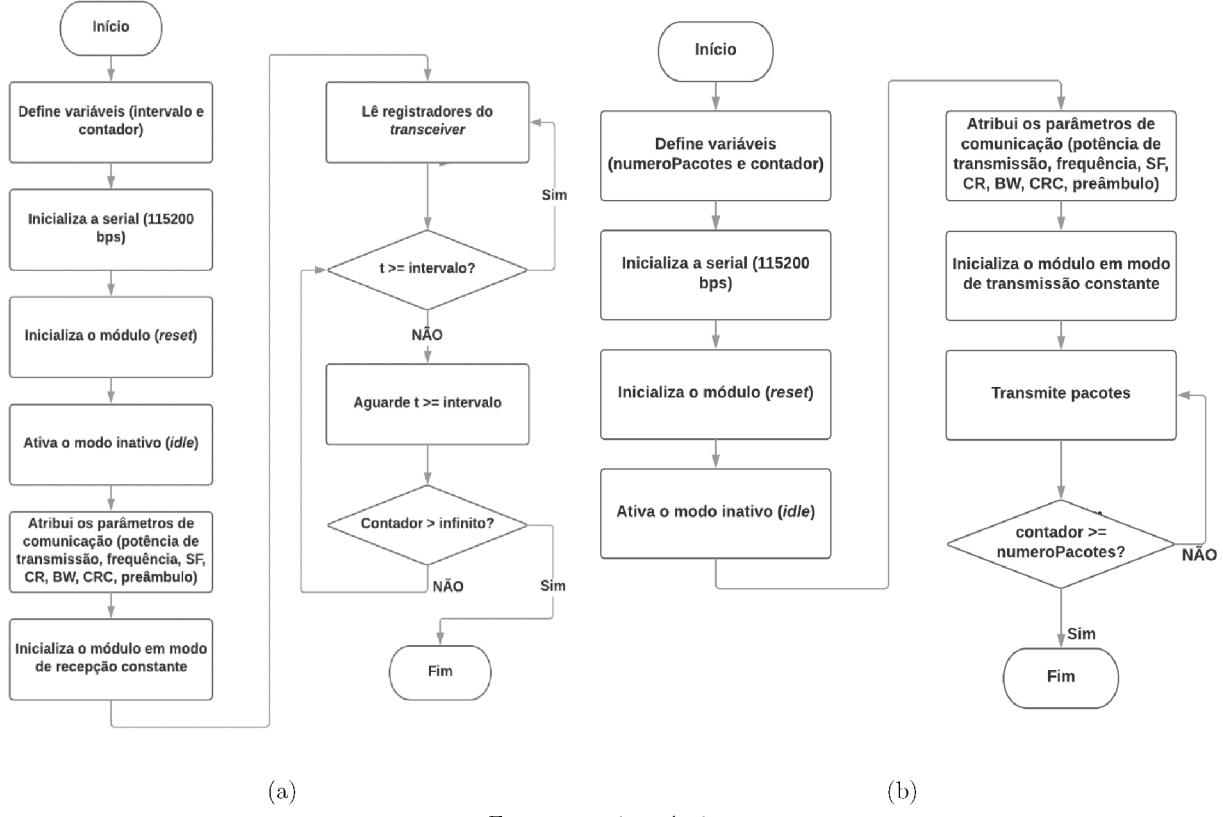
3.1.2 Protótipo do *gateway*

Considerando que a análise aqui proposta se restringe à camada física (PHY) da tecnologia LoRa, optou-se por não utilizar um *gateway* comercial, que implementa o protocolo LoRaWAN. Sendo assim, o dispositivo referenciado como *gateway* nesse trabalho trata-se de um módulo idêntico ao *end-device* que recebeu uma configuração específica para trabalhar no modo de transmissão (TX) e operar na forma mais simples possível, já que o foco está no sinal propagado/recebido e não na forma como ele é processado por protocolos de camadas superiores. Nesta pesquisa convencionou-se que o *gateway* (que geralmente é elemento de rede fixo, ao contrário do *end-device*, que pode ser móvel) iniciará a transmissão.

A Figura 16 ilustra, por fluxogramas, as etapas de programação tanto do *end-device* quanto do *gateway* para comparação. Tentou-se simplificar os códigos para que

as rotinas computacionais tivessem pouca interferência no desempenho do *transceiver* LoRa e no seu sinal gerado.

Figura 16 – Fluxogramas de configuração e funcionamento. (a) *End-device*. (b) *Gateway*.

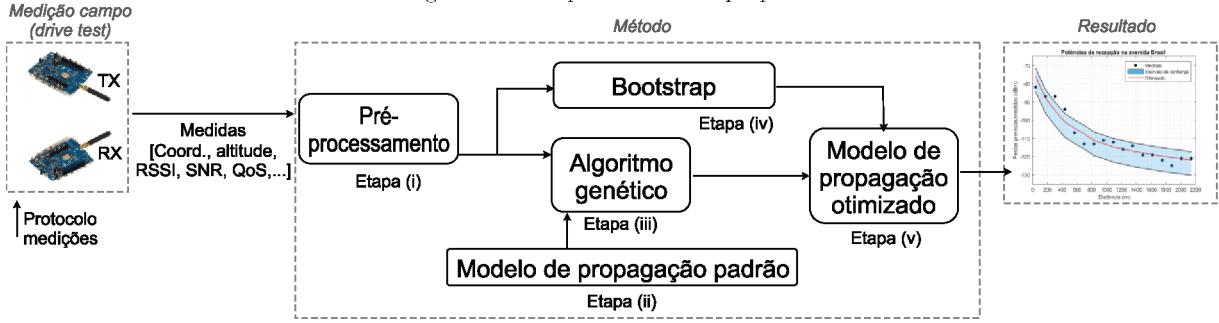


Fonte: autoria própria.

3.2 Métodos

Uma vez tendo os módulos de transmissão e recepção LoRa em funcionamento, o próximo passo é empregá-los para coletar dados e processar as medidas computacionalmente para entender e avaliar a propagação de um sinal LoRa em uma determinada área. Para entender o método aqui proposto, a Figura 17 faz um esboço de seus principais procedimentos e suas entradas.

Figura 17 – Etapas do método proposto.



Fonte: autoria própria.

Como pode ser observado, o método é composto por cinco etapas. Dessa forma, pode-se resumir o método nesta sequência: as medidas coletadas passam primeiro por uma etapa de pré-processamento, onde são filtradas para amenizar efeitos de grandes variações nas medidas (*i.e.*, *outliers*) para que as mesmas, se presentes, não afetem bruscamente os resultados. Na segunda etapa, um modelo de propagação é implementado computacionalmente e alguns de seus principais parâmetros, que originalmente são constantes, passam a ser variáveis. Nesta pesquisa usaremos o consagrado modelo de Okumura-Hata (O-H) como referência. Por meio de um algoritmo genético (etapa iii), cinco parâmetros do modelo de O-H serão variados para acomodar as peculiaridades do ambiente onde as medidas foram tomadas. Com isto, o *comportamento determinístico* da propagação será representado pelo modelo de O-H otimizado.

Como as medidas em campo também tem uma componente estocástica, esta componente será introduzida no modelo por meio da técnica de *Bootstrap*. Com isto, a cada intervalo de medida coletada, será feita uma reamostragem para definir um intervalo de confiança das medidas. Assim, ao longo da distância propagada do sinal, haverá diferentes intervalos de confiança que devem ‘absorver’, em alguma medida, o comportamento estocástico do sinal naquela região. Com isto, espera-se que esta componente possa absorver parte das peculiaridades daquela região analisada na curva, por meio desta componente estatística. Por fim, a parte determinística e a estocástica

produzida pelos mesmos dados são unificadas em um modelo expresso graficamente, que se espera ser preciosa fonte de informação para planejamento de rede IoT usando rádios LoRa.

Neste ponto é importante destacar que as medidas de QoS não são usadas pelo método. Contudo, por serem importantes indicadores de padrão de qualidade de rede, elas também são coletadas pelo processo de medição em campo e serão abordadas com alguma frequência nos resultados, acreditando que também contribuem para o processo de planejamento. As próximas subseções desta seção detalham cada uma das etapas indicadas na figura anterior.

3.2.1 Pré-processamento

A etapa de pré-processamento visa tentar amenizar os efeitos de medidas que se comportem como *outliers*, em situações onde se deseja automatismo e que estas amostram não exerçam grande influência no procedimento de otimização e análise do intervalo de confiança. Assim sendo, decidiu-se submeter as amostras de entrada a um filtro passa baixas com frequência de corte 0.5 (normalizado em 1). Este filtro é um Butterworth discreto com largura de transição de 0.1 e atenuação de 20 dB na banda de rejeição. Na presença de poucas¹⁷ medidas (inferiores a 30 amostras), o filtro não é aplicado, pois as instabilidades submetidas às amostras iniciais (*i.e.*, transitório) pela aplicação da equação de diferenças introduziriam erros desnecessários ao processo e por isto não há nenhum pré-processamento¹⁸.

3.2.2 Modelos de propagação de sinais

A transmissão de ondas de radiofrequência geralmente ocorre em áreas com irregularidades no terreno, como diferenças no perfil de elevação entre o ponto de

¹⁷ Neste caso, entende-se por poucas, uma quantidade de medidas que esteja próxima a ordem do filtro (N=10).

¹⁸ O uso de interpolação como técnica de *upsampling* poderia, em versão futura, possibilitar a aplicação de filtragem mesmo com poucas amostras.

transmissão e de recepção. Portanto, é interessante levar este fator em consideração na previsão da cobertura do sinal, devido às perdas na propagação [55]. A presença de montanhas, árvores, construções e outros obstáculos também devem ser levados em consideração. A fim de prever a perda do sinal durante o caminho de radiação, vários modelos de propagação foram propostos ao longo do tempo. Em sua maioria, os modelos foram desenvolvidos a partir de medições realizadas em campo, em diferentes áreas que se deseja cobrir. Entre estes modelos, pode-se citar o de Okumura, COST 231, Ericsson, ECC-33, SUI, série ITU-R 1546 e Hata [56-58]. Neste último caso, o de Hata¹⁹, será o modelo empregado como referência nesta pesquisa para ser adaptado aos sinais de propagação LoRa onde as medidas forem coletadas.

Sua escolha justifica-se pelo fato de ainda ser um modelo com boa aceitação na literatura técnica (*i.e.*, frequentemente referenciado na literatura técnica [6, 50, 59-61] e consolidado, especialmente no que diz respeito aos parâmetros passíveis de refinamento (*tunning*)). Independente de qual modelo escolhido, o método aqui proposto deve potencialmente se adequar à escolha de outros modelos determinísticos, uma vez que o foco não está no modelo e sim na adaptabilidade do modelo pelo procedimento aqui descrito.

As próximas subseções descrevem resumidamente o modelo de Hata. Antes, contudo, é apresentado o seu precursor: o modelo de Okumura.

3.2.2.1 Modelo de Okumura

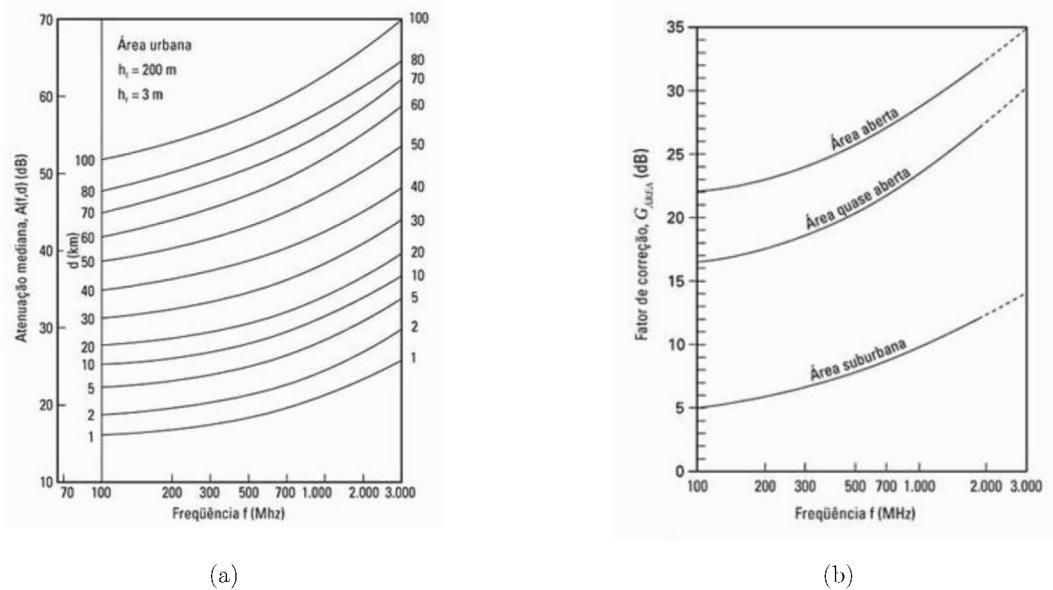
Utilizado principalmente para previsão de sinal em áreas urbanas, esse modelo é frequentemente usado [55]. Ele pode ser aplicado à faixa de frequências de 150 MHz a 1920 MHz, podendo ser extrapolado até 3000 MHz e distâncias de 1 km a 100 km, com a elevação da antena da estação base variando de 30 m a 1000 m (e da estação móvel de 1 a 10 m). Esse modelo empírico foi publicado em 1968 a partir de testes feitos no

¹⁹ Como o modelo de Hata é baseado no de Okumura, ele é frequentemente chamado de Okumura-Hata. Algumas vezes, é também chamado na literatura técnica apenas como Hata. Neste texto usaremos as duas formas.

Japão e abrange diversos tipos de ambiente, como áreas urbanas e suburbanas, áreas rurais e características como o relevo do terreno. É um método gráfico e considera alguns fatores de correção para aprimorar os resultados.

Os dados da atenuação obtidos por Okumura foram reunidos em gráficos em forma de um conjunto de curvas, apresentando a atenuação mediana (A_{mu}) para uma área urbana ‘quase plana’, com uma altura efetiva da antena da estação base (h_{te}) de 200 metros e de 3 metros para a antena da estação móvel (h_{re}). A Figura 18 apresenta as curvas descritas.

Figura 18 – Gráficos do modelo de Okumura. (a) Atenuação mediana relativa ao espaço livre ($A_{mu}(f,d)$), para um terreno quase plano. (b) Fator de correção, G_{AREA} para diferentes tipos de terreno.



Fonte: adaptado de [55].

Para se obter o valor das perdas pelo método de Okumura, inicialmente calculase as perdas no espaço livre (L_F) utilizando-se a Equação (3.1) e o valor de $A_{mu}(f,d)$ obtido a partir das curvas é somado a L_F . Também de forma gráfica, o fator de correção (G_{AREA}) é fornecido utilizando-se as curvas da Figura 18, onde podem ser vistas as curvas para área suburbana, área quase aberta e área aberta.

$$L_F = 10 \log \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (3.1)$$

O modelo pode ser matematicamente representado pela Equação (3.2),

$$L_{50}(\text{dB}) = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{\text{ÁREA}} \quad (3.2)$$

onde L_{50} é a mediana da perda no caminho de propagação, L_F é a perda de propagação no espaço livre, A_{mu} é a atenuação mediana relativa ao espaço livre, $G(h_{te})$ é o fator de ganho da antena na estação base, $G(h_{re})$ é o fator de ganho da antena da estação móvel e $G_{\text{ÁREA}}$ é o ganho devido ao tipo de ambiente. Os ganhos $G(h_{te})$ e $G(h_{re})$ são apenas uma função da altura e não dos padrões construtivos das antenas.

Okumura descobriu também que $G(h_{te})$ varia a uma taxa de 20 dB por dezena para alturas menores que 3 metros.

$$G(h_{te}) = 20 \log \left(\frac{h_{te}}{200} \right) \quad 1000 \text{ m} > h_{te} > 30 \text{ m} \quad (3.3)$$

$$G(h_{re}) = 10 \log \left(\frac{h_{re}}{3} \right) \quad h_{re} \leq 3 \text{ m} \quad (3.4)$$

$$G(h_{re}) = 20 \log \left(\frac{h_{re}}{3} \right) \quad 1000 \text{ m} > h_{re} > 30 \text{ m} \quad (3.5)$$

3.2.2.2 Modelo de Okumura-Hata

Baseado no modelo de Okumura, o modelo de Hata ou Okumura-Hata (O-H) é uma formulação matemática empírica dos valores de perdas no caminho fornecidos pelos dados daquele modelo. Esse modelo é válido para frequências de 150 MHz a 1500 MHz. A fórmula padrão fornecida por O-H apresenta a perda média no caminho para áreas urbanas e é apresentada na Equação (3.6).

$$\begin{aligned} L_{50(\text{urbano})(\text{dB})} = & 69,55 + 26,16 \log(f_c) - 13,82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) \\ & + (44,9 - 6,55 \log(h_{te})) \log(d) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Na Equação (3.6), f_c designa a frequência (em MHz), h_{te} a altura efetiva da antena transmissora (em metros e variando de 30 a 200 m), h_{re} a altura da antena receptora (em m e variando de 1 a 10 m), d a distância de separação entre TX e RX (em km) e $a(h_{re})$ o fator de correção para a altura efetiva da antena móvel, que depende do tamanho da área de cobertura. Para cidades de tamanho pequeno a médio, esse fator é dado pela Equação (3.7).

$$a(h_{re}) = (1,1 \log f_c - 0,7)h_{re} - (1,56 \log f_c - 0,8)dB \quad (3.7)$$

Para cidades grandes esse fator é dado pelas equações (3.8) e (3.9)

$$a(h_{re}) = 8,29(\log 1,54h_{re})^2 - 1,1dB \text{ para } f_c \leq 300 \text{ MHz} \quad (3.8)$$

$$a(h_{re}) = 3,2(\log 11,75h_{re})^2 - 4,97 dB \text{ para } f_c \geq 300 \text{ MHz} \quad (3.9)$$

Uma modificação na fórmula padrão de Hata é necessária para se obter a perda em áreas suburbanas, conforme apresentado na Equação (3.10)

$$L_{50}(\text{dB}) = L_{50}(\text{(urbano)}) - 2[\log(f_c/28)]^2 \quad (3.10)$$

e, para áreas rurais abertas, a modificação será dada pela Equação (3.11).

$$L_{50}(\text{dB}) = L_{50}(\text{urbano}) - 4,78(\log f_c)^2 + 18,33 \log f_c - 40,94 \quad (3.11)$$

3.2.3 Otimização do modelo de propagação usando algoritmos genéticos

Geralmente, os problemas de otimização se baseiam em três principais pontos: (i) codificação do problema, (ii) descrição matemática de uma função objetiva que traduza numericamente a otimização e (iii) a varredura pelo espaço de soluções

associado. Algoritmos genéticos (AG's) é uma técnica computacional de otimização inspirada na evolução darwiniana. Em função disto o problema específico é moldado em uma estrutura semelhante à de um cromossomo e a ele se aplicam operadores de seleção e "crossover", dentre outros, a partir de um processo computacional intenso. Este processo busca selecionar possíveis soluções matemáticas e identificar as melhores. Sua grande vantagem é poder tratar problemas de otimização não linear, evitando a convergência para mínimos locais. Por outro lado, uma de suas desvantagens é não poder garantir a melhor solução matemática possível.

Para entender tanto o funcionamento do AG como sua aplicação ao problema aqui proposto, toma-se como referência a Equação (3.12). Ela é a equação principal do modelo de O-H, porém com cinco constantes convertidas em parâmetros que serão variados pelo AG (ver Equação 3.13). Esta adaptação foi feita com base em estudos anteriores [6] onde os autores sugeriram que cinco constantes do modelo original poderiam ser convertidas em variáveis (aqui designadas como a_1 , a_2 , a_3 , b_1 e b_2), para que estas pudessem acomodar ou ‘personalizar’ o comportamento específico de propagação de um dado sinal, em uma dada área.

$$\begin{aligned} L_{50(\text{urbano})(dB)} = & 69,55 + 26,16\log(f_c) - 13,82\log(h_{te}) - a(h_{re}) \\ & + (44,9 - 6,55\log(h_{te}))\log(d) \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$L_o = a_1 + a_2\log(f_c) - a_3\log(h_{te}) - a(h_{re}) + (b_1 - b_2\log(h_{te}))\log(d) \quad (3.13)$$

Deste modo, a ideia básica de aplicação do AG é buscar alterar estes cinco parâmetros simultaneamente, para que a Equação (3.12) reproduza da melhor forma possível os dados medidos em campo. Para isto, foi definido um intervalo de variação (ou espaço de busca) para estes parâmetros, a partir de observações empíricas. Este intervalo é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Intervalo de variação dos parâmetros a serem otimizados.

Parâmetro	Valor original	Mínimo	Máximo
a ₁	69,55	60	80
a ₂	26,16	15	35
a ₃	13,82	-6	-20
b ₁	44,9	30	50
b ₂	6,55	-5	-20

Fonte: autoria própria.

Na terminologia de AG, cada possível solução é chamada de ‘indivíduo’ (ou cromossomo) e foi definida como um vetor na forma $\alpha_i = [a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, b_{1i}, b_{2i}]$, onde i expressa o índice do indivíduo (ou cromossomo). Cada um dos cinco parâmetros é chamado de *gene* em referência a terminologia biológica em que o AG é inspirado. Uma população, ou geração, é um conjunto de k indivíduos que são processados e combinados em uma mesma iteração do AG. Deste modo, temos que $1 \leq i \leq k$. Nesta pesquisa empregou-se uma população de 10000 indivíduos por geração (ou seja, $k = 10000$).

Cada indivíduo α_i tem seus genes sorteados aleatoriamente (ou randomicamente) dentro do intervalo descrito na Tabela 5. Para saber se este indivíduo tem uma boa ‘aptidão’ com as medidas coletadas, seus cinco genes são atribuídos à Equação (3.12) e o modelo de propagação é simulado para produzir uma curva de perdas. Esta curva simulada é comparada - ponto a ponto - com as medidas coletadas em campo experimentalmente. Esta comparação é feita por meio da função objetiva que é descrita pela Equação (3.14)

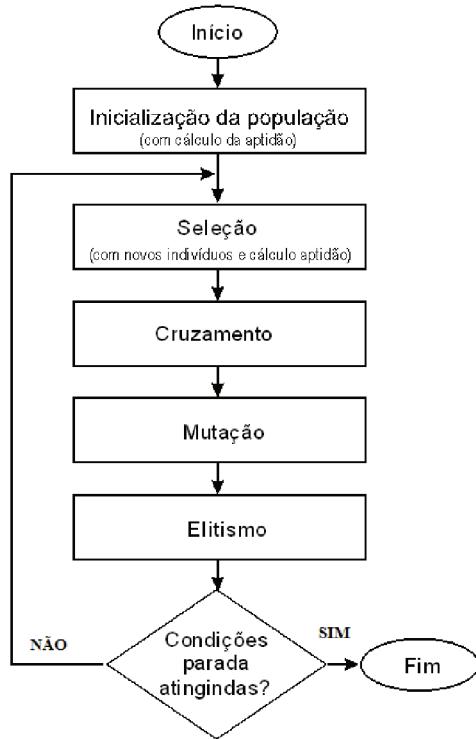
$$E_{i(dBm)} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (L_{s,n} - L_{m,n})^2}{N}} \quad (3.14)$$

onde L_s é o valor simulado pelo modelo de propagação usando os genes (ou parâmetros) do indivíduo α_i e L_m é o valor RSSI medido em campo (em dBm) das N amostras coletadas a diferentes distâncias entre TX e RX. Resumidamente, esta equação representa o erro quadrático médio entre as medidas simuladas e as coletadas em

campo. Quanto menor o valor de E_i , mais próximo estão as medidas obtidas entre o modelo simulado L_s e as coletadas L_m . Assim, um indivíduo ‘apto’ é aquele com menor E . Definidas estas condições, aplica-se o algoritmo que é esquematicamente ilustrado na Figura 19 e descrito em detalhes no parágrafo seguinte.

O processo tem início a partir da inicialização da população. São criados 10000 indivíduos. Cada indivíduo, como já descrito, tem cinco cromossomos que constituem o vetor ϕ_i contendo os parâmetros $[a_1, a_2, a_3, b_1, b_2]$ dentro dos limites descritos pela Tabela 5.

Figura 19 – Fluxograma das etapas do AG empregadas na otimização do modelo determinístico de O-H.



Fonte: autoria própria

Esses cromossomos são sorteados aleatoriamente dentro desse intervalo, gerando a população inicial. Cada indivíduo deve ter a sua função de aptidão calculada, tomando por base a Equação (3.14). Com isso, tem-se 10000 indivíduos e cada um com

sua respectiva aptidão (ou seja, erro em função as medidas coletadas). Quanto menor o valor do erro E , mais apto é aquele indivíduo.

Logo em seguida é aplicado o processo de **seleção**. Nessa pesquisa o processo de seleção contemplou cerca de 20% da população original. Isto quer dizer que dos 10000 indivíduos, apenas 2000 se manterão naquela população, enquanto os demais, cerca de 8000 indivíduos, serão excluídos da população original. Em seu lugar, serão gerados – aleatoriamente – novos indivíduos, conforme passo descrito anteriormente, na inicialização da população. Isto quer dizer que 80% de novos indivíduos são gerados a cada geração! Tradicionalmente esse valor de 20% tende a ser maior em aplicações convencionais. Nesse trabalho optou-se por utilizar uma baixa taxa de seleção de indivíduos para introduzir uma grande variabilidade genética, ainda que isto possa prejudicar o erro médio de cada geração.

O processo de seleção é realizado pela ‘regra da roleta’. Nela, a cada indivíduo é atribuída uma probabilidade de se manter naquela população. Essa probabilidade é em função da sua aptidão. Quanto maior a aptidão, maior é a probabilidade daquele indivíduo se manter naquela população original. Assim, esse processo de seleção tenta manter os indivíduos mais aptos, enquanto os demais 80% menos aptos, tem maior chance de serem retirados da população. Os novos indivíduos gerados têm sua função de aptidão calculada.

Na sequência do AG é realizado o processo de **cruzamento**. A taxa de cruzamento no algoritmo aqui implementado é de 40%. Isto indica o percentual de indivíduos da população inicial que passará pelo procedimento de cruzamento. O cruzamento acontece aos pares, onde dois indivíduos são sorteados aleatoriamente dentro da população (de 10000 indivíduos). Este par, originalmente denominado de pai 1 e pai 2, terá um de seus cinco genes aleatoriamente selecionados.

Em um exemplo hipotético, vamos considerar que o gene selecionado seja o gene 4. Isso quer dizer que o gene 4 do pai 1 é trocado com o gene 4 do pai 2. Após essa

troca são gerados o filho 1 e o filho 2. Nesse algoritmo específico, optou-se por um cruzamento ‘forçado’. Isto significa que é verificado se o melhor filho gerado é melhor que os dois pais. Ou seja, espera-se que, com o cruzamento dos dois pais, se gere pelo menos um filho que tenha função de aptidão melhor que o pai 1 ou o pai 2. Caso isso aconteça, o melhor filho substitui o pior pai, os dois indivíduos retornam para a população original e um novo procedimento de cruzamento é feito, até que 2000 cruzamentos aconteçam, de modo a se obter uma taxa de 4000 indivíduos que cruzaram entre si. Por outro lado, se nenhum dos dois filhos for melhor que os pais, esse processo entre os dois pais é refeito, selecionando-se outro gene. Uma vez que se tratam de 5 genes, o cruzamento ocorre pelo menos 5 vezes, até que se gere um filho com função de aptidão melhor. Mesmo que esse processo seja repetido 5 vezes e não se gere um filho melhor, os dois pais são retornados para a população original e nenhum cruzamento é contabilizado. Com isso espera-se que o cruzamento sempre produza pelo menos um filho melhor que os pais.

Dando sequência ao algoritmo, a próxima etapa é a **mutação**. A ideia da mutação é selecionar uma determinada quantidade de indivíduos que, nesta pesquisa, foi definida em 1% da população. Estes indivíduos selecionados terão algum dos seus cinco genes alterados de forma aleatória (tanto a posição do gene quanto seu valor). A intenção do processo de mutação é tentar introduzir uma variabilidade genética a mais. No caso específico, 100 indivíduos são selecionados aleatoriamente, cada um por sua vez. Uma vez selecionado o gene do indivíduo, este é reintroduzido na população original com o objetivo de elevar a variabilidade genética, por meio da mutação.

Vale ressaltar que no processo anterior, de seleção, já se empregou uma taxa de seleção que permitiu alta variabilidade genética na população. Mesmo assim, empregou-se o recurso da mutação para garantir características originais do AG e tornar possível a variabilidade genética em indivíduos que foram selecionados pela regra da roleta e não passaram por processo de cruzamento (o cruzamento apenas troca genes e não

produz novos). A variabilidade genética ajuda a percorrer um espaço de busca da solução maior.

Finalmente, depois de passar por todo o processo de inicialização da população, cálculo de aptidão, seleção, cruzamento e mutação, tem-se o último processo do algoritmo: o seletismo. Este tem o objetivo de selecionar o indivíduo mais apto (aquele com menor erro) garantindo que ele esteja presente na próxima geração. Na sequência o AG verifica as condições para iniciar uma nova geração e repetir todo o procedimento. Para isto duas condições são testadas: (i) se o número máximo de gerações não foi extrapolado (nessa pesquisa empregou-se o número máximo de gerações igual a 40); e (ii) se já existe um indivíduo (ou solução) que atingiu um erro tolerável (que nesta pesquisa é de 2 dBm). Logo, neste último caso, quando o melhor indivíduo (recém-selecionado pelo elitismo) assume um erro igual ou inferior a 2 dBm, não será necessário processar uma nova geração. Admite-se que já foi obtida uma solução que pode ser caracterizada como suficiente e, por esse motivo, o AG é finalizado, retornando o melhor indivíduo como solução para o problema de otimização.

3.2.4 Incorporação do comportamento estocástico dos sinais por meio da avaliação estatística de *Bootstrap*

Os métodos estatísticos computacionais denominados *Bootstrap*, são métodos que utilizam intensivamente os recursos computacionais e se tornaram largamente utilizados por meio do trabalho pioneiro de Bradley Efron [62]. Estes métodos são geralmente utilizados para estimar desvios padrão e cálculo de intervalos de confiança.

A técnica utiliza reamostragem, que consiste em sortear dados de uma amostra, previamente coletada de uma população de interesse, para se formar novas amostras. A partir da criação de múltiplas amostras da amostra original, a técnica necessita apenas do poder computacional para estimar um valor estatístico de uma amostra. De acordo com o citado trabalho, há diversas técnicas de reamostragem, dentre elas os métodos *Jackknife* e *Bootstrap*. Em [63] os autores analisam de forma rápida o primeiro e, de

forma mais aprofundada, o método *Bootstrap*, além de apresentarem uma avaliação empírica do seu desempenho na construção de intervalos de confiança. Foram avaliados conjuntos de dados simulados (dos quais se conhecia as distribuições de probabilidades) tanto simétricas (a distribuição Normal) quanto assimétricas (as distribuições de Poisson e a Exponencial), além de dados experimentais (dos quais não se conheciam as distribuições).

O método *Bootstrap* tem, entre uma das suas vantagens, a generalidade com que pode ser aplicado, não necessitando de diferentes fórmulas para cada problema, não dependendo da distribuição original da estatística do parâmetro estudado que, muitas vezes, não é conhecida de antemão [63].

Para se aplicar o método *Bootstrap* é necessário colher uma amostra de tamanho n , que será denominada de amostra mestre. Essa amostra deve representar a população analisada e deve ser coletada de forma bem planejada, a fim de cumprir esse papel. As reamostras dessa amostra mestre representam o que se deve obter quando são retiradas muitas amostras da população original. Para se garantir a confiabilidade da técnica é necessário realizar, a partir da amostra mestre, centenas ou até milhares de reamostras do mesmo tamanho n .

Para entender o método, considere que seja dada a amostra (y_1, y_2, \dots, y_n) . Retira-se dela uma amostra de tamanho n , com reposição. Essa será a amostra *Bootstrap* tal que $B = (y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*)$. Cada y_i^* é uma escolha aleatória de (y_1, y_2, \dots, y_n) . Faz-se isso para $j = 1, 2, \dots, m$ e calcula-se de cada uma das amostras *Bootstrap*, β_j . A distribuição $\widehat{\Theta}_J$ é a distribuição *Bootstrap* do estimador Θ . As estimativas *Bootstrap* do desvio e da variância de Θ são derivadas dessa distribuição.

Para melhorar a confiabilidade do modelo de propagação, foi incluído o cálculo do **Intervalo de Confiança** (IC). Ele trata de um intervalo de tolerância, para mais ou para menos, nos valores previstos pelo modelo ajustado, mantendo uma margem de segurança de 95% (este valor pode variar apesar de ser o habitual). Isto implica dizer

que, se as medidas forem repetidas nas mesmas condições, espera-se que 95% delas ocorram dentro deste IC.

Alguns métodos de obtenção de intervalos de confiança utilizando o método *Bootstrap* são: *Bootstrap p*, *Bootstrap* percentil e *Bootstrap BCa*, que ajusta o intervalo de confiança em relação à assimetria. Os intervalos de confiança foram calculados para duas vezes o desvio padrão das medidas de RSSI realizadas em cada ponto de medições, nos vários cenários pesquisados.

Os intervalos gerados via o método percentil-t tem a forma:

$$\hat{\gamma} - t_1 s(\hat{\gamma}) \leq \gamma \leq \hat{\gamma} + t_2 s(\hat{\gamma}) \quad (3.15)$$

Onde $s(\hat{\gamma})$ é o desvio padrão estimado de $(\hat{\gamma})$. As quantidades t_i são determinadas com base na distribuição *Bootstrap* de $(\hat{\gamma})$. Nesse trabalho utilizou-se a função *bootci* do Matlab, que utiliza o método *Bootstrap BCa* por padrão, a fim de se calcular o intervalo de confiança para os valores previstos pelo código otimizado. A função recebe o número de reamostragens desejadas, a função de análise (nesse caso o dobro do desvio padrão das amostras daquele ponto) e o conjunto de amostras coletado. Seu retorno são os valores inferior e superior do intervalo de confiança, IC.

Baseado em [63], onde os autores realizaram avaliações da precisão dos IC para diferentes valores de reamostragem (50, 100, 500 e 1000) e concluíram que os melhores resultados foram obtidos para o maior valor (1000 amostras), esse valor foi adotado para todos os cálculos realizados.

3.2.5 Modelo de propagação otimizado

Finalmente, tomando por base o modelo de potência transmitida e recebida em todo o seu trajeto (com base em Friis), podemos aqui definir o modelo global proposto como:

$$M_i = P_{trans} + A_{antena_t} + (L_{o,i} \pm I_{95\%,i} \pm E_i) + A_{antena_r} + A_{inserção} \quad (3.16)$$

onde

- P_{trans} = potência irradiada na antena transmissora;
- A_{antena_t} = ganho da antena transmissora;
- $L_{o,i}$ = atenuação do sinal otimizado no i -éssimo ponto de medição com base na Equação (3.12);
- $I_{95\%,i}$ = intervalo de confiança das medidas (repetições) feitas no i -éssimo ponto de medição;
- E_i = erro estimado pela diferença entre os valores medidos em campo e o valor simulado pela Equação (3.12);
- A_{antena_r} = ganho da antena na recepção;
- $A_{inserção}$ = perdas de inserção percebidas no *analog front end* do *hardware* receptor do *end-device*.

Na Equação (3.16), o modelo é calculado pontualmente. Para entender isto, toma-se por referência o exemplo hipotético da Figura 20. Neste modelo, foram coletados oito pontos (indicados no gráfico pelo ‘*’) a diferentes distâncias do *gateway* (eixo horizontal indica a distância entre TX e RX). Cada ponto de coleta indicado pelo asterisco indica uma série de medidas realizadas naquele local. Por exemplo, o primeiro ponto (ou seja: $i=1$), coletado a uma distância de aproximadamente 300 metros do *gateway*, recebeu uma sequência de n de pacotes transmitidos a intervalos de pelo menos 2 segundos.

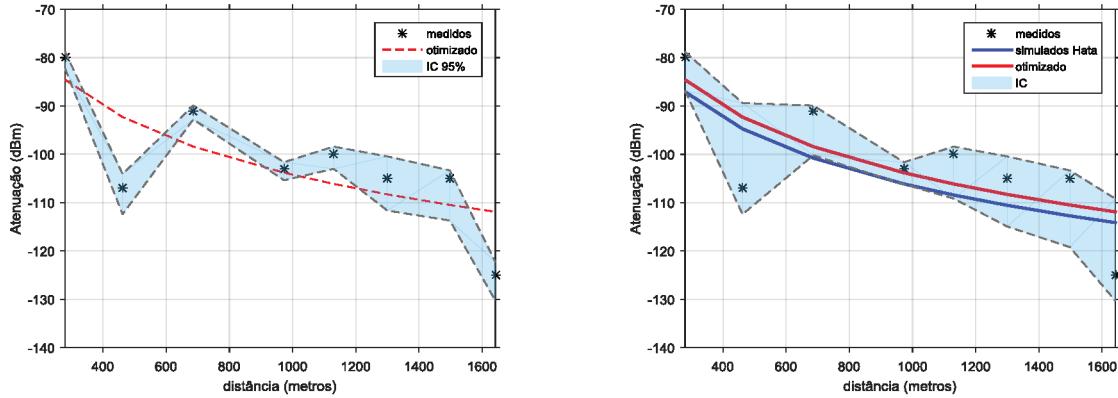
A cada recepção dos n pacotes foram verificados no *transceiver* os valores de RSSI e SNR estimados pelo sinal decodificado. Com base nestes n valores de RSSI, estimou-se a atenuação média deste ponto de coleta que neste exemplo foi de -80 dBm. No gráfico da esquerda, observa-se que neste ponto $i=1$ as n medidas (ou repetições) já produziram um IC (calculado por *Bootstrap*) com limite superior de -80 dBm e inferior de aproximadamente -82 dBm. Isto indica dizer que se este experimento for

reproduzido neste mesmo ponto novamente, estatisticamente 95% das repetições deverão estar neste intervalo (-80 a -82 dBm). Ainda, observe que a média está muito próxima do limite superior.

Isto quer dizer que a maior parte das medidas foram similares ao valor médio, mas contudo, algumas poucas medições produziram valores abaixo de -80 dBm puxando o intervalo de confiança para o patamar de -82 dBm. Como não houve nenhuma medida acima de -80 dBm, o intervalo de confiança foi estabelecido neste valor. Nesta mesma figura (esquerda), observa-se em vermelho pontilhado o comportamento do modelo de H-O otimizado. Nota-se que no ponto $i=1$ o valor alcançado pelo modelo foi de aproximadamente -85 dBm. Note que isto está fora do IC medido. Logo, o modelo não foi capaz (neste ponto) de se adequar tão bem às medidas naquele ponto, uma vez que o processo de otimização leva em conta o comportamento “global” da curva e não só o pontual como aqui analisado.

Para compensar esta discrepância entre o valor médio medido (aproximadamente -80 dBm) e o simulado (aproximadamente -85 dBm), gerou-se um erro $E \cong -5$ dBm. Este erro, no gráfico da direita (ver Figura 20) foi incorporado a um dos limites do IC (no caso, o inferior) para que agora o novo intervalo de confiança pudesse ser capaz de também reproduzir o erro entre as medidas coletadas e os valores simulados. Mesmo embora não se possa afirmar que este novo IC (figura da direita) preserve os 95% de tolerância de *Bootstrap*, espera-se que ele seja um indicador visual ao seu intérprete, do que ele pode esperar de variabilidade de medidas nesta região ($i=1$).

Figura 20 – Ilustração gráfica do modelo sugerido



Fonte: autoria própria

3.3 Experimentos

Nesta seção é dado destaque a como os dados foram coletados, processados e quais referências ou protocolos foram estipulados para a coleta dos dados em campo. Tentou-se diversificar ao máximo possível os cenários, variando-se os parâmetros físicos do rádio LoRa e obedecendo-se a procedimentos já consolidados. Ao mesmo tempo, também se tentou coletar a maior quantidade de informações possíveis, uma vez que a análise estatística é mais bem qualificada com a presença de um grande número de medidas (ou repetições). Ao todo, foram coletadas medidas em oito diferentes cenários. Estes cenários e os procedimentos de coleta são descritos na sequência.

Os procedimentos de campo envolveram duas categorias de medidas: (i) propagação e (ii) QoS. As medidas de propagação (RSSI e SNR, essencialmente) foram coletadas diretamente pela leitura dos registradores do *transceiver* LoRa, nas coordenadas geográficas onde o *transceiver* iniciava a comunicação. Já as medidas básicas de indicadores de QoS (descritas na subseção seguinte), eram feitas posteriormente pela análise dos pacotes recebidos. Mesmo embora as medidas de QoS não tenham influência na determinação do modelo de propagação, ainda assim são importantes parâmetros para o planejamento de rede e por isto caminham juntos nesta

dissertação, sempre que possível. As coordenadas geográficas foram obtidas pelo aplicativo do Google Earth®.

3.3.1 Modelo de referência, metodologia de análise e parâmetros de avaliação

Os testes realizados com o objetivo de avaliar o desempenho da rede e o QoS, seguiram as recomendações da RFC 2544 e foram divididos em cenários que serão descritos mais à frente.

Para todos os cenários avaliados, a metodologia de análise dos dados coletados permaneceu semelhante, variando-se, dependendo do cenário, o número de pacotes transmitidos e o SF utilizado. Nenhum mecanismo de retransmissão, correção de *bits* ou ACK (*acknowledgement*) foi empregado, na tentativa de avaliar de forma mais bruta possível as características da propagação e recuperação da informação pela camada física. Também se fixou durante todos os experimentos (i) a largura de banda em 125 kHz e (ii) a potência transmitida em 20 dBm (100 mW). Durante as medições os *end-devices* ficavam parados para não haver impactos de efeito *Doppler*.

Adicionalmente, foi desenvolvido um programa de computador para a abertura e análise automática dos arquivos coletados nos pontos de medições. Este *software* realiza a contagem dos pacotes, faz sua verificação quanto à integridade dos *bits* e estima os parâmetros de QoS citados na sequência.

Os parâmetros de avaliação utilizados nessa pesquisa levaram em consideração as necessidades vislumbradas por uma rede SG suportada por uma cobertura LoRa-IoT em questões de QoS e propagação. A seguir são relacionados os principais parâmetros da propagação e de QoS e uma breve descrição dos mesmos.

- PDR ((*Packet Delivery Rate*): percentual de pacotes entregues no ponto de recepção em relação ao total transmitido;

- PLR (*Packet Lost Rate*): percentual de pacotes perdidos em relação ao total transmitido;
- PER (*Packet Error Rate*): percentual de pacotes recebidos com erro em relação ao número total de pacotes recebidos;
- SNR (*Signal-to-Noise Ratio*): calculado como a média aritmética de todas as leituras desse parâmetro realizadas;
- RSSI (*Received Signal Strength Indication*): calculado como a média aritmética de todas as leituras desse parâmetro realizadas;
- Bits errados: o pacote recebido é comparado com o esperado (transmitido) quanto à troca de *bits* e esses, se presentes, são contabilizados;
- BER (*Bit Error Rate*): uma vez que são transmitidos 10 bytes de carga útil por pacote, tem-se 80 *bits* e, assim, o total de *bits* recebidos por pacote será o produto do número de pacotes transmitidos por esse valor. As strings recebidas são comparadas com o padrão transmitido, 80 *bits* alternados de valor ‘0’ e ‘1’ e os bits errados são contados, gerando a BER, em porcentagem;
- Taxa de transferência (*throughput*): conforme definição do RFC 1242 [64], é a taxa máxima na qual nenhum dos quadros oferecidos é descartado pelo dispositivo sob teste, ou seja, é a taxa máxima real que o dispositivo pode suportar;
- Latência: ainda segundo o RFC 1242 a latência é definida de forma diferente para dois tipos de dispositivos. Para dispositivos que utilizam a técnica de ‘armazena e encaminha’ (*store and forward devices*), como na comutação de pacotes, é o intervalo de tempo iniciando quando o último bit do quadro de entrada alcança a porta de entrada e que termina quando o primeiro bit do quadro de saída é visto na porta de saída.

3.3.2 Cenários analisados

Com diferentes objetivos e configurações, oito cenários foram definidos e analisados nessa pesquisa. A Tabela 6 descreve os locais de testes, suas peculiaridades e objetivos.

Tabela 6 – Cenários analisados na pesquisa.

Cenários	Local	Resumo	Detalhes	Objetivos
1a	Patos de Minas MG	8 pontos distribuídos radialmente ao longo do perímetro de um círculo de 730 m de raio	Apenas SF12 Apenas DL $h_{tx}^{20}=8$ m	Analizar influência do relevo e de obstáculos nos parâmetros de QoS
1b	Patos de Minas MG	52 pontos distribuídos linearmente ao longo de uma avenida de 1270 m, divididos em 2 setores de 26 pontos cada.	SF9 (todos os pontos) e SF12 (pontos extremos), Apenas DL $h_{tx}=8$ m	Analizar QoS.
2	Patos de Minas MG	11 pontos distribuídos linearmente na Rua Major Gote. 17 pontos distribuídos linearmente na Av. Brasil.	Apenas SF12 DL e UL $h_{tx}=30$ m	Analizar propagação e QoS em situação de aparente linha de visada, em área de relativa alta/média densidade de construções.
3	Uberlândia MG	8 pontos distribuídos linearmente na Av. Afonso Pena.	SF7, SF10 e SF12 Apenas DL $h_{tx}=30$ m	Analizar a influência do fator de espalhamento na propagação. Analizar QoS.
4	Patos de Minas MG	17 pontos dispersos nas regiões central e urbana.	Apenas SF12 Apenas DL $h_{tx}=30$ m	Analizar propagação e QoS em situação de LoS e NLoS, em área de relativa alta/média densidade de construções.
5	Brasília DF	21 pontos distribuídos no Plano Piloto.	SF7 e SF12 DL e UL $h_{tx}=50$ m	Analizar a influência de LoS e NLoS na propagação. Analizar QoS.
6	Patos de Minas MG	Enlace entre dois prédios da UFU, distantes 877m, na área central	Apenas SF12 Ponto a ponto $h_{tx}=14$ m	Analizar a disponibilidade e confiabilidade da tecnologia em teste de transmissão contínua, por 36 horas.
7	Patos de Minas MG	1 ponto entre a zona rural e área suburbana.	Apenas SF12 Ponto a ponto $h_{tx}=5$ m	Analizar o alcance da tecnologia e QoS, em cenário rural/suburbano, sem linha de visada.

²⁰ h_{tx} : Elevação da antena transmissora em relação ao solo.

8	Patos de Minas - MG	1 ponto entre a área central e área esparsamente urbanizada.	Apenas SF12 Ponto a ponto $h_{tx}=14$ m	Analizar o comportamento da tecnologia em região esparsamente urbanizada (bairro residencial).
---	---------------------	--	---	--

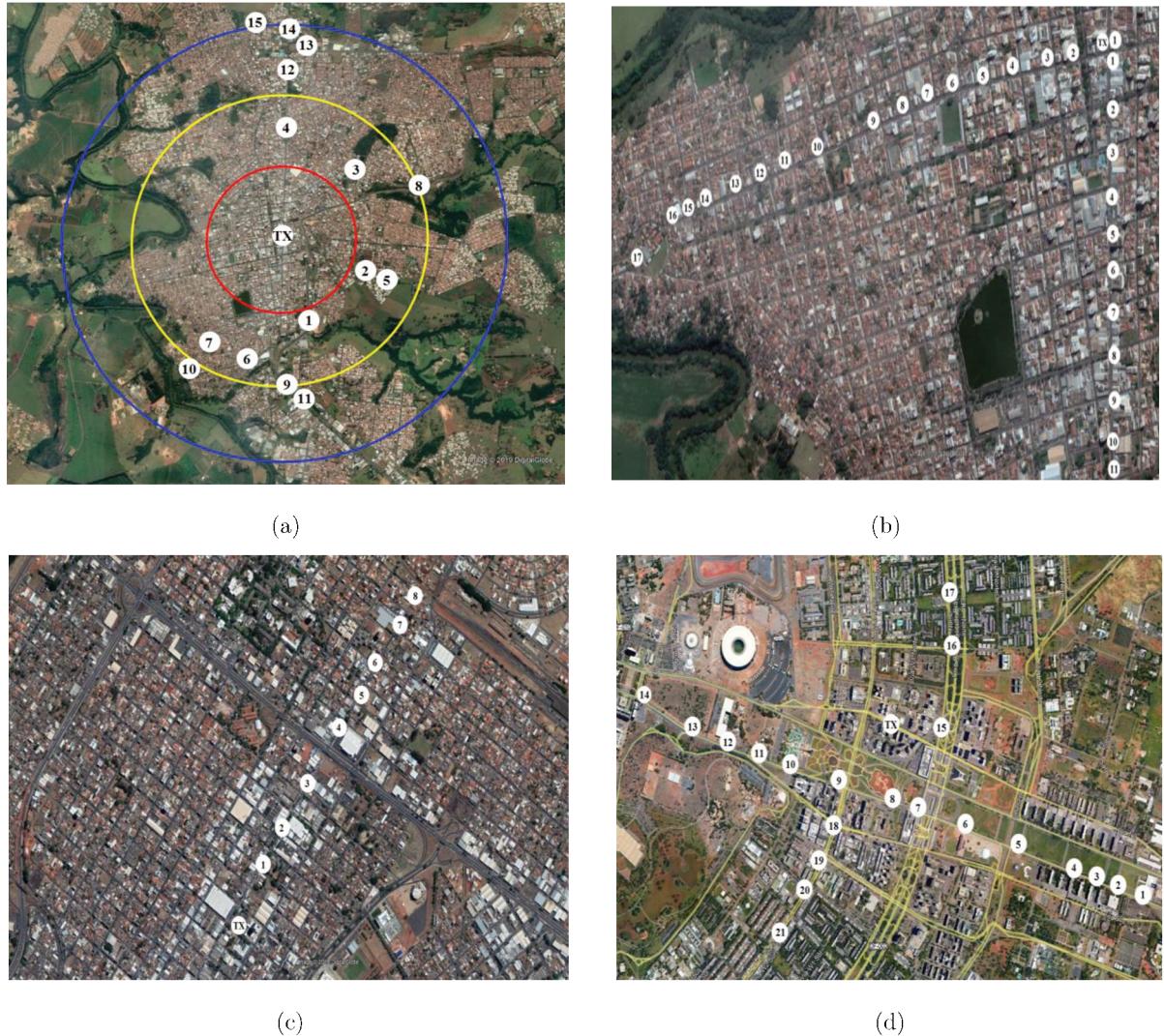
Fonte: autoria própria

Inicialmente foi realizada uma análise de um cenário específico (cenário 4), que atendia as exigências dos modelos de propagação de Okumura e Hata (altura da antena transmissora e distância mínima entre transmissor e receptor), a fim de se determinar qual desses modelos melhor representava o conjunto de dados experimentais levantados naquele cenário. Após definido o modelo, aplicou-se o algoritmo genético (AG) aos dados experimentais a fim de observar a eficiência deste em representá-los.

Considerando que em aplicações de IoT existe a necessidade de atender pontos com distâncias inferiores a 1 km, foram verificados os dados de mais 3 cenários com distâncias acima e abaixo de 1 km, utilizando-se o teste de qualidade de ajuste Qui-quadrado. Posteriormente dados de mais duas cidades foram analisados para avaliar a eficiência do modelo otimizado proposto (Uberlândia, MG e Brasília, DF). Finalmente foram utilizados os valores de RSSI previstos pelo método do AG em um novo teste Qui-quadrado, com o objetivo de validar o modelo proposto.

Terminada a etapa de análise da propagação, novos cenários foram avaliados em relação à capacidade da tecnologia em entregar dados. Ao todo foram analisados oito cenários, em diferentes condições (urbanização, geográficas, climatológicas, horários, etc.). A Figura 21 apresenta as regiões de coleta de dados realizadas nas cidades de Patos de Minas e Uberlândia (Minas Gerais, Brasil) e Brasília (DF, Brasil). Na sequência os testes de análise da QoS são descritos com um maior detalhamento.

Figura 21 – Cenários considerados para análise da propagação. (a) Cenário 1: Teste disperso em Patos de Minas. (b) Cenário 2: Teste linear em Patos de Minas. (c) Cenário 3: Teste em LOS em Uberlândia. (d) Cenário 4: Teste em LOS e NLOS em Brasília.

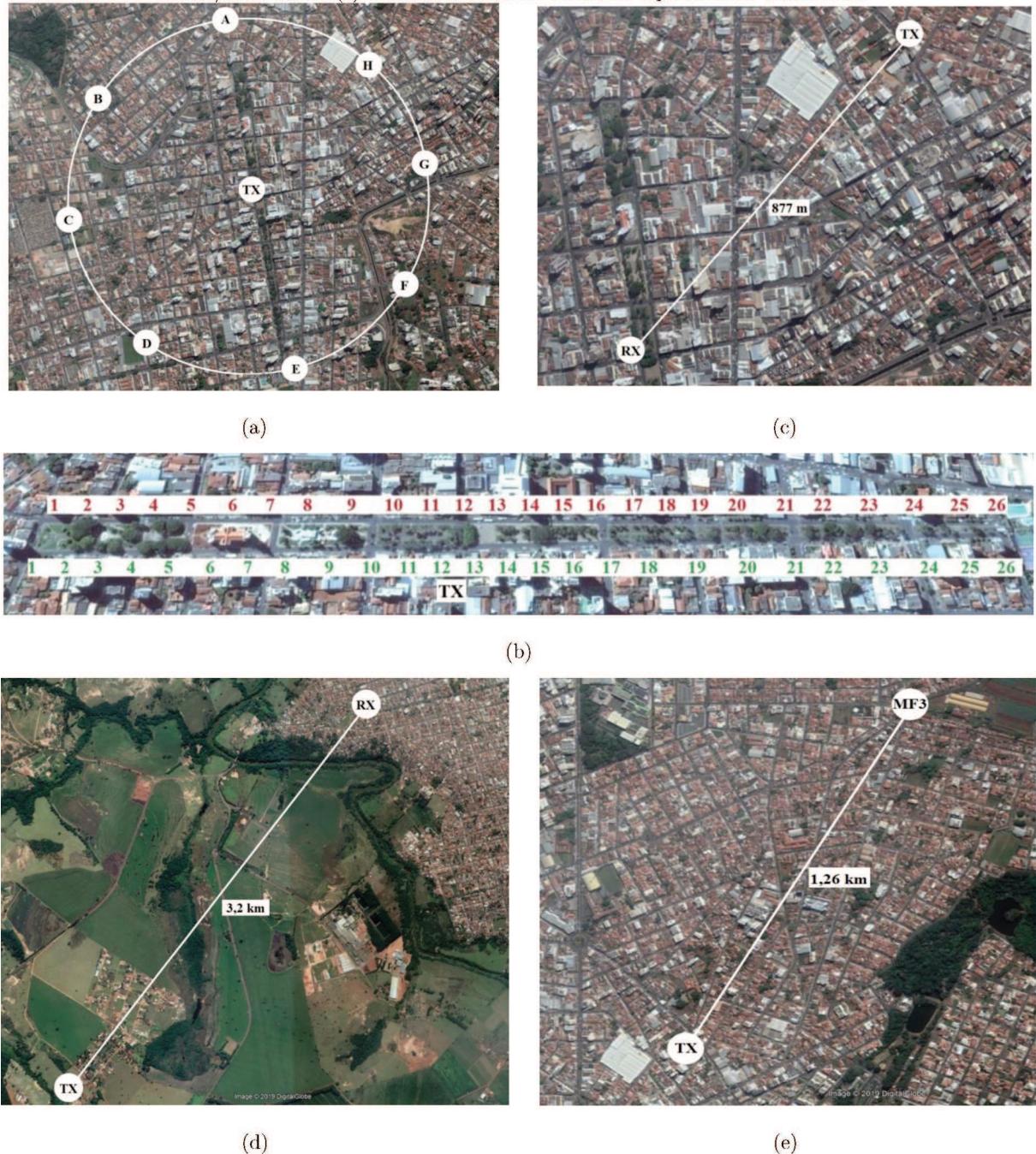


Fonte: autoria própria

Utilizando-se novos cenários, o comportamento da comunicação LoRa foi investigado em situações onde existe a demanda de leitura de sensores distribuídos em regiões densamente urbanizadas, suburbanas e rurais e nas quais não é viável a instalação de um *gateway* com elevação da antena igual ou superior a 30 metros. Também, ao contrário da primeira parte dessa pesquisa, na qual se buscava compreender a propagação do sinal LoRa e a sua representação a partir de um determinado modelo, foi utilizada comunicação em ambos os sentidos, tanto em *downlink* quanto em *uplink*, com diferentes alturas da antena transmissora e receptora.

Esses novos cenários são apresentados na Figura 22 e todos os testes foram realizados na cidade de Patos de Minas, MG.

Figura 22 – Cenários para análise da QoS. (a) Cenário 1a: Pontos ‘A’ a ‘H’ para o teste de propagação radial. (b) Cenário 1b: Cinquenta e dois pontos de medições do diâmetro da área circular do teste do cenário 1. Porção inferior (verde) e superior (vermelho). (c) Cenário 7: Teste de disponibilidade. (d) Cenário 6: Teste de alcance rural/suburbano. (e) Cenário 8: Teste em ambiente esparsamente urbano.



Fonte: autoria própria

- **Cenário 1 - propagação em ambiente densamente urbanizado:** neste teste, o transmissor foi instalado externamente no terceiro andar de um prédio (cerca de oito metros de altura). Foi delimitado um círculo de 730 metros de raio tomando a posição deste transmissor como centro. Foram definidos oito pontos no perímetro desse círculo que foram rotulados ‘A’ a ‘H’. O *end-device* foi levado até esses pontos e foram transmitidos 311 pacotes por ponto, com o propósito de analisar a propagação de uma forma radial, em uma distribuição geográfica urbana central, densamente urbanizada. Foi utilizado o SF 12 para este teste. A Figura 22a apresenta a posição dos pontos no perímetro do círculo e do transmissor, representado como TX. O transmissor está localizado a uma altitude similar aos pontos ‘A’ e ‘E’ como ilustrado na Figura 23 (830 m). Ainda, dentro deste teste, foram realizadas novas medições cuja finalidade era melhorar a caracterização da propagação LoRa nesta área. Para isto, foi escolhida uma avenida que representa o diâmetro vertical do círculo da Figura 22a, Avenida Getúlio Vargas. A Figura 22b detalha este percurso de teste na avenida de 1300 metros que foi dividido em 26 pontos espaçados igualmente de ambos os lados (setores verde e vermelho), totalizando 52 pontos de medições. A posição do transmissor foi mantida a mesma da Figura 22a. Para cada ponto coletado foi transmitida a mesma quantidade de pacotes do teste anterior, utilizando-se SF 9 para todos os pontos e SF 12 para os pontos extremos (1 a 5 e 22 a 26, para ambos os setores, verde e vermelho).

Figura 23 – Perfil de elevação geográfica para os pontos do cenário 1.



Fonte: software Google Earth.

- **Cenário 2 - propagação em linha de visada em Patos de Minas:** para a realização dessa etapa da pesquisa procurou-se seguir a determinação de mínima altura da antena transmissora (estação base) de 30 metros, como previsto no modelo de Hata. Foi escolhido um prédio comercial na região central, com um terraço aberto no décimo andar, com visada para as principais avenidas do centro da cidade. Dois logradouros foram escolhidos por apresentarem elevação geográfica com pouca variação dentro do percurso definido sendo, assim, uma região quase plana. Uma avenida e uma rua centrais da cidade foram escolhidas para as medições, que ocorreram a cada quadra, sempre nas esquinas. Para a Avenida Brasil foram definidos onze pontos de medição e para a Rua Major Gote, dezessete. A Figura 21b apresenta os pontos mencionados e as Tabelas 7 e 8, as distâncias entre os pontos e o *gateway*. Para esse conjunto de medidas utilizou-se apenas o SF 12 e foram transmitidos 40 pacotes por ponto de medição. Uma variação desse teste incluiu, também, uma análise de desempenho em uma situação em que o módulo transmissor se encontra móvel, indo até os pontos de medições e transmitindo para o receptor, no terraço do prédio. Com isso procurou-se avaliar o comportamento da comunicação em uma situação de *uplink*, além de *downlink*.

Tabela 7 – Pontos e suas respectivas distâncias do *gateway*, para a **Rua Major Gote**.

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Distância (m)	40	190	320	440	560	660	790	910	1020	1140	1260

Fonte: autoria própria.

Tabela 8 – Pontos e suas respectivas distâncias do *gateway*, para a **Avenida Brasil**.

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Distância (m)	50	130	230	380	503	642	865	996	1156	1265	1399	1510	1628	1750	1860	1952	2100

Fonte: autoria própria.

- **Cenário 3 - propagação predominantemente com visada direta em Uberlândia:** o transmissor LoRa foi instalado na sacada de um prédio residencial, no décimo andar, a aproximadamente 30 metros de elevação. O receptor foi adaptado ao teto de um veículo, estando a sua antena a 1,5 metro do solo. A região apresenta média densidade de urbanização em um composto de prédios residenciais, comerciais e casas de um ou mais pavimentos. Na avenida escolhida, Afonso Pena, há relativa baixa variação na elevação, podendo ser considerada plana. A Figura 21 apresenta a posição do transmissor e os pontos de medição. Manteve-se aqui o método de se transmitir 40 pacotes por ponto e foram utilizados 3 SFs diferentes (SF7, SF10 e SF12). A Tabela 9 apresenta as distâncias entre os pontos e o *gateway*.

Tabela 9 – Pontos e suas respectivas distâncias do *gateway*, para a Avenida Afonso Pena.

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8
Distância (m)	280	462	686	973	1130	1300	1498	1642

Fonte: autoria própria.

- **Cenário 4 - propagação fora de linha de visada (NLOS) em Patos de Minas:** utilizando o mesmo ponto do transmissor do cenário 2, foram selecionados 16 pontos distribuídos de forma aleatória dentro de três círculos (1 km, 2 km e 3 km), que podem ser vistos na Figura 21a. Foi levada em consideração a elevação do ponto do *gateway* (836 m) na escolha desses pontos, assim o ponto de menor elevação do terreno foi de 794 m e o de maior 905 m, sendo que a média foi de 837 m. Dessa forma procurou-se evitar pontos em vales, sendo que em nenhum deles havia visada direta entre o *gateway* e o *end-device*. Foi utilizado apenas o fator de espalhamento SF12 e transmissão em *downlink*, com 40 pacotes por ponto. A Tabela 10 apresenta as distâncias entre os pontos e o transmissor.

Tabela 10 - Pontos e suas respectivas distâncias do *gateway*, para os pontos dispersos do cenário 4.

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Distância (m)	760	988	1232	1277	1320	1454	1495	1741	1744	1957	2075	2170	2190	2253	2612	2787	2954

Fonte: autoria própria.

- **Cenário 5 - propagação em linha de visada (LOS) e fora de linha de visada (NLOS) em Brasília:** este cenário visa a análise do comportamento da propagação e da QoS em uma situação de visada direta entre o *gateway* e o *end-device* e sem a ocorrência dessa característica, a fim de analisar o comportamento da comunicação. Foram realizadas medições em 21 pontos, espalhados em um raio de até 2600 metros, abrangendo a região do “Plano Piloto” da Capital Federal. A Figura 21d apresenta o ponto do TX e os pontos de medições. O *gateway* foi instalado a 50 metros de altura, sobre um prédio comercial. Para cada ponto foi transmitido um total de 20 pacotes. A Tabela 11 apresenta a identificação dos pontos e suas respectivas distâncias do *gateway*. A região do teste é caracterizada por muitos prédios elevados próximos ao ponto de TX e muitas torres de comunicações na cobertura destes prédios (potenciais fontes de interferência). Já no percurso do nó, houve situações onde a área possua, ora amplos espaços gramados que margeiam avenidas (e.g., Esplanada dos Ministérios) e ora áreas com muitas obstruções (monumentos, grandes edifícios, passarelas, etc) e faixas de rodagem com intenso fluxo de veículos. Ainda que a disposição dos pontos de medição seja “regular” (seguiu o formato de uma ‘cruz’ acompanhando importantes avenidas da cidade), vale destacar que a alta densidade de prédios em algumas destas áreas produziu pontos sem visada direta e pontos com visada direta. Em virtude disto, não foram escolhidos pontos dispersos.

Tabela 11 – Pontos e suas respectivas distâncias do *gateway*, para o teste em Brasília, DF.

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Distância (m)	434	552	632	660	800	928	963	994	1120	1197	1230
Ponto	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Distância (m)	1426	1462	1500	1815	1852	1963	2182	2288	2364	2600	

Fonte: autoria própria.

- **Cenário 6 - disponibilidade da comunicação:** neste cenário buscou-se observar a disponibilidade do enlace de comunicação e, diferentemente dos testes anteriores, avaliar a robustez da comunicação, tomando por base a disponibilidade de transmissão e/ou recepção em um período de tempo, em função das variações ambientais e outros fatores que poderiam inviabilizar a comunicação. O receptor foi instalado no mesmo prédio (ponto do transmissor) mencionado no cenário 1 e o transmissor em um segundo prédio, localizado a 877 metros em linha reta, e a 14 metros acima do solo. Ambos dispositivos (transmissor e receptor) estavam em ambientes internos, próximos às janelas, havendo pelo menos uma obstrução por vidro entre os mesmos. Embora a distância entre os prédios seja relativamente curta, não existia visada direta, pois ambos os prédios estão localizados em uma região central com edifícios de maior elevação, os quais inviabilizavam esta visada. Estes pontos são exibidos na Figura 22c. O teste teve duração de 36 horas, com as mesmas configurações dos testes anteriores e SF 12, com um pacote sendo enviado a cada segundo. Foi realizada a análise dos pacotes recebidos por hora e calculada a taxa de entrega de pacotes.
- **Cenário 7 - propagação em ambiente rural/suburbano:** para o teste em ambiente rural/suburbano foi utilizado apenas SF 12. O ponto de instalação do TX estava a 3,2 km²¹ do receptor e a 5 m de altura em relação ao solo. Não havia

²¹ Não foram feitos testes com outras distâncias por entender-se que esta distância de aproximadamente 3 km de raio já é suficiente para cobrir grande área em cenário rural. Ainda, neste raio, já houve início de degradação da comunicação como revelaram os dados. Ainda, por se tratar de área rural montanhosa, a logística dificultava testes.

visada direta entre o par receptor-transmissor. A Figura 22d apresenta uma visão de satélite dos locais escolhidos para o teste. Nessa figura pode ser observado que a área suburbana, localizada no canto superior direito, é envolta por uma área rural por onde o sinal também propaga.

- **Cenário 8 - propagação em ambiente esparsamente urbanizado:** com o transmissor instalado no mesmo prédio do cenário 6, no ponto indicado por TX na Figura 22c, na mesma altura de 14 metros, foram realizados testes com o receptor instalado em um veículo. Utilizando-se como local de medições a Rua Mata dos Fernandes, foram escolhidos três pontos, em linha reta e em aclive em relação ao ponto do transmissor. A região escolhida, diferentemente dos cenários 1 e 3, possui apenas casas e construções térreas ou com no máximo dois pavimentos, sendo localizada em um bairro residencial. A Figura 22e apresenta uma visão de satélite dos pontos, com o percurso em linha reta para o ponto mais distante (1,2 km), denominado neste estudo de ponto MF3. A Figura 24 apresenta o perfil geográfico entre os pontos do TX e o ponto do receptor, mostrando que existe um desnível de 65 m entre os mesmos.



Fonte: software Google Earth.

3.3.3 Validação e análises estatísticas

Após a coleta de dados da recepção LoRa em diferentes locais e regiões, se faz necessário avaliar se o conjunto de medidas segue um determinado modelo de propagação e qual deles seria o mais adequado a essa tecnologia, para os cenários pesquisados. Após a definição do modelo de Hata para embasar este trabalho,

procurou-se um método estatístico que auxiliasse na validação dos resultados obtidos e das predições do modelo otimizado. Além disso, buscou-se avaliar a propagação para distâncias inferiores à mínima prevista de 1 km pelo método de Hata .

Assim, a fim de verificar a validade dos ajustes realizados no modelo de propagação O-H para a tecnologia LoRa para distâncias inferiores a 1000 metros, os valores previstos e medidos foram comparados utilizando-se estatística de primeira ordem por meio do teste de qualidade de ajuste Qui-quadrado.

3.3.3.1 Teste de qualidade de ajuste Qui-quadrado

O teste Qui-quadrado, denotado pela letra grega χ^2 , foi introduzido em artigo de Karl Pearson em 1900 e posteriormente denominado teste de qualidade de ajuste Qui-quadrado. A Equação (3.17) apresenta a sua formulação matemática, onde O é o conjunto de dados observados, E o conjunto de dados esperado e n a dimensão desses conjuntos. O valor encontrado para o χ^2 representa uma quantidade medida que permite avaliar a hipótese de quão significativas são as diferenças entre esses conjuntos.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (3.17)$$

Valores tabelados das probabilidades podem ser encontrados em tabelas de distribuição Qui-quadrado. A partir dos valores encontrados pela equação (3.17) e, definido o grau de confiabilidade desejado, a tabela pode ser consultada e o valor tabelado encontrado. Duas hipóteses são definidas, a partir da análise estatística χ^2 :

- H_0 : Os valores dos conjuntos O e E podem ser considerados sem discrepâncias;
- H_1 : Os valores dos conjuntos apresentam discrepâncias.

A fim de se definir a escolha de H_0 ou H_1 , observa-se o valor calculado para χ^2 e o valor encontrado na tabela e aplica-se a equação (3.18).

$$\chi^2_{calculado} \leq \chi^2_{tabelado} \quad (3.18)$$

Se a Equação (3.18) for verdadeira, se aceita H_0 e rejeita-se H_1 e o contrário caso seja falsa. Portanto espera-se que o valor de $\chi^2_{calculado}$ seja sempre menor que $\chi^2_{tabelado}$, para que o modelo seja aceito.

Nessa pesquisa procurou-se trabalhar com uma precisão de 95%, o que significa que o valor estatístico calculado, representa a probabilidade de os valores medidos (observados) e os previstos pelo modelo (esperados), se aproximarem com essa precisão.

3.4 Resumo do capítulo

Foram apresentados nesse capítulo detalhes de como o trabalho foi desenvolvido, desde os materiais utilizados na confecção dos dispositivos de teste (como *gateway* e *end-device*), assim como o *setup* e protocolos de testes. Dois dos principais modelos de predição de perdas por propagação foram apresentados, assim como o procedimento para adaptar um destes modelos escolhidos (o de Hata) para se ajustar à (i) tecnologia LoRa e, simultaneamente, (ii) aos ambientes onde as medidas foram feitas. Foram descritos métodos de validação do modelo ajustado. Adicionalmente, a pretensão desta quantidade e diversidade de testes e ambientes analisados é verificar indícios de adequação da tecnologia LoRa com aplicação em *smart grids*. E isto passa pelo desenvolvimento de uma adequada metodologia de planejamento de rede. Como nem sempre a obtenção de cartas topográficas e modelos tridimensionais de uma área são possíveis, espera-se que este modelo incorpore aos seus parâmetros, relevante parte das componentes determinísticas e estocásticas dos sinais sem necessitar destes recursos. Adicionalmente, que o método proposto possa ter precisão suficiente para construir simulações mais realísticas de coberturas de grande escala e que mesmo áreas próximas à antena (< 1 km) possam ser avaliadas.

4 Resultados e discussões

A primeira parte deste capítulo apresenta gráficos e tabelas contendo as medições realizadas em campo e as simulações executadas por computador para analisar o comportamento da propagação do sinal LoRa. Considerando a significativa quantidade de cenários e dados coletados, tentou-se agrupar as informações para privilegiar uma análise comparativa. Adicionalmente, algumas medidas de parâmetros básicos de QoS também foram abordadas, ainda que o foco primário desta dissertação esteja mais vinculado à propagação. Ambos os resultados (propagação e QoS) são apresentados na primeira metade deste capítulo.

Na segunda metade deste capítulo são feitas as discussões com base nos resultados alcançados e com referência à literatura técnica. A Tabela 12 resume alguns dos resultados das simulações da propagação do sinal LoRa com base no método aqui proposto aos cenários aplicáveis. A análise do erro RMS entre as medidas e os referidos modelos revela, preliminarmente, que em todos os casos o processo de otimização (ou ‘tuning’) dos parâmetros de Hata foi capaz de produzir um modelo de propagação significativamente mais próximo às medidas coletadas (ver última coluna da Tabela 12).

Tabela 12 – Parâmetros otimizados pelo método proposto considerando os cenários aplicáveis.

Cenários	Teste	Parâmetros					Erro RMS modelo Okumura	Erro RMS modelo Hata	Erro RMS modelo otimizado (dBm)
		a ₁	a ₂	a ₃	b ₁	b ₂			
1 (Av. Getúlio Vargas)	SF9 verde	72,31	14,40	21,60	4,90	-6,94	14,40	21,60	4,90
	SF9 vermelho	77,15	13,60	19,30	4,40	-5,15	13,60	19,30	4,40

	SF12 verde	70,76	18,10	20,50	4,60	-10,62	18,10	20,50	4,60
	SF12 vermelho	73,22	19,90	22,10	4,80	-5,05	19,90	22,10	4,80
2 (R. Major Gote e Av. Brasil)	R. Major Gote	75,64	7,10	11,80	5,60	-19,57	7,10	11,80	5,60
	Av. Brasil	69,23	8,90	8,60	3,70	-9,19	8,90	8,60	3,70
3 (Av. Afonso Pena)	SF7	65,18	9,90	9,60	8,10	-7,44	9,90	9,60	8,10
	SF10	64,44	9,20	8,60	8,20	-5,26	9,20	8,60	8,20
	SF12	66,71	9,50	8,90	8,80	-9,17	9,50	8,90	8,80
4 (Plano piloto – Brasília)	SF7	66,86	6,20	7,90	4,9	-9,06	6,20	7,90	4,90
	SF12	62,19	24,40	-9,28	30,01	-19,95	20,70	16,50	10,20

Fonte: autoria própria.

Optou-se pelo uso do AG no processo de otimização do modelo de Hata porque ele é um método que evita soluções de mínimo locais, consegue varrer um amplo espaço de busca e trata com relativa destreza problemas não-lineares. Ademais, dado seu caráter aleatório na busca de soluções, permite analisar a variabilidade das soluções (observar Figura 40).

4.1 Análise da propagação

Na análise 1 os resultados obtidos nos experimentos em campo, na cidade de Patos de Minas, foram analisados de forma gráfica e por meio do cálculo do erro entre os valores medidos e os previstos, a fim de se determinar qual o modelo de propagação

melhor os representava. A partir da análise 2, dadas as conclusões obtidas na análise 1, o método de otimização do modelo selecionado foi aplicado a novos conjuntos de dados, com o objetivo de analisar o comportamento do modelo em diferentes configurações de testes. As análises são descritas em detalhes nos parágrafos seguintes.

4.1.1 Análise 1: propagação em ambiente densamente urbanizado

O gráfico da Figura 25 apresenta as medidas de propagação coletadas para uma distribuição de pontos escolhidos de acordo com a elevação do terreno, na cidade de Patos de Minas, MG. Procurou-se evitar vales e pontos com elevação muito abaixo ou acima da elevação do *gateway* (foi considerada uma diferença máxima de 10 m na elevação). Neste gráfico também são apresentados os valores de simulação estimados pelos métodos analisados nesta pesquisa, para reproduzir o comportamento da propagação do sinal LoRa no referido cenário.

Convém ressaltar que, para o modelo de Okumura, que é um modelo gráfico, as curvas da Figura 18 foram consultadas e chegou-se aos valores de 9,5 para o parâmetro $G_{\text{ÁREA}}$, o que define como área suburbana, e de 21 para A_{μ} , que é uma função da distância e da frequência (aqui utilizada a frequência de 915 MHz e uma distância média de 1 km, para todos os cenários). Devido à altura da antena receptora ser de 1,5 metros foi utilizada a Equação (3.4) para o cálculo de h_{re} ,

Cada ponto representado por um asterisco (*) indica a média aritmética estimada com base nas diversas medidas de RSSI feitas em cada ponto. A fim de se obedecer às exigências de aplicação dos modelos de Okumura e Hata, o *gateway* foi posicionado a 30 m de elevação e apenas foram escolhidos pontos que distam pelo menos 1 km da posição do *gateway*, em linha reta. Observa-se uma grande variabilidade nas medidas, como esperado, devido a diversos fatores que influenciam na propagação, já tratados nos capítulos anteriores. A fim de verificar qual modelo melhor representa o conjunto de dados, foi utilizado o erro médio quadrático (RMS) que relaciona as

medidas coletadas às simuladas pelos modelos. Os resultados são apresentados na Tabela 13.

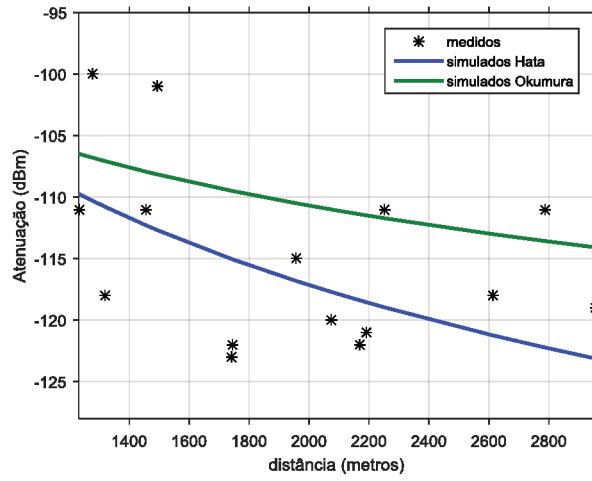
Tabela 13 - Erros RMS entre os valores medidos e simulados por Hata e Okumura.

Modelo	Erro RMS
Okumura	10,03
Hata	6,60

Fonte: autoria própria.

Pode-se observar que o modelo de Hata apresenta o menor erro RMS entre os dados experimentais obtidos nesse cenário sendo, assim, o selecionado para o processo de otimização aqui proposto.

Figura 25 - Valores de RSSI medidos e previstos pelos modelos de propagação de Hata e Okumura, na cidade de Patos de Minas, utilizando SF12.



(a)

Fonte: autoria própria.

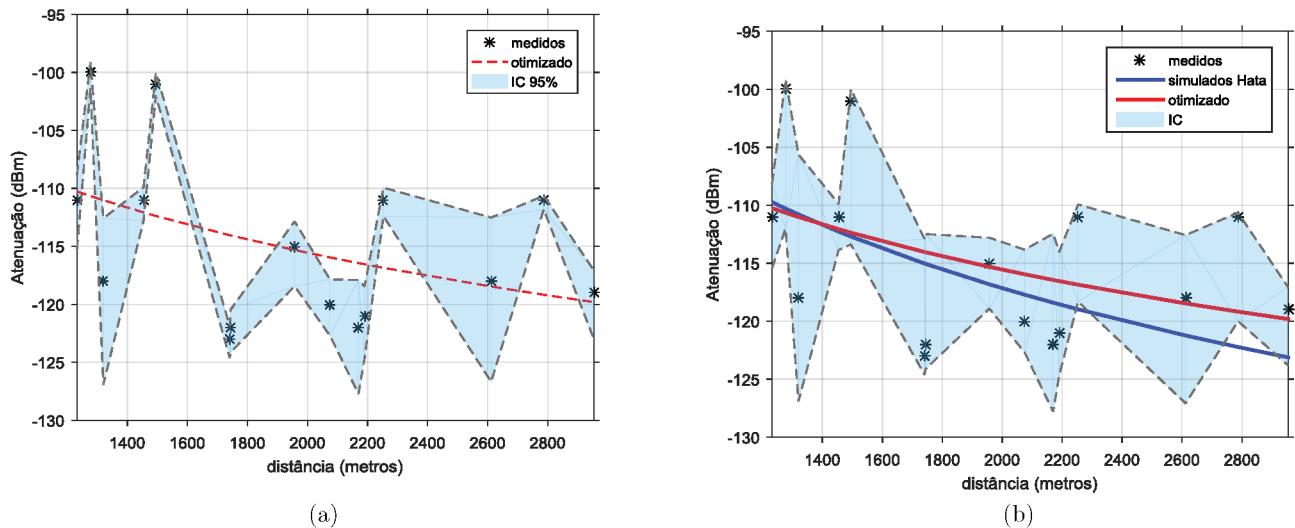
4.1.2 Análise 2: otimização do modelo de Hata para o cenário 1

Nos gráficos da Figura 26, são exibidos os resultados obtidos para os dados do cenário anterior, juntamente com a curva do modelo otimizado, realizado pelo AG, além dos intervalos de confiança calculados com base nos valores de RSSI recebidos em cada ponto. Observa-se que o modelo otimizado resulta em uma curva que se adapta de

forma mais precisa aos dados experimentais. Um novo cálculo do erro RMS entre os valores obtidos pelo método otimizado e as medidas, resultou em um valor de 6,40 dBm, demonstrando que o método conseguiu obter um desempenho melhor na representação dos valores coletados em campo. Utilizando o método *Bootstrap* anteriormente descrito, foram calculados os ICs, exibidos no gráfico da esquerda dessa mesma figura.

Novamente nessa análise, observaram-se as exigências dos modelos utilizados: não foram considerados pontos com distância menor que 1 km do *gateway* e a antena deste estava a uma altura de 30 m. Porém, devido às características da tecnologia LoRa e das aplicações vislumbradas, assim como em toda rede de IoT, pontos abaixo da distância de 1 km podem (e devem) ocorrer, o que demanda a necessidade de se analisar o modelo otimizado proposto, para atender distâncias dentro desse alcance. No próximo cenário, experimentos realizados em outros pontos da cidade de Patos de Minas, Uberlândia e Brasília serão analisados, como forma de avaliar o desempenho do método e validar a sua aplicação.

Figura 26 - Valores de RSSI medidos e previstos pelo modelo de propagação de Hata, na cidade de Patos de Minas, utilizando SF12. (a) Intervalos de confiança de 95%. (b) Modelo otimizado pelo AG e intervalos de confiança ampliados pelo erro RMS.



Fonte: autoria própria.

4.1.3 Análise 3: avaliação do modelo de Hata por meio do teste de qualidade de ajuste Qui-quadrado, para diferentes cenários

Conforme apresentado na Seção 3.3.3.1, o método do Qui-quadrado (χ^2) testa se uma hipótese (H_0) é verdadeira, descartando uma segunda hipótese (H_1). Nesta seção será testada a hipótese (H_0) do conjunto de dados medido em cada cenário em que foram realizados testes, não apresentar discrepâncias em relação aos valores simulados pelo modelo de propagação de Hata, com uma confiabilidade de 95%. Isso significa que, se a hipótese H_0 for aceita (no caso do valor calculado para o χ^2 ser inferior ao valor tabelado), pode-se afirmar com 95% de certeza que os valores medidos estão de acordo com o modelo pesquisado.

Com o objetivo de verificar se o modelo de Hata pode ser validado para todos os pontos, e não apenas para os que apresentam distâncias do *gateway* acima de 1 km, serão testados todos os conjuntos de pontos de medições, incluindo os com distâncias inferiores a esse valor. Os conjuntos investigados se referem aos seguintes locais e fatores de espalhamento: Rua Major Gote e Avenida Brasil em Patos de Minas, utilizando SF12; Avenida Afonso Pena em Uberlândia, com SF7, SF10 e SF12 e Brasília, com SF7 e SF12. Em todos esses cenários a antena do *gateway* se encontrava em uma altura dentro das exigências do modelo de Hata (entre 30 e 200 metros) e foi utilizado tráfego de dados apenas do *gateway* para o *end-device* (ou seja: *downlink*). Os resultados obtidos foram reunidos na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores do cálculo do teste qualidade de ajuste Qui-quadrado.

Cenários	Valores tabelados	Medidos	Graus de liberdade
Rua Major Gote	18.3	18.2	10
Avenida Brasil	26.3	18.9	16
Av. Afonso Pena SF7	14.1	6.0	7
Av. Afonso Pena SF10	14.1	4.8	7
Afonso Pena SF12	14.1	5.2	7
Brasília SF7	23.7	7.9	14
Brasília SF12	28.9	20.4	18

Fonte: autoria própria.

Na Tabela 14 pode ser observado que, mesmo com alteração da cidade/região e ambiente de propagação, o valor calculado a partir do χ^2 encontra-se abaixo do valor tabelado, comprovando - com 95% de probabilidade - que o modelo de Hata se aplica aos conjuntos de dados investigados. Em virtude disto, ele também será usado para medidas coletadas a distâncias inferiores a 1 km em alguns dos cenários subsequentes.

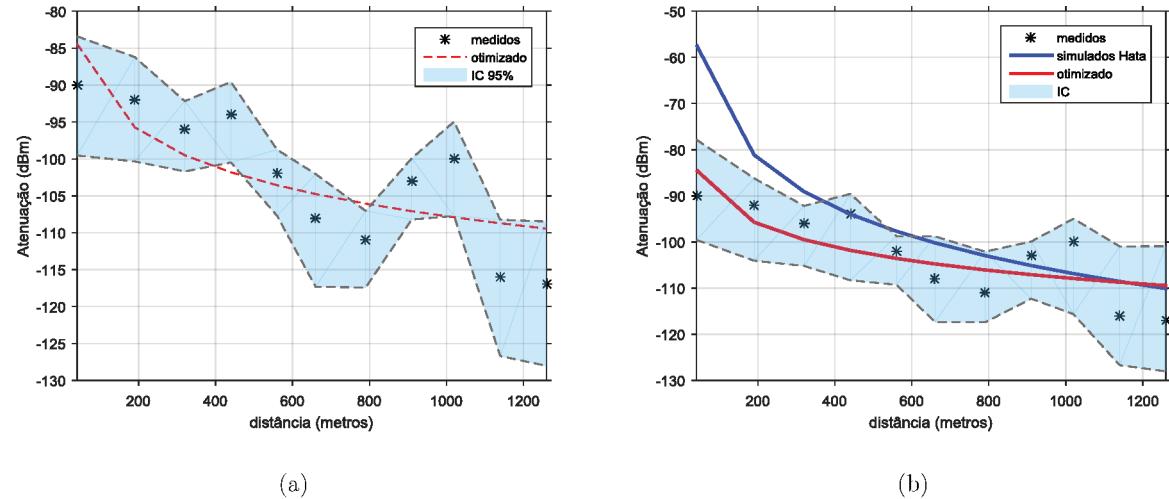
4.1.4 Análise 4: propagação em ambiente densamente urbanizado em Patos de Minas

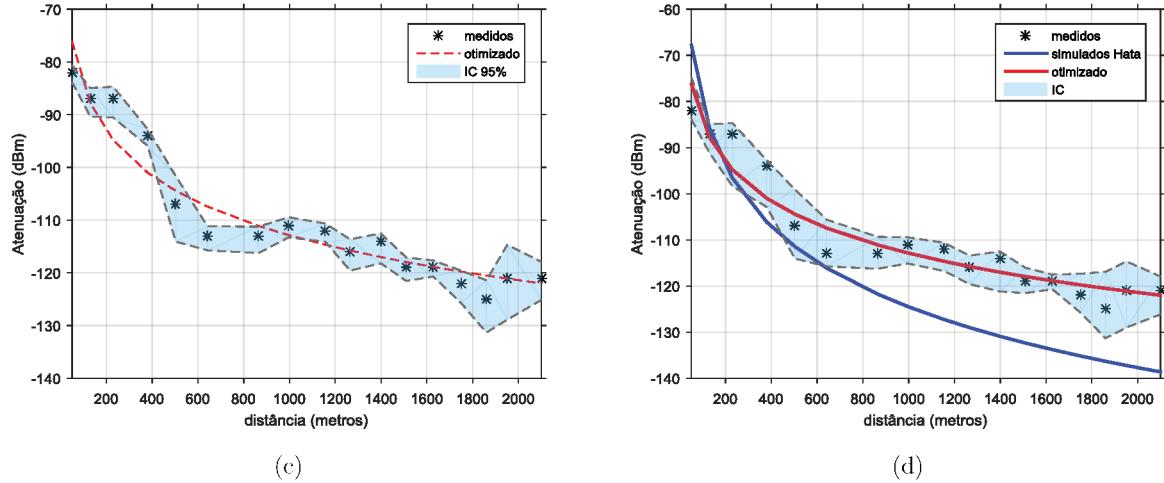
Nesse cenário procurou-se investigar o comportamento da propagação em região com baixa variação de elevação (máximo 10 metros), em duas vias na região central da cidade de Patos de Minas: a Rua Major Gote e a Avenida Brasil (vias ortogonais entre si). O percurso na primeira via foi de 1,3 km e na segunda, 2,3 km, aproximadamente. Por meio da comparação entre os valores de RSSI medidos e previstos pelo modelo de propagação de Hata, buscou-se definir um intervalo de confiança em torno dos valores medidos e simulados por computador. A Figura 27 resume os resultados encontrados para os dois percursos, sendo considerado apenas tráfego em *downlink*.

No caso específico da Figura 27a, as amostras coletadas em torno do ponto que dista, aproximadamente, 1000 m do *gateway*, apresentaram uma RSSI média que teve grande erro em relação ao modelo otimizado (ou seja, fugiu ao modelo). Observa-se neste caso que o limite inferior do intervalo de confiança desta amostra é maior que o seu limite superior. Isto indica que a distribuição das medidas é assimétrica (pois resultaram em intervalos de confiança superior e inferior diferentes) e há maior probabilidade de que tenhamos medidas mais próximas do modelo (em vermelho) do que fora dele. Ainda assim o modelo está, neste ponto, dentro do intervalo de confiança.

No ponto subsequente (distância de aproximadamente 1100 m), os ICs são ainda maiores, indicando maiores variações. Porém, são similares em amplitude, indicando que a probabilidade de acontecerem valores tanto acima quanto abaixo da média é aproximadamente igual. Neste caso o modelo otimizado também está dentro do IC, porém muito próximo de sua periferia. Por fim, as amostras coletadas a uma distância de aproximadamente 450 m do *gateway*, mostraram que o modelo simulado de propagação está fora dos intervalos de confiança. Isto indica que nesta região a confiabilidade do modelo é baixa e, com uma margem de segurança de 95%, as medidas de RSSI coletadas neste ponto devem estar entre -90 e -100 dBm, se este experimento for repetido. O modelo prevê uma potência de -102 dBm, aproximadamente.

Figura 27 – Propagação na área central de Patos de Minas para os pontos de dois logradouros. (a) Otimização do modelo: valores medidos, simulados por Hata, otimizados e intervalo de confiança de 95%, para a Rua Major Gote. (b) Intervalo de confiança, aplicado aos valores medidos. (c) Otimização do modelo: valores medidos, simulados por Hata, otimizados e intervalo de confiança de 95%, para a Avenida Brasil. (d) Intervalo de confiança, aplicado aos valores medidos.





Fonte: autoria própria.

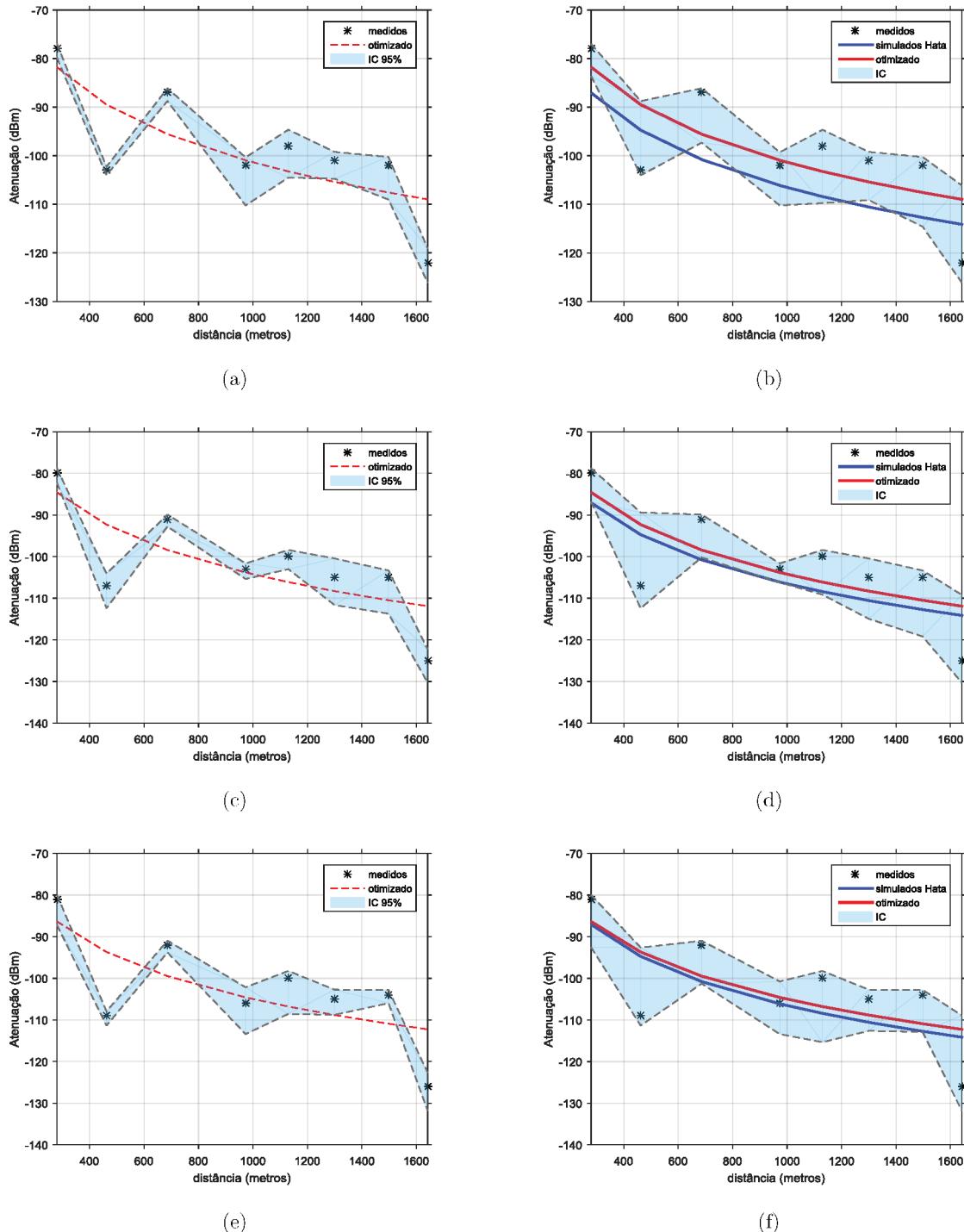
Os gráficos das figuras 27c e 27d revelaram intervalos de confiança estreitos para o *downlink*. Isto indica baixa variabilidade das medidas. Nos primeiros 800 m (ver Figura 27c), o modelo tem alguma dificuldade em adaptar-se às medidas coletadas. Esta dificuldade parece diminuir após esta região, uma vez que ele se enquadra dentro do intervalo de confiança na maior parte da região posterior a este limiar, ainda que o intervalo de confiança seja estreito.

4.1.5 Análise 5: propagação em ambiente densamente urbanizado em Uberlândia

Em condições climatológicas, geográficas e espaciais diferentes, novos testes foram conduzidos na cidade de Uberlândia (Minas Gerais, Brasil), nos entornos do Bairro Brasil. A principal intenção deste experimento foi analisar os efeitos do fator de espalhamento (SF – *spreading factor*) na propagação do sinal e em um cenário com as características aqui anunciadas. Os resultados são apresentados nos gráficos da Figura 28. De início, evidenciou-se que o RSSI medido variou pouco com a mudança do SF. Logo, o fator de espalhamento da propagação LoRa tem pouco (ou nenhum) efeito no desvanecimento do sinal durante a propagação. Por outro lado, vale relembrar que o

SF tem grande influência no *throughput* e no *time on air* como já discutido no Capítulo 2.

Figura 28 - Propagação na área urbana de Uberlândia, para 3 diferentes SFs. (a) e (b) SF7. (c) e (d) SF10. (e) e (f) SF12.



Fonte: autoria própria.

4.1.6 Análise 6: propagação em ambiente densamente urbanizado em Brasília

Na Figura 29 são apresentados os resultados obtidos para os valores de RSSI médios encontrados no presente cenário, além dos valores simulados por computador para os valores previstos pelo modelo de propagação de Hata. Vale salientar que os pontos que apresentaram PDR nula foram eliminados, sendo assim, devido às características da tecnologia, pontos que apresentaram bons resultados para a PDR quando utilizado determinado SF, podem não aparecer no gráfico quando utilizado SFs de menor valor, o que leva a diferenças no número de pontos de cada imagem.

Foram realizadas transmissões de 20 pacotes por ponto de medição, sempre com um ponto móvel em uma mochila a 1,5 m do solo e um ponto fixo, a 50 m de altura, sobre um prédio comercial. Partindo de observações diretas no local de testes, cada um dos 21 pontos foi classificado como LOS (visada direta) ou NLOS (sem visada direta), resultando na distribuição apresentada na Tabela 15. Essa classificação se faz necessária para que o comportamento da propagação seja analisado graficamente e para justificar a presença de pontos com potência de recepção divergentes do modelo. Essa análise será detalhada nos parágrafos seguintes.

Tabela 15 – Classificação dos pontos do cenário 5.

Tipo		Pontos											
LOS		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	18
LOS		12	13	14	15	16	17	19	20	21			
NLOS													

Fonte: autoria própria.

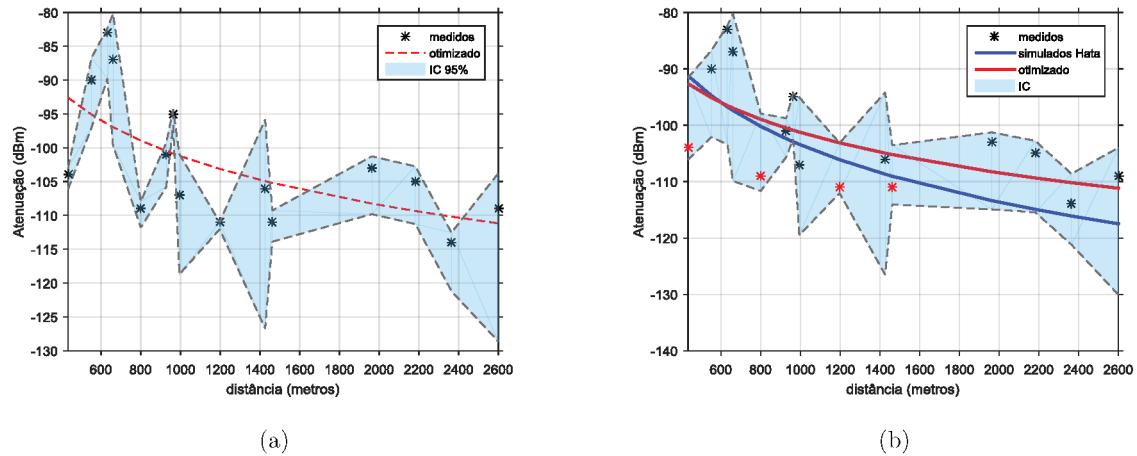
Observou-se em todos os cenários pesquisados, que o alcance da comunicação parece estar limitado a 3 km, sendo que, a distâncias maiores que esse valor a confiabilidade da comunicação depende de outros fatores. Sendo assim, esse resultado sugere que, para uma cobertura adequada, um raio máximo de 2 km, a partir da posição do *gateway*, deve ser usado. Este valor está abaixo do verificado por Petäjäjärvi

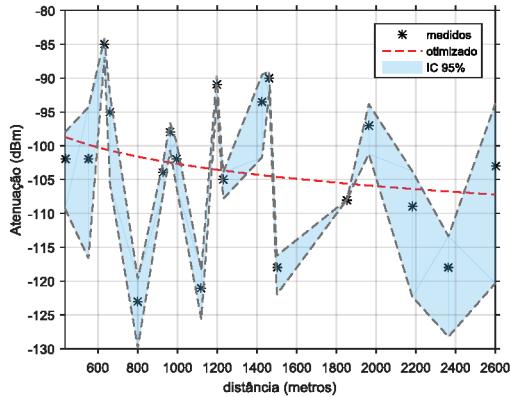
[49] que obteve resultados favoráveis até 5 km em Oulu, Finlândia, cidade de relevo majoritariamente plano, mas está de acordo com Centenaro [36], que também obteve o valor de 2 km de raio, porém sugeriu que o valor ideal seria 1,2 km.

Em relação aos ICs calculados, pode-se comprovar graficamente que a variação da potência recebida nos pontos (utilizada para o cálculo do IC), pode apresentar valores baixos para alguns pontos (resultando em um intervalo estreito), mas também pode se apresentar com valores mais dispersos, resultando em um IC mais amplo. O número de pacotes transmitidos neste cenário (20 pacotes) foi inferior ao utilizado em outros cenários (40 e 311 pacotes) e pode ter sido responsável por uma menor precisão no cálculo do IC, fato que deve ser levado em consideração em caso de aplicação real do método de otimização aqui proposto.

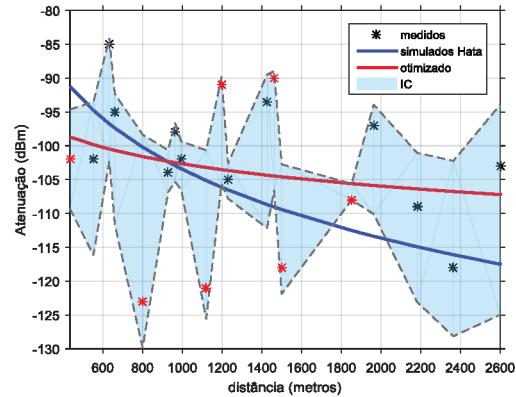
Quando analisados os pontos NLOS (que podem ser observados nas Figuras 29b e 29d como os pontos em '*' de cor vermelha), pode-se observar um alto desvio dos valores de RSSI medidos em relação aos esperados pelos modelos. Mesmo o método de otimização por AG tem dificuldade de estabelecer um intervalo confiável para esses pontos, levando a avaliar que outras soluções devem ser buscadas a trabalhar junto com o método proposto, a fim de se obter maior confiabilidade do mesmo.

Figura 29 - Propagação na área urbana de Brasília. (a) e (b) SF7. (c) e (d) SF12.





(c)



(d)

Fonte: autoria própria.

4.1.7 Análise 7: avaliação do modelo otimizado por meio do teste de qualidade de ajuste Qui-quadrado, para diferentes cenários

A fim de se avaliar o modelo otimizado proposto, o teste realizado na “análise 3” foi repetido, dessa vez utilizando-se os valores calculados pelo modelo. Os resultados estão sumarizados na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores do cálculo do teste de qualidade de ajuste Qui-quadrado.

Cenários	Valores tabelados	Valores previstos por AG	Graus de liberdade
Rua Major Gote	18.3	2.9	10
Avenida Brasil	26.3	2.1	16
Av. Afonso Pena SF7	14.1	4.6	7
Av. Afonso Pena SF10	14.1	4.5	7
Afonso Pena SF12	14.1	5.0	7
Brasília SF7	23.7	6.6	14
Brasília SF12	28.9	15.7	18

Fonte: autoria própria.

Nota-se que houve redução de todos os valores calculados, fazendo com que valores que se encontravam próximo ao limite do valor tabelado diminuíssem consideravelmente. Diante dos resultados obtidos comprova-se que o modelo otimizado proposto foi validado para representar a propagação LoRa, sem limitações de distância

entre transmissor e receptor, com a antena transmissora acima de 30 m e a receptora a 1,5 m.

4.2 Análise da QoS

Os cenários utilizados na análise da propagação também foram utilizados para a observação de indicativos da qualidade da comunicação LoRa. Esta seção apresenta os resultados obtidos naqueles cenários e em novos, que possuem características específicas e uma realidade próxima de situações facilmente encontradas em aplicações de IoT, assim como em *smart grids*.

4.2.1 Cenário 1: QoS em propagação radial (1a) e linear (1b)

Sob o ponto de vista de QoS, os gráficos da Figura 30 tentam caracterizar o comportamento da transmissão da informação. Neste cenário foi considerada uma distribuição radial de amostras em torno do *gateway* (pontos A a H)²². Esta distribuição, como descrita no capítulo anterior, tinha um raio de 730 m e as medidas foram feitas considerando um SF fixo igual a 12. Com base na análise destes gráficos (ver Figura 30^a) e considerando que todos os pontos de medição são aproximadamente equidistantes do *gateway*, observa-se que a máxima variação de RSSI foi de 19 dBm (entre os pontos ‘A’ e ‘C’). A maior variação de SNR foi de 16,1 nestes mesmos pontos. Se consultada a imagem do perfil topográfico da região de testes (Figura 23), observa-se que os maiores desvios de elevação entre os pontos medidos são de cerca de 15 m.

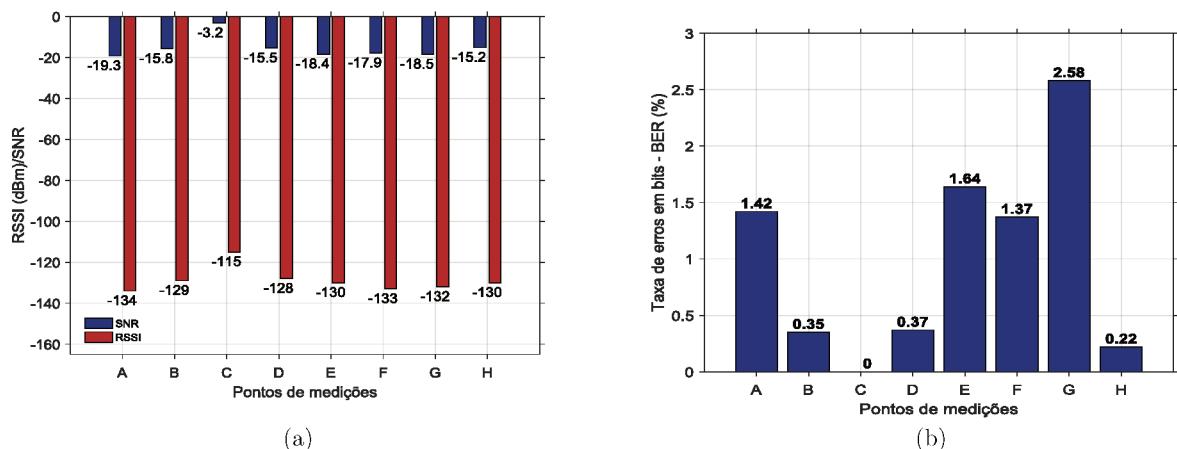
Se considerado o diâmetro de 730 m da área estudada, observa-se uma significativa variabilidade das condições geográficas do terreno. E, como esperado, o ponto de pior potência recebida (ponto ‘A’) foi o que apresentou a QoS mais degradada (somente 9,6% dos pacotes chegaram ao seu destino neste ponto). Por outro lado, os

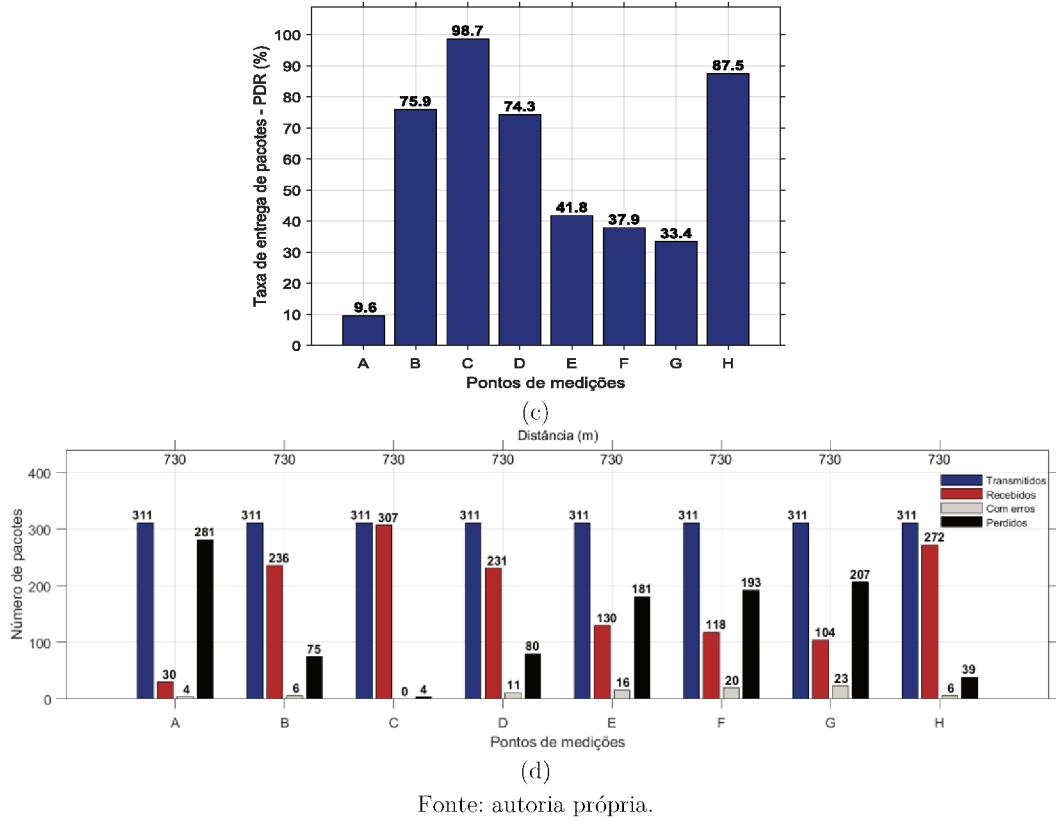
²² Observar Figura 22a

pontos ‘B’, ‘C’, ‘D’ e ‘H’ tiveram taxas de entrega de pacotes superiores a 74% e também as menores taxas de erro, conforme revelam os gráficos (b) e (c) da Figura 30. Mesmo estando todos os pontos equidistantes, a grande variação de parâmetros de QoS e propagação talvez possa ser explicada por fatores geográficos e por barreiras físicas entre TX e RX que são muito relevantes para estimativa de atenuação. Mesmo assim, alguma informação foi entregue em todos os pontos estudados. Outros trabalhos [49, 65-67] conseguiram, em um raio maior e usando o mesmo SF, taxas melhores. Contudo, as variações topológicas eram aparentemente mais favoráveis, por ser uma região plana e ao nível do mar. Um alcance semelhante ao obtido no presente trabalho pode ser encontrado em [26, 36].

Já para as vinte e seis amostras coletadas de cada um dos lados do percurso linear da avenida, observa-se (ver Figuras 31 a e 31b) que somente após o ponto 24 (cerca de 620 metros do TX) começa a haver alguma degradação do sinal. Até o ponto 23, a taxa de transmissão com sucesso média (ou seja, a PDR) foi de 100% e 99,7% para os setores verde e vermelho, respectivamente (ver Figuras 31f e 31g). Nestes três últimos pontos (24, 25 e 26), a taxa cai, chegando a atingir 66,6% para o ponto 26 do setor verde.

Figura 30 – Medidas de QoS do cenário 1 com distribuição radial de raio de 730 m. (a) RSSI e SNR medidos. (b) Taxa de erros em bits. (c) Taxa de entrega de pacotes. (d) Pacotes transmitidos, recebidos, recebidos com erros e perdidos.

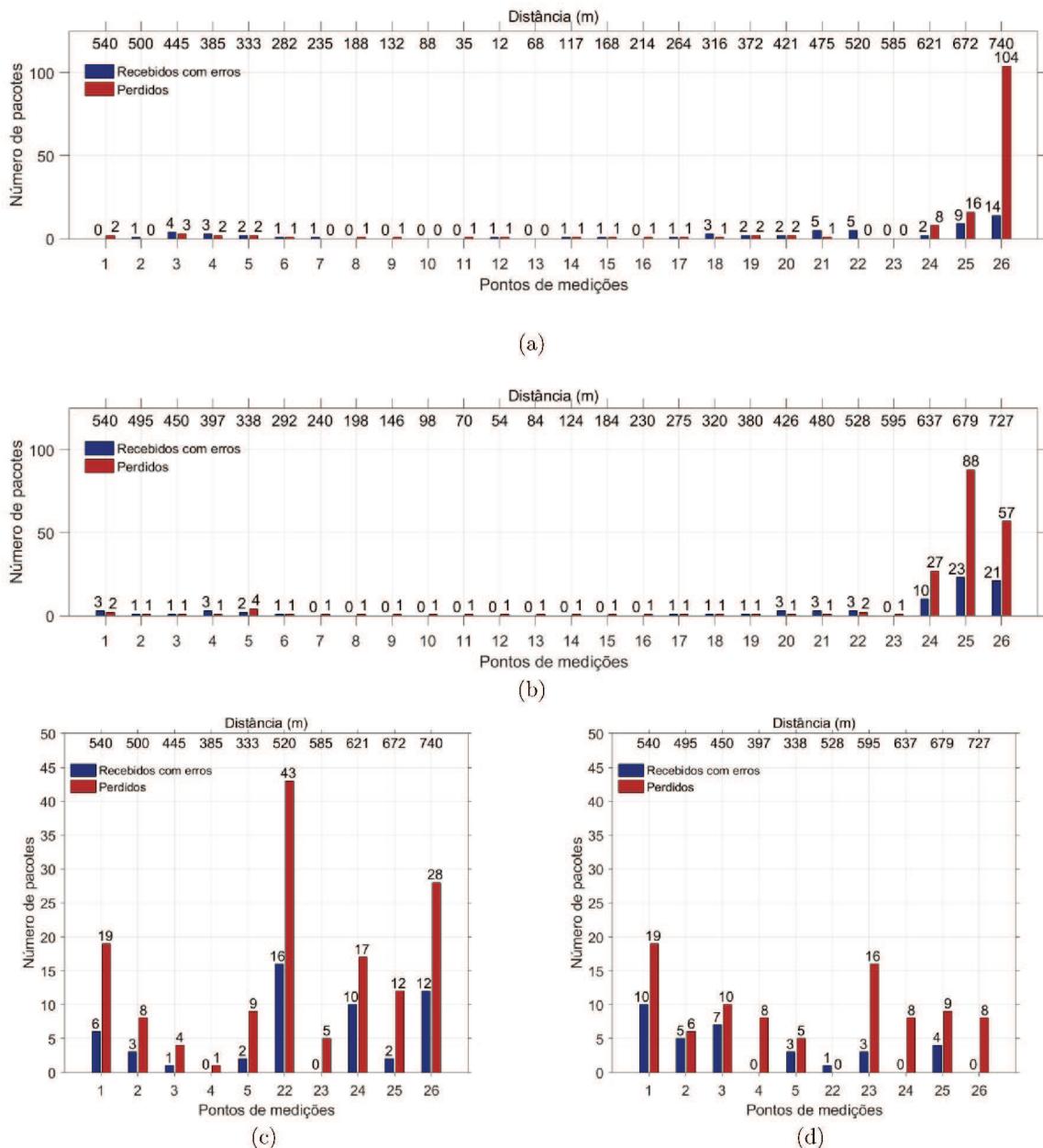


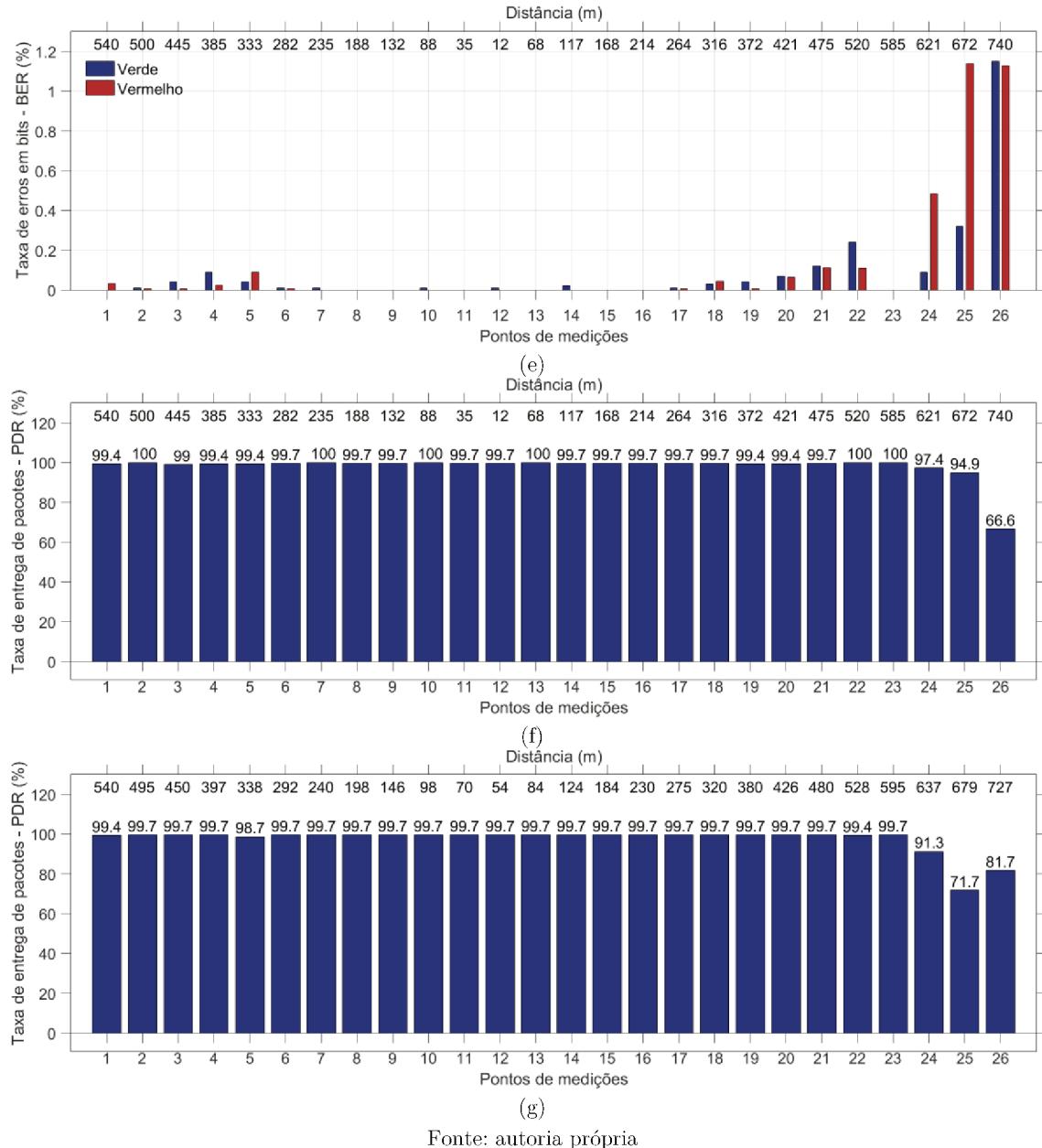


Fonte: autoria própria.

Ainda dentro das análises de QoS, a Figura 31 revela alguns destes valores para as 26 medições tomadas em cada um dos lados da avenida Getúlio Vargas em Patos de Minas. Aqui, observa-se uma alta disponibilidade da comunicação na maior parte do trajeto. A favor tem-se a geografia plana e a visada direta na maior parte do trecho. Por outro lado, trata-se de (i) um ambiente densamente povoado, com significativa quantidade de prédios altos e com muitas possibilidades de reflexões de sinais e (ii) a altura do *gateway* também não era privilegiada (cerca de 8 metros).

Figura 31 – Medidas do cenário 1 com distribuição linear das medições em campo. (a) Pacotes recebidos com erros e perdidos, para todos os pontos do setor verde, usando SF9. (b) Pacotes recebidos com erros e perdidos, para todos os pontos do setor vermelho, usando SF9. (c) Pacotes recebidos com erros e perdidos, para os pontos extremos do setor verde, usando SF12 (ver referência na Figura 22). (d) Pacotes recebidos com erros e perdidos, para os pontos extremos do setor vermelho, usando SF12. (e) Taxa de erros em bits para os 52 pontos. As barras em azul representando os pacotes recebidos com erros e em vermelho os perdidos. (f) PDR para os 26 pontos do setor verde. (g) PDR para os 26 pontos do setor vermelho.



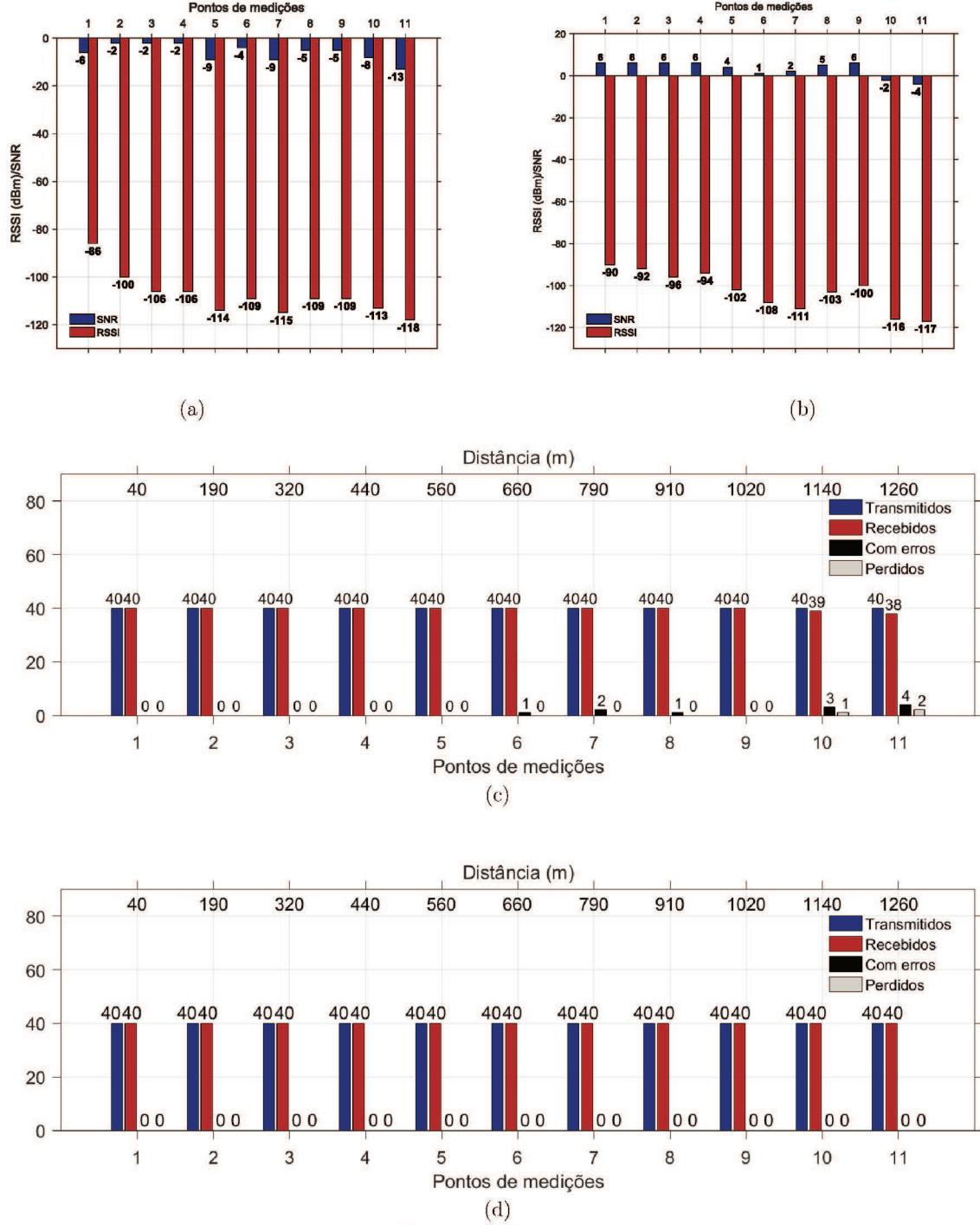


4.2.2 Cenário 2: QoS em ambiente predominantemente com visada direta em Patos de Minas

Pela análise da Figura 32, que apresenta os resultados obtidos para a Rua Major Gote, pode-se notar que, em *uplink*, os valores de potência recebidos são inferiores aos do *downlink* para a maior parte dos pontos coletados (os valores de SNR permanecem sempre negativos). Observa-se, também, pelas Figuras 32c e 32d, que na situação de *uplink*, ocorrem perdas de pacotes e recepção desses com erros. Esta mesma situação

não ocorre em comunicação *downlink*, na qual todos os pacotes transmitidos foram recebidos nos 11 pontos de medições (ver Figura 32d).

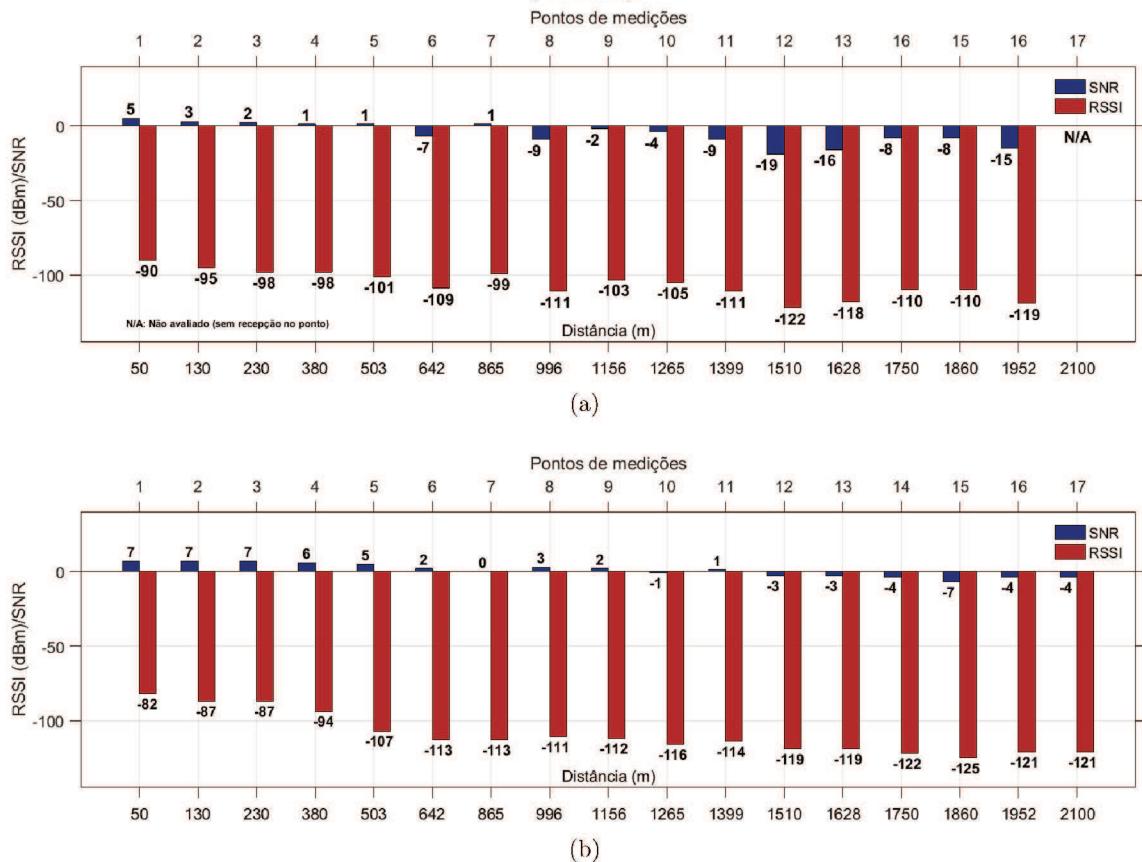
Figura 32 – Medições em campo para a Rua Major Gote. (a) RSSI e SNR com TX móvel (*uplink*). (b) RSSI e SNR com RX móvel (*downlink*). (c) Pacotes transmitidos, recebidos, recebidos com erro e perdidos, com TX móvel (*uplink*). (d) Pacotes transmitidos, recebidos, recebidos com erro e perdidos, com RX móvel (*downlink*).

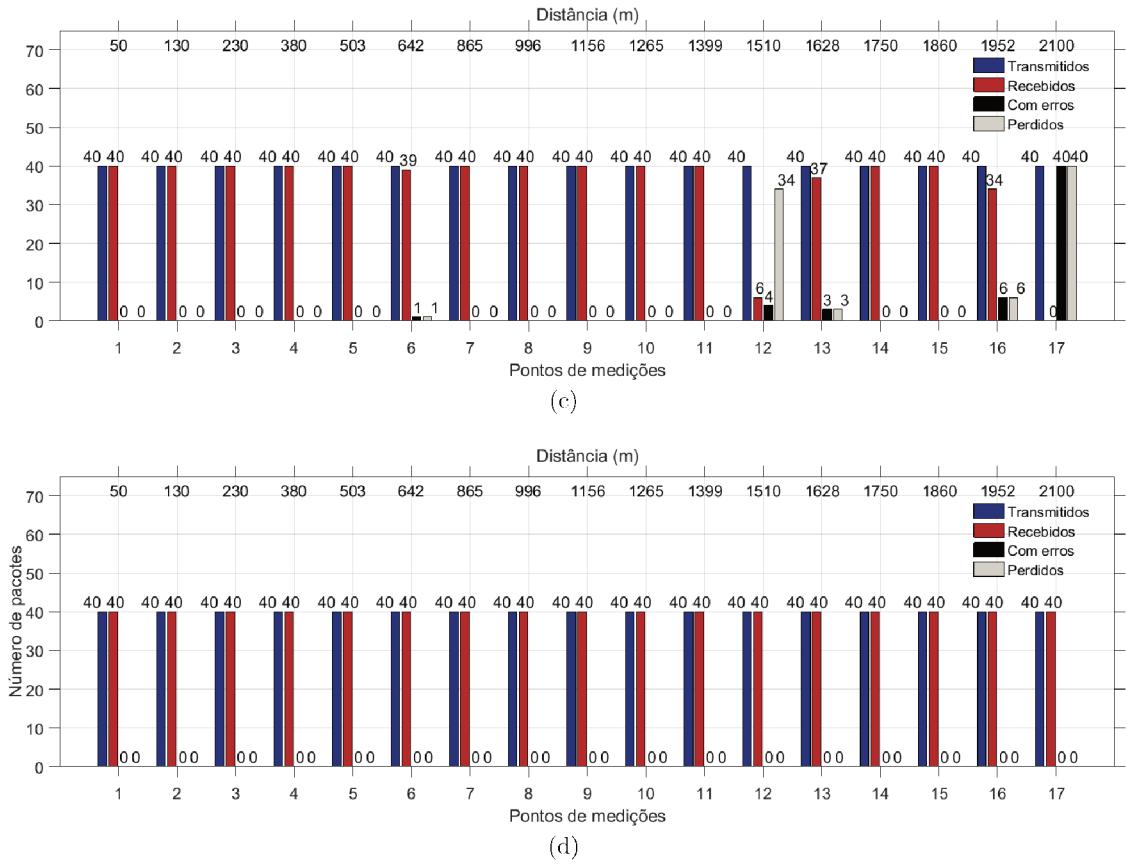


Fonte: autoria própria

Resultados semelhantes aos da Rua Major Gote foram encontrados para a Avenida Brasil e podem ser observados nas Figuras 33a-d. Com a mesma situação de visada direta, também se observou que, na situação de *downlink*, a comunicação é mais eficiente e com menor perda e erros em pacotes. No entanto, na comunicação em *uplink* também se obtêm resultados significativos para a maioria dos pontos, levando a concluir que a tecnologia poderia ser utilizada em um cenário de *smart grids*, com sensores enviando dados para o *gateway*, desde que analisada a influência na eficiência da comunicação.

Figura 33 – Medidas do cenário 2: medições em campo para a Avenida Brasil. (a) RSSI e SNR com TX móvel (*uplink*). (b) RSSI e SNR com RX móvel (*downlink*). (c) Pacotes transmitidos, recebidos, recebidos com erro e perdidos, com TX móvel (*uplink*). (d) Pacotes transmitidos, recebidos, recebidos com erro e perdidos, com RX móvel (*downlink*).





Fonte: autoria própria.

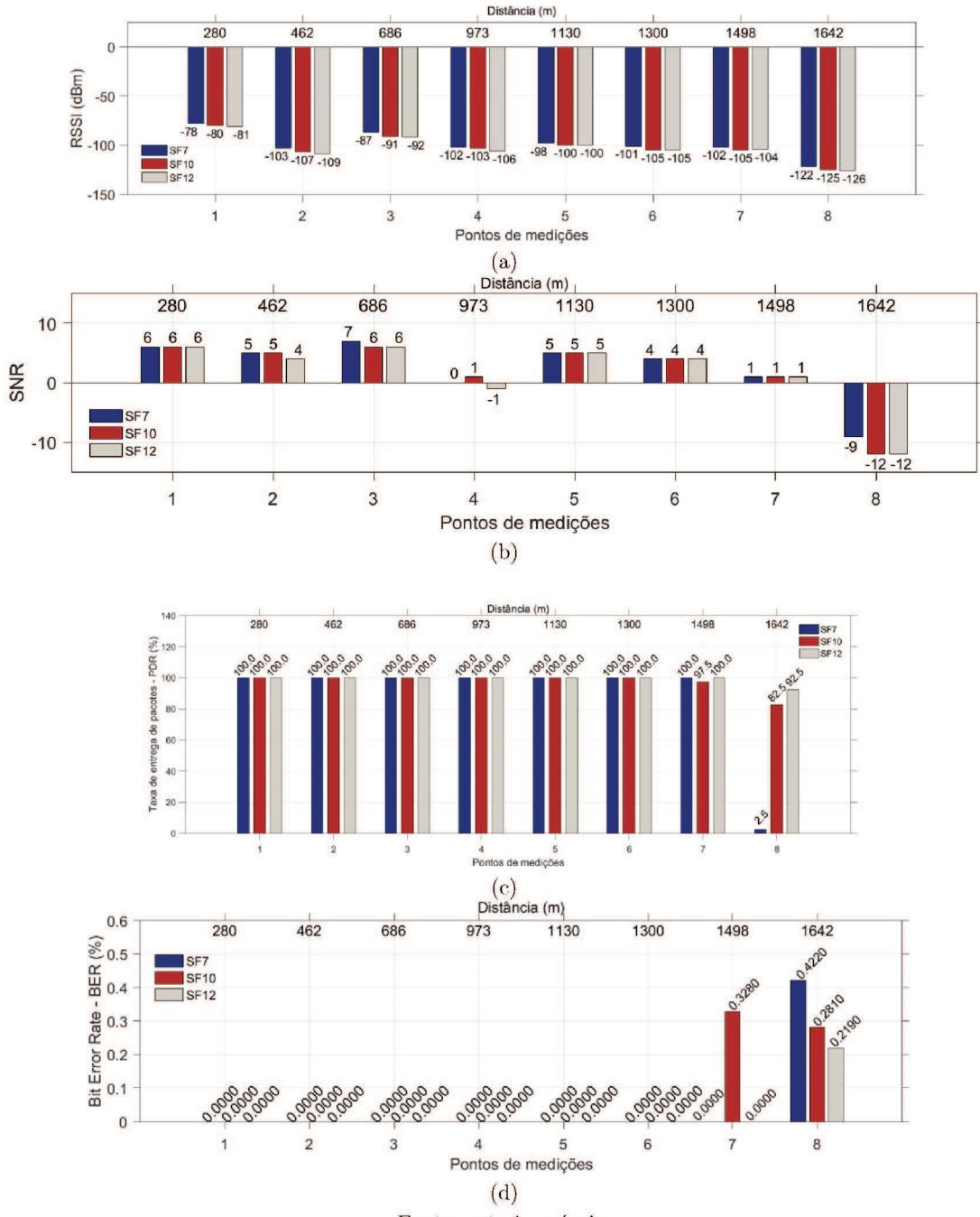
4.2.3 Cenário 3: QoS em ambiente predominantemente com visada direta em Uberlândia

Quanto à análise da QoS, pode-se observar que a PDR apenas apresentou valores diferentes de 100% para os dois pontos mais distantes deste cenário (pontos 7 e 8), conforme revela o gráfico da Figura 34c. Para o ponto distante 1498 m do *gateway* (ponto 7), o valor foi de 97,5% para o SF10. Já para o SF7 e SF12, a PDR foi de 100%. Para o ponto localizado a 1642 m (ponto 8), pode-se perceber uma influência marcante do fator de espalhamento, uma vez que o maior SF apresentou significativa diferença na taxa de entrega de pacotes (92,5%), enquanto o menor SF apenas conseguiu atingir 2,5% de entrega.

Na Figura 34d observa-se que a taxa de erros de bits é nula até o sexto ponto mais distante do *gateway* (1300 m), não ultrapassando 0,5% para o ponto extremo (1642 m, SF7). Estes resultados demonstraram uma significativa robustez da tecnologia

LoRa, com um enlace capaz de demodular sinais de baixa potência recebida (ordem de -137 dBm).

Figura 34 – Medidas de QoS para a Avenida Afonso Pena, para três diferentes SF's. (a) RSSI versus distância. (b) SNR versus distância. (c) Taxa de entrega de pacotes (PDR). (d) Taxa de erros em bits.

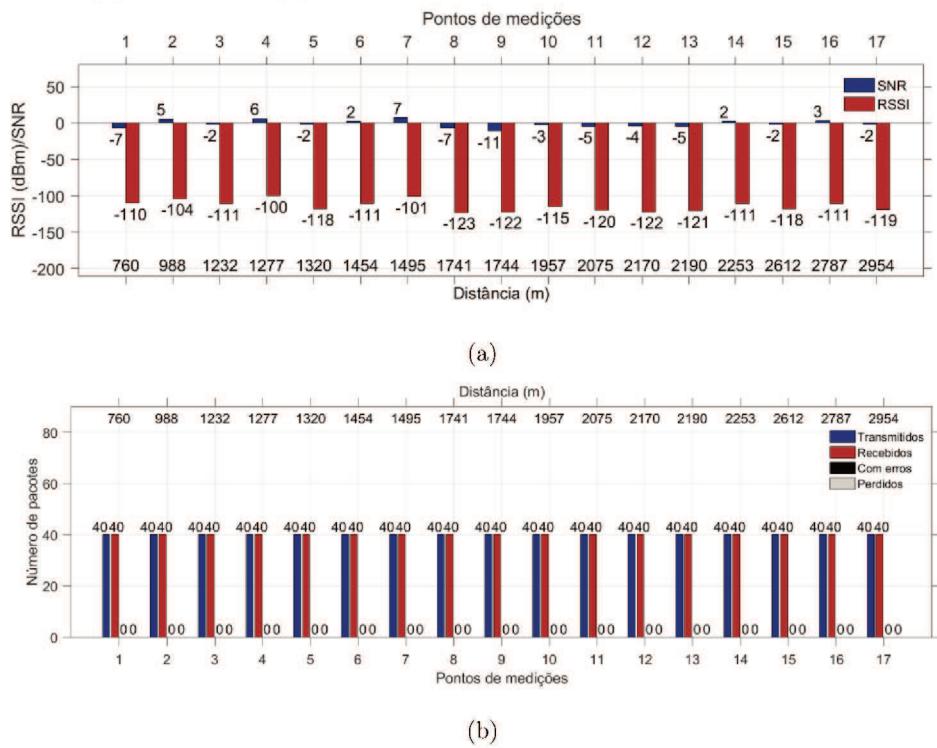


Fonte: autoria própria.

4.2.4 Cenário 4: QoS em ambiente fora de linha de visada (NLOS) em Patos de Minas

Conforme pode ser observado na Figura 35a, para todos os pontos analisados neste cenário, os valores de SNR apresentaram-se próximos de zero dBm. Mesmo pontos mais distantes do *gateway*, como no caso dos 16 e 17 (que distam ~3 km do *gateway*), o valor de SNR permaneceu próximo de zero, indicando uma degradação relativamente constante do sinal. Já o RSSI se manteve dentro da faixa de sensibilidade do receptor (ver Tabela 2) que permitiu a demodulação pelo rádio em todos os pontos desse cenário. Em virtude desta SNR²³ e RSSI, a taxa de recepção de pacotes foi de 100% em todos os pontos como revela a Figura 35b. Também não foram evidenciadas inversões de bits, mesmo sendo pontos sem visada direta e utilizando apenas recursos da camada física (sem protocolos de códigos corretores de erro).

Figura 35 – Medidas de QoS para os pontos do cenário 4, em Patos de Minas. Apenas analisado *downlink* e SF12.
 (a) RSSI e SNR. (b) Pacotes transmitidos, recebidos, com erros e perdidos.



Fonte: autoria própria.

²³ A tecnologia LoRa é capaz de decodificar (em SF 12) SNRs com valores de até -20.

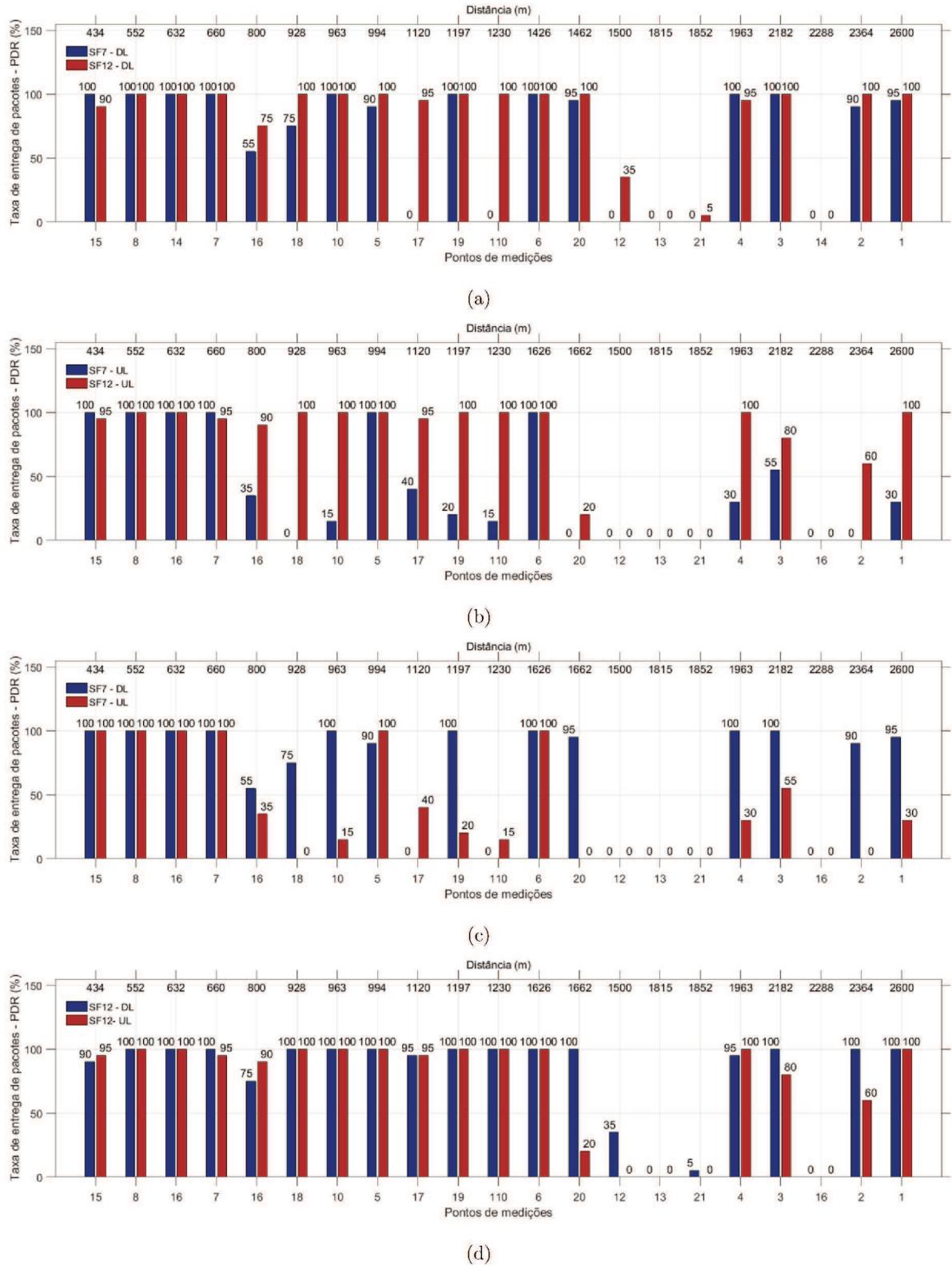
Embora neste cenário não haja evidência de interferência maciça de outras tecnologias, resultados bem parecidos foram obtidos em Brasília, em um setor densamente urbanizado, com construções elevadas e muitas antenas de transmissão ao redor.

4.2.5 Cenário 5: QoS em ambiente em linha de visada (LOS) e fora de linha de visada (NLOS) em Brasília

Na Figura 36, resultados de QoS são apresentados para todos os 21 pontos de medições deste cenário, nas situações de DL, UL, SF7 e SF12. Valores da PDR foram exibidos em conjunto, a fim de se comparar os resultados. A Figura 36a ilustra a taxa de entrega de pacotes quando analisada a situação de DL, para dois SFs. Pode-se observar que, na maioria dos pontos o SF12 obteve melhores resultados, sendo que pontos que apresentaram taxa nula (com SF7), chegaram a receber pacotes quando utilizado o SF12. Situação semelhante pode ser observada na Figura 36b, quando se utiliza UL. Pontos classificados como NLOS (12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20 e 21) apresentaram taxas bastante inferiores às encontradas em DL (ver Figuras 36b e 36c), principalmente quando usado SF7. Considerando que o SF7 apresenta a maior taxa de transferência de dados, sua utilização deve ser analisada com critérios em situações de UL.

A confiabilidade na entrega de pacotes, tanto em UL quanto em DL, é comparada na Figura 36d. Nela pode-se ver que, com SF12, são obtidas altas taxas de entrega de pacotes e que pontos como 12, 13 e 21 não são atingidos por nenhuma das duas configurações de SFs, provavelmente por se encontrarem atrás de algum obstáculo relevante, uma vez que pontos mais distantes como 1 e 2 têm resultados positivos para a PDR.

Figura 36 – Medidas de QoS para os pontos do cenário 5, em Brasília. (a) Taxa de entrega de pacotes sem erros (PDR), para SF7 e SF12, *downlink*. (b) PDR para SF7 e SF12, em *uplink*. (c) PDR para SF7 em *downlink* e *uplink*. (d) PDR para SF12 e em *downlink* e *uplink*.



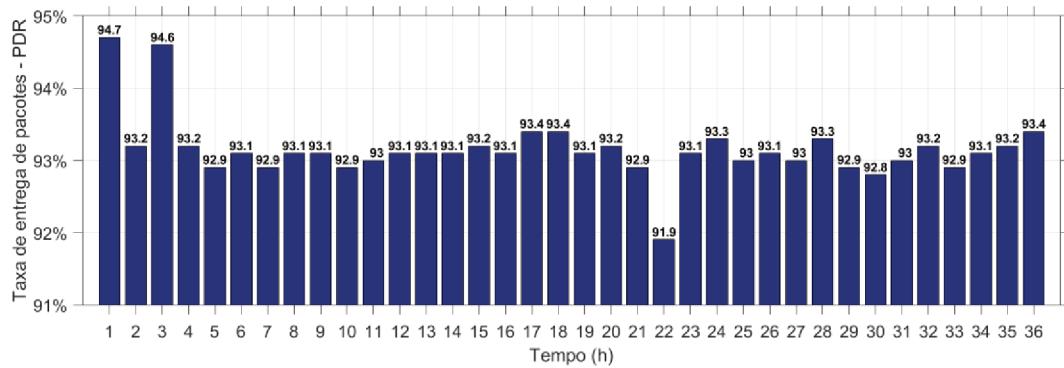
Fonte: autoria própria.

4.2.6 Cenário 6: avaliação da disponibilidade da comunicação

O teste realizado permitiu avaliar o comportamento da comunicação LoRa em condições ambientais diversas, como diferenças de temperatura devido ao período diurno e noturno e presença de precipitação de baixa intensidade, ocorrida durante o período de 36 horas. O maior valor de PDR encontrado foi de 94,7%, o menor de 91,9%, sendo o valor médio de 93,3%. Os valores, estimados hora por hora, podem ser consultados na Figura 37. Vale relembrar que apenas a camada física da tecnologia está sendo considerada e por isto recursos de retransmissão não estão sendo usados, ainda que tenham potencial efeito de melhorar estes índices de QoS.

Durante o teste, que teve início às 13h00min, houve a ocorrência de uma precipitação de pequena intensidade na manhã do dia seguinte, o que pode ter influenciado a taxa mínima de PDR de 91,9% já mencionada (ocorrida na hora 22 da Figura 37). No restante da duração do teste não foram observadas grandes variações nas condições climáticas em intervalos inferiores a uma hora.

Figura 37 – Disponibilidade da comunicação LoRa durante 36 horas ininterruptas, com distância entre TX e RX de 877 m.



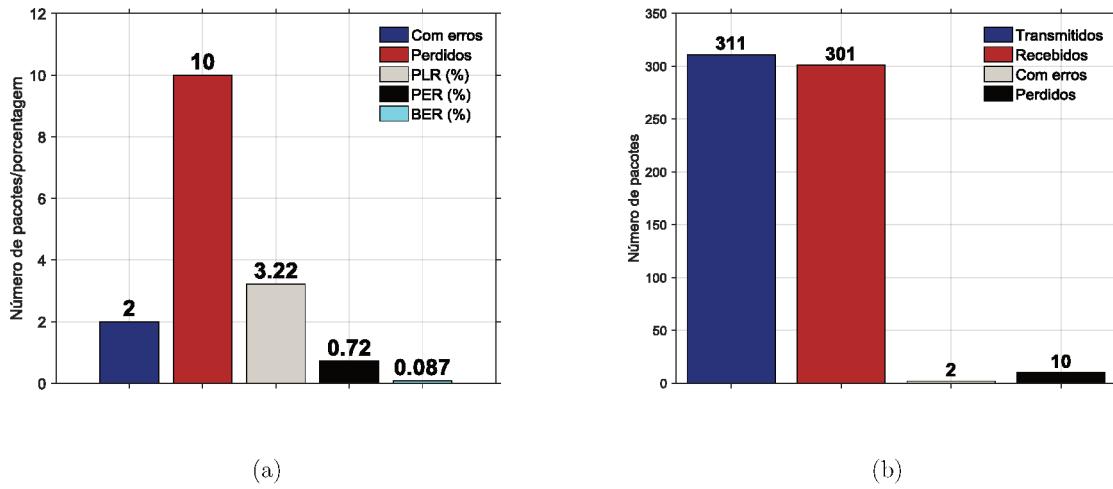
Fonte: autoria própria.

4.2.7 Cenário 7: QoS em ambiente rural/suburbano

Neste cenário a distância foi mantida fixa em 3,2 km. A intenção primária foi avaliar o comportamento do sinal LoRa em visada não direta, em ambiente rural com relevante presença de obstáculos (vegetação de grande porte, montanhas, etc.).

Conforme pode ser observado na Figura 38b, dos 311 pacotes transmitidos nesse teste, apenas 10 foram perdidos e 2 recebidos com erros, apresentando uma taxa de entrega de pacotes (PDR) de 96,78% e uma taxa de perda de pacotes (PLR) de 3,22%. A taxa de erros em pacotes (PER) foi de 0,72% e a taxa de erros de bits foi de 0,087%. Esse comportamento foi observado ainda que com baixa elevação da antena transmissora (5 m). Esta característica é interessante para a cobertura de redes que visam atender consumidores em áreas rurais usando postes ou mastros já pré-existentes.

Figura 38 – Resultados para o teste rural/suburbano. (a) Pacotes recebidos com erro, perdidos, PLR, PER e BER para o teste rural/suburbano do cenário 2 mantendo a distância entre TX e RX fixa em 3,2 km. (b) Pacotes transmitidos, recebidos, recebidos com erros e perdidos, para o teste rural/suburbano. (c) Histograma do RSSI recebido.



(a)

(b)

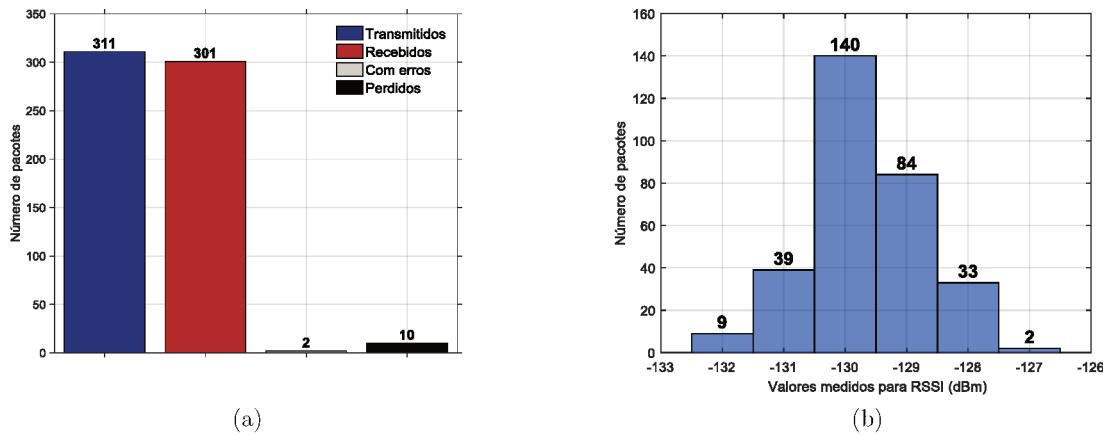
Fonte: autoria própria.

4.2.8 Cenário 8: QoS em ambiente esparsamente urbanizado

Em um cenário caracterizado por baixa densidade de edificações, os resultados observados apontaram um incremento considerável no alcance (se comparado com o obtido no cenário 1, que foi de 730 m), atingindo 1,26 km. A SNR média foi de -15 e o RSSI médio igual a -127 dBm, 10 dBm acima do limite inferior da sensibilidade declarada pelo fabricante do rádio SX1272 (que é de -137 dBm, para SF12). Conforme ilustrado na Figura 39, ocorreu uma perda de 10 pacotes na transmissão. Apesar desta perda, todos os pacotes efetivamente recebidos apresentaram-se íntegros em relação ao

seu conteúdo, ocorrendo uma BER nula e uma PDR de 96,8%. O histograma apresentado na Figura 39b, assim como no cenário rural/suburbano, se concentrou em torno de -129 e -130 dBm, com um total 224 dos 301 recebidos. Como o ponto analisado encontrava-se a uma diferença de elevação de 60 m acima do ponto do *gateway* e o ambiente analisado não possui construções de grande porte, ocorreu uma situação de aparente visada direta entre transmissor e receptor, o que pode ter contribuído para o maior alcance obtido, em comparação com os resultados obtidos nos dois testes do cenário 1.

Figura 39 – Resultados do cenário 8, propagação em ambiente esparsamente urbanizado. (a) Pacotes transmitidos, recebidos, recebidos com erros e perdidos. (b) Histograma do RSSI.



Fonte: autoria própria.

4.3 Discussões

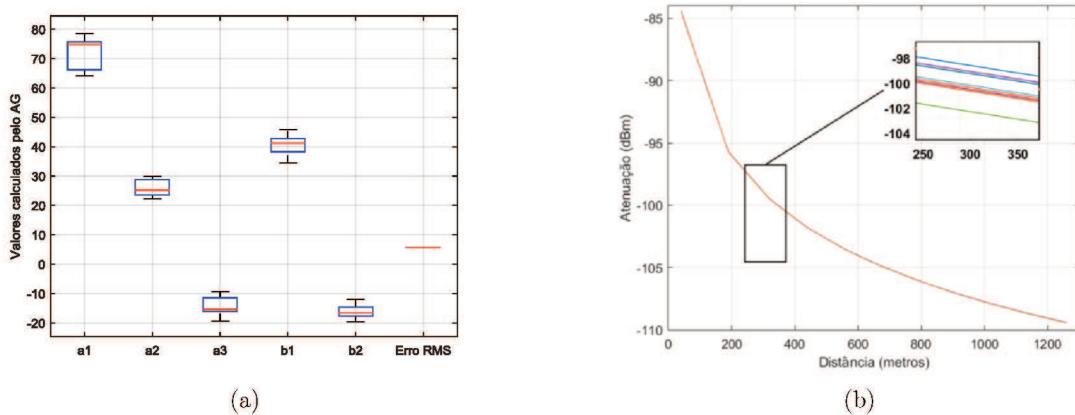
4.3.1 Otimização do modelo com AG

A Tabela 12, apresentada logo no início deste capítulo, apresentou todos os resultados do processo de otimização do modelo de Hata nos cenários aplicáveis. Como o IC era calculado ponto a ponto, os resultados foram exibidos apenas nos gráficos, a fim de que se evitassem longas tabelas desnecessárias. De qualquer forma, o AG foi aplicado somente ao modelo determinístico de Hata para adaptar cinco de seus

coeficientes, de modo que a curva do modelo otimizado pudesse se adequar, da melhor forma possível, aos valores de RSSI medidos em campo pelo *transceiver*.

Cabe salientar que a cada nova execução do AG, novos valores serão obtidos para os cinco parâmetros. Este resultado pode ser parcialmente explicado pela (i) característica de aleatoriedade na geração de novas soluções (ou indivíduos, no jargão técnico); e (ii) também por um amplo espaço de busca com muitos mínimos locais. De qualquer forma, a não-repetibilidade dos valores numéricos não deve comprometer significativamente o método, uma vez que estas constantes não guardam significados físicos diretos. Elas se ocupam da tarefa de adaptar o modelo de O-H ao cenário específico analisado. E mesmo que os valores tenham ampla variabilidade, o resultado final (a curva com indicação de atenuação) teve pouca variação. As Figura 40a e 42b ilustram o anteriormente citado. Na Figura 40a pode-se observar que a variação de cada um dos parâmetros otimizados pelo AG de fato ocorre, porém se mantém dentro de uma estreita faixa. Também na Figura 40b, que apresenta dez curvas do modelo otimizado, observa-se que estas praticamente se sobrepõem. O detalhe ampliado na figura permite observar as curvas em separado. Uma vez que interesse aqui é o gráfico - e não os valores das constantes em si – esta questão da variabilidade não é motivo de grandes preocupações.

Figura 40 – Repetição do procedimento de otimização por AG para um mesmo conjunto de dados de modo a avaliar a variação numérica das cinco constantes do modelo de O-H. O método foi repetido dez vezes (a) Variações dos valores dos parâmetros. (b) Dez curvas dos modelos otimizados. Elas estão sobrepostas.



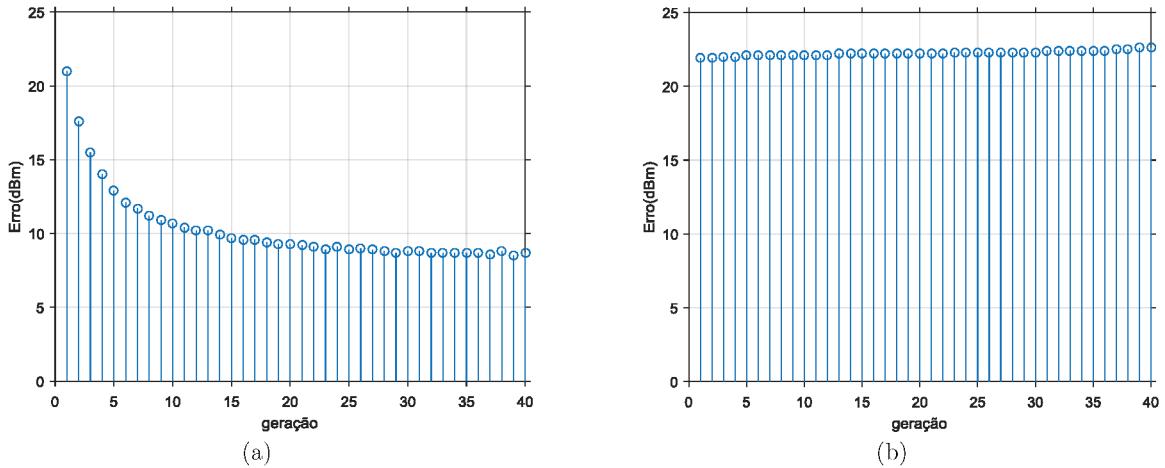
Fonte: autoria própria.

A mesma Tabela 12 traz ainda os valores calculados para os erros quadráticos médios entre (i) o modelo otimizado e os valores medidos, (ii) o modelo de Okumura e os valores medidos (iii) o modelo de Hata suburbano e os valores medidos. Esses erros representam quantos dBm os valores simulados/previstos se afastam dos valores medidos, em média, para cada cenário analisado. Observando-se os resultados para os erros, verifica-se que o modelo otimizado por AG proposto nesse trabalho é o que viabiliza, aparentemente, uma melhor reprodução das medidas esperadas para a transmissão LoRa.

Para avaliar a efetividade do AG no processo de convergência da solução, ilustrou-se na Figura 41 o erro médio das gerações processadas, em um dado teste padrão. Em ambos os casos (gráfico da esquerda e da direita) usou-se o mesmo conjunto de dados. A diferença entre eles está no índice de seleção, que no gráfico da esquerda era de oitenta²⁴ por cento (80%) e no da direita, vinte (20%). Percebe-se pelos gráficos, que neste primeiro caso a convergência acontece e, por volta da geração 30, o erro RMS estabiliza em torno de 9 dBm, aproximadamente. Já no outro caso (*i.e.*, 20% de seleção), percebe-se que o erro se manteve praticamente constante. Este resultado pode ser atribuído à baixa taxa de aproveitamento de indivíduos (soluções e genes), que faz com que o AG gere 80% de novos indivíduos na nova população que, por ter caráter aleatório, estão menos aptos, mantendo o erro elevado. Mesmo assim, em ambos os casos o erro (ou aptidão) do melhor individuo é de 4,0 dBm. Para o problema aqui tratado a taxa de seleção de 20% foi escolhida por introduzir maior variabilidade genética (ou seja, percorre mais o espaço de busca), ainda que o erro médio da geração seja prejudicado. Além disso, a utilização de 40 gerações (como limite) na execução do AG foi escolhida porque, durante a etapa de testes preliminares, observou-se que com 30 gerações já ocorria a convergência e o mecanismo de seletismo já havia selecionado uma solução cujo erro mantinha-se constante nas demais gerações.

²⁴ Isto indica que 20% dos indivíduos eram descartados pela regra da roleta e outros 20% eram aleatoriamente selecionados.

Figura 41 - Erros médios RMS por geração considerando cenários de taxas de seleção de (a) 80% e (b) 20%.



Fonte: autoria própria.

4.3.2 Análise pelo modelo otimizado

O processo de implantação de uma rede de comunicação, especialmente em larga escala, exige amplo uso de ferramentas capazes de dar ao seu projetista capacidade de simular e testar diferentes cenários de forma mais realística possível e, com base nisto, tomar decisões para implantação prática da tecnologia em campo. Neste sentido é importante a construção de uma ferramenta que possa trabalhar com dados realísticos (*i.e.*, coletados em campo), de modo que estes possam oferecer ao seu usuário a maior quantidade de informações possíveis, que facilitem o processo de implantação e otimização de recursos (físicos, espectro, etc.). Neste sentido, o processo de refinamento (ou ‘tuning’) de parâmetros de modelos de propagação já tem sido empregado em alguns trabalhos [6, 50, 68], para outros propósitos. Mesmo embora não seja uma “solução única” voltada a este objetivo²⁵, é um poderoso recurso para entender a propagação do sinal.

Neste intuito de tentar prover ao projetista um bom planejamento de implantação, este trabalho tenta ir além da otimização de modelos e incorporar a esta vertente de pesquisa, recursos de análise da confiança das medidas que, aqui, foi feita

²⁵ Inúmeros outros recursos são necessários para uma completa avaliação de cenário. Entende-se que a simulação da propagação é apenas uma destas ferramentas que complementa o conjunto de ferramentas necessárias para um bom planejamento.

pela inserção dos intervalos de confiança. Mais especificamente, este trabalho se preocupou em prover um meio robusto – usando AG – para avaliar sinais da tecnologia LoRa. Até o presente momento não se encontrou na literatura técnica trabalho com foco similar, seja em LoRa ou em outra tecnologia similar, que tenha sido empregada para IoT.

O estudo dos gráficos produzidos pelo método aqui proposto permite uma análise mais realística das medidas, frente ao seu comportamento determinístico (ou seja, ao modelo otimizado) ou as suas variações estocásticas, representadas pelo intervalo de confiança. Os cinco parâmetros otimizados no modelo devem tentar absorver, na medida do possível, peculiaridades ponto a ponto de medição. Assim, mesmo que não se tenha informações sobre a topologia local daquele ponto, por exemplo, espera-se que parte do comportamento da propagação seja incorporada (em alguma medida), aos parâmetros e que estes possam reproduzir o comportamento da propagação naquele ponto ou região.

A própria análise do intervalo de confiança ajuda a entender o quanto bem (ou mal), o modelo otimizado consegue refletir este comportamento. Quando o modelo está, por exemplo, dentro do intervalo de confiança e próximo ao valor médio de RSSI medido, espera-se haver boa correspondência entre o medido e o simulado. Em uma rede que pretende ter amplo alcance, é importante entender o comportamento da propagação do sinal, assim como é também importante, adaptar o modelo constantemente, por meio de novas medidas (usando um *drive test*, por exemplo). O uso de IC associados à otimização determinística, permite de certa forma uma “setorização” das características de propagação dentro de um intervalo de distância entre medidas.

Esta setorização tenta reproduzir, dentro daquele intervalo, peculiaridades da propagação. Até mesmo nos pontos onde o modelo não tem boa aderência com as

medidas (*e.g.*, fora do intervalo de confiança), esta limitação fica explícita nos gráficos, dando ao seu avaliador claro aviso que as análises nesta região têm confiança limitada.

Além das questões apontadas nos parágrafos anteriores, esta pesquisa tentou – em igual importância – investigar e caracterizar o desempenho da tecnologia LoRa em camada física. Foi analisado seu desempenho em diferentes cenários, condições e configurações, incluindo análises de *downlink* e *uplink*. Isto é importante porque a comunicação bidirecional pode ter grande influência em algumas aplicações, especialmente em *smart grids*.

Medições realizadas na Rua Major Gote e na Avenida Brasil com o *end-device* atuando como dispositivo móvel foram repetidas (agora com o *gateway* móvel e *end-device* fixo), tomando-se o cuidado de realizar essas medições nos mesmos locais e período do dia. A fim de avaliar se os dois conjuntos de medidas guardam correlação entre si, foi utilizado o teste do coeficiente de correlação de Pearson (normalmente representado pela letra “r”) que mede o grau²⁶ de correlação linear entre duas variáveis quantitativas. A Tabela 17 apresenta os resultados para a Rua Major Gote e a Tabela 18 os resultados da Avenida Brasil. Pode-se notar que existe um alto coeficiente de correlação entre os conjuntos de medidas (acima de 0,8) que indica que o comportamento da comunicação não sofre grandes alterações estruturais em situação de *downlink* (DL) e *uplink* (UL).

Tabela 17 – Coeficiente de correlação de Pearson para *uplink* e *downlink* para a Rua Major Gote.

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	C. P.
RSSI DL	-90	-92	-96	-94	-102	-108	-111	-103	-100	-116	-117	0,80
RSSI UL	-86	-100	-106	-106	-114	-109	-115	-109	-109	-113	-118	

Fonte: autoria própria.

²⁶ Este coeficiente assume apenas valores entre -1 e 1, inclusive, sendo que (i) $r = 1$ significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis, (ii) $r = -1$ significa uma correlação perfeita negativa, ou seja se uma variável aumenta, a outra sempre diminui e (iii) $r = 0$ significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.

Tabela 18 – Coeficiente de correlação de Pearson para *uplink* e *downlink* para a Avenida Brasil.

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	C.P.
RSSI DL	-82	-87	-87	-94	-107	-113	-113	-111	-112	-116	-114	-119	-119	-122	-125	-121	-121	
RSSI UL	-90	-95	-98	-98	-101	-109	-99	-111	-103	-105	-111	-122	-118	-110	-110	-119	-120	

Fonte: autoria própria.

Os cenários em que ocorre situação que pode ser considerada análoga a LOS apresentaram resultados próximos ao esperado pelos modelos de propagação analisados e o modelo otimizado apresentou resultados observados próximos aos medidos. Para cenários que não podem ser considerados LOS, ou seja são NLOS, como no cenário 1 (pontos dispersos em Patos de Minas) e alguns pontos do cenário 4 (Brasília), as análises de propagação apresentam comportamento bastante diferente do esperado pelos modelos. A quantidade de variáveis envolvidas em uma propagação em ambiente urbanizado dificulta uma previsão precisa da propagação.

Em ambientes que apresentem situação de NLOS, como nos apresentados anteriormente, sugere-se realizar uma classificação e setorização da região a ser estudada, observando o número de edificações de maior elevação, levando em consideração o perfil topográfico de cada setor, a presença de árvores, como parques e florestas, a presença de corpos d'água, barreiras entre *gateway* e *end-device*, presença de subestações de energia elétrica e redes de transmissão de alta-tensão, entre outros fatores. Após essa setorização, novos conjuntos de medidas devem ser realizados buscando a escolha de pontos ideais de instalação dos *gateways*. Outros trabalhos [65-67] que investigaram LoRa também focaram suas medições em visada direta ou linha reta. Suas análises não envolveram modelagem determinística tampouco otimização de modelos. De qualquer forma, a análise, previsão ou estimativa de potência recebida em regiões densamente povoadas em visada não direta, representa um desafio que ainda merece muita atenção.

Além da questão relatada no parágrafo anterior, existe um questionamento recorrente entre alguns autores [28, 69] sobre a escalabilidade da tecnologia LoRa e estudos continuam sendo realizados por meio de simuladores de rede. O desenvolvimento de uma ferramenta computacional que auxilie no planejamento de redes LoRa também segue como possibilidades de trabalhos futuros para simulações mais realísticas.

Apesar de terem sido pesquisados cenários diferentes, cada um com um objetivo específico, o presente trabalho, além das limitações já listadas no capítulo 1 (seção 1.3) baseou-se em um número restrito de cenários e de número de pontos de medições. Não foram incluídos no estudo (i) a possível interferência em subestações de energia elétrica, como pesquisado em [67], (ii) ambientes de usinas de geração elétrica, (iii) ambientes industriais [70] e (iv) em ambientes internos, como tratados em [71-73]. De qualquer forma, estes trabalhos referenciados anteriormente trataram em alguma medida estas questões, ainda que mais em nível de QoS. Já outros, focam estritamente em simulação como é o caso do trabalho visto em [69]. Neste, avaliou-se a escalabilidade da tecnologia para diferentes implantações de rede em um raio de 6100 m, segundo atribuições de SFs (para os *end-devices*) aleatórias, fixas para SFs de 7 a 12 e baseadas na taxa de erros em pacotes (sendo estabelecidos limites inferior e superior desejados). Este estudo foi realizado estritamente em um simulador (NS-3) e concluiu que o uso de SFs fixos causa alta degradação da PDR a partir de 1000 nós/*gateway*, e deve ser evitado. Em uma distribuição baseada na taxa de erros em pacotes (PER) encontrou-se, para um círculo de mesmo raio citado anteriormente, uma distribuição de cerca de 43% para SF12, 20% SF11, 12% SF10, 8% SF9, 6% SF8 e 11% para SF7, para um único *gateway* localizado no centro do círculo

A partir de um conjunto de testes empíricos em uma determinada região, o engenheiro de redes pode prever, com uma segurança de 95%, valores de RSSI em pontos não necessariamente analisados, contribuindo para tornar o trabalho do projeto

de cobertura da rede mais fácil. Nas regiões onde o modelo tem baixa aderência, o engenheiro tem esta consciência pela própria análise dos gráficos. Embora o trabalho tenha sido amparado por um conjunto de testes empíricos relativamente significante, o processo pode ser aprimorado a partir de um levantamento maciço de pontos, por meio de um *drive test*, no qual grande parte da cidade ou do cenário que se busca cobrir com a comunicação, seja percorrido. No entanto, com base nos resultados obtidos, acredita-se que o estudo aqui proposto ofereça uma solidez maior do que a existente, para embasar novos projetos de instalações de redes IoT-LoRa.

Por fim, o estudo não foi fortemente correlacionado com as condições geográficas e morfológicas locais justamente por entender que: (i) estas são informações restritas e de difícil obtenção e (ii) com o processo de setorização do método, o ajuste de parâmetros deve incorporar, em alguma medida, estes fatores e outros, sem levar em conta fatores específicos. Naturalmente que quanto maior a quantidade de dados disponíveis, mais rica deve ser a capacidade de predição do modelo. Neste sentido, trabalhos futuros devem comparar o desempenho do modelo proposto usando informações geográficas que não foram usadas no processo de predição.

4.3.4 Smart grids como uma aplicação para IoT-LoRa

Uma das aplicações de IoT mais comentadas está justamente em *smart grids*. Atribui-se à LoRa diferentes potenciais de aplicações neste segmento, relacionadas à telemedicina, telecontrole, sensoriamento dentre outras. De qualquer forma, ambas as áreas ainda são relativamente novas e são limitados os relatos de aplicação na literatura científica e técnica neste sentido. Assim sendo, esta pesquisa não tem a pretensão de dar uma resposta definitiva quanto a viabilidade de IoT-LoRa em uma dada aplicação específica para *smart grids*, mas sim, identificar - com os dados obtidos nesta pesquisa e em outras já referenciadas - a potencial pertinência de LoRa para algumas aplicações em *smart grids*. Tomando por base os estudos anteriores já

mencionados, nas análises de latência descritas em [51] e na Tabela 19, em complemento aos dados já levantados aqui neste trabalho, pode-se fazer algumas indicações preliminares quanto a potencial pertinência de LoRa para *smart grids*.

Tabela 19 – Padrão IEEE 1646: requisitos de tempo de comunicação para automação de subestações elétricas.

Tipos de informação	Interno à subestação	Externo à subestação
Informação de proteção	4 ms*	8-12 ms
Informação de monitoramento e controle	16 ms	1 s
Informação de operações e manutenção	1 s	10 s
<i>Strings</i> de texto	2 s	10 s
Arquivos de dados processados	10 s	30 s
Arquivos de programas	1 min	10 min
Arquivos de imagens	10 s	1 min
<i>Streams</i> de áudio e vídeo	1 s	1 s

* Referente a 1/4 de um ciclo da senóide de 60 Hz.

Fonte: adaptado de [74].

Se considerado o próprio tempo de *Time on Air*, este parâmetro imprime uma latência relativamente grande à tecnologia, inviabilizando desde já aplicações de proteção da rede elétrica que é uma aplicação crítica. Por outro lado, as outras aplicações principais são tolerantes a atrasos na ordem de segundos e por isto seus requisitos de latência são largos. Já no que diz respeito às taxas de transmissão permitidas de LoRa (limitadas a 5,5 kbps), as aplicações de transferência de *streams* de áudio e vídeo em tempo real são comprometidas.

Aplicações de (i) monitoramento e (tele)medição, (ii) controle e (iii) informações de operações e monitoramento parecem ser aplicações onde a tecnologia IoT-LoRa pode ser pertinente. Ainda, podem ser atendidos (com algum grau de limitação) outras aplicações (não-críticas) como: (i) automação de subestação, (ii) automação da distribuição, (iii) monitoramento de linha de transmissão aérea, (iv) gerenciamento de energia doméstica (*HEM* – *Home Energy Management*), (v) recurso de energia distribuída e armazenamento, (vi) veículo para rede (*V2G* - *Vehicle-to-Grid*), (vii) carga de veículos elétricos e (viii) gerenciamento de resposta à demanda. Nestes últimos

casos, o atendimento é parcial, especialmente no item “taxa de dados exigida” por estes serviços, onde LoRa nem sempre consegue alcançar²⁷, em situações normais, seus limites inferiores. Porém, técnicas de “*data aggregation*” [69], podem amenizar esta questão.

Se considerarmos que concessionárias de energia elétrica tendem a privilegiar o uso de redes privadas²⁸ e que a tecnologia LoRa permite a criação de uma rede integralmente privada, a pertinência da tecnologia em questão aumenta ainda mais. Ademais, pode-se citar outros fatores que valorizam muito o uso de IoT-LoRa neste cenário: (i) o baixo consumo de energia; (ii) o baixo custo de implantação; (iii) a relativa simplicidade da operação da rede e manutenção; (iv) a padronização aberta de seus protocolos que possibilita a flexibilização da rede para novos serviços; e (v) a robustez contra interferência da tecnologia (mesmo operando em bandas não-licenciadas) favorecem amplamente o uso da tecnologia em questão.

Outros autores também tentaram analisar a pertinência de LoRa para o setor de energia elétrica como, por exemplo, aconteceu em [67]. Nesta última, seus autores realizaram testes em redes de distribuição de energia elétrica em média tensão, analisando a adequabilidade da tecnologia LoRa a este cenário (na Espanha) a fim de permitir que a equipe de manutenção dessas plantas possa fazê-la remotamente. O objetivo foi de construir um sistema de sensores robusto, de baixo custo e consumo a fim de detectar a localização de falhas em centros de transformação, detectar desbalanceamento de cargas nas redes e monitorar diferentes parâmetros em torres de energia de alta e média tensão.

As métricas utilizadas para avaliar a comunicação foram semelhantes às utilizadas neste trabalho e foi analisada a correlação entre a cobertura estimada e real. Também foram avaliados os efeitos de variáveis relativas ao terreno, vegetação,

²⁷ O *transceiver* LoRa consegue, em situações específicas de configuração, alcançar taxas de até 50 kbps. Contudo, neste caso, não se trata de uma legítima transmissão LoRa. Mesmo assim, o rádio tem esta capacidade para aplicações que demandem taxas superiores a que efetivamente LoRa consegue entregar.

²⁸ Este interesse de ter uma rede integralmente disponível à empresa geralmente se justifica por motivos de segurança, controle de disponibilidade (que em redes públicas raramente é possível), controle de priorização de mensagens e flexibilidade de operações e implantação de novos serviços.

construções e outros obstáculos e dos elementos da rede elétrica, como torres de transmissão. Como estes levantamentos de cenários já foram feitos, a presente pesquisa focou seu estudo mais em questões de cobertura que é uma das grandes preocupações para telemedicina.

No trabalho anteriormente citado, resultados com um receptor localizado exatamente sob uma torre de transmissão, mostraram uma PDR de 98%, sem aparente interferência significativa na comunicação. Assim como no presente trabalho desenvolvido, perceberam-se claramente os efeitos de alcance quando se utiliza SFs mais elevados, chegando a raios de cobertura de 3,2 km (com 100 mW de potência de transmissão). Também se verificou que LOS aparenta ser fator decisivo para o aumento do alcance. Neste sentido, a disponibilidade da comunicação pode ser considerada satisfatória (para as aplicações em questão), dado que apenas a camada física da tecnologia foi considerada. Para os serviços de *smart grids* vislumbrados, técnicas de (i) retransmissão e confirmação de recebimento de mensagens, (ii) algoritmos de resiliência de rede como o ADR, (iii) mecanismos de controle e arbitragem de canal e outros recursos implementados por protocolo, podem aumentar significativamente a efetividade da rede melhorando ainda mais seus resultados. Como este trabalho focou apenas no sinal em camada física, trabalhos posteriores podem analisar estas questões com maiores detalhes.

Quando comparada a outras tecnologias, especialmente às de solução *mesh*, que até então vinham sendo apontadas como solução para *smart grids*, a solução LoRa de arquitetura M2M tem, entre outras vantagens, a facilidade de ser mais simples, uma vez que redes *mesh*, segundo [36]: (i) requerem manutenção frequente; (ii) apresentam considerável tráfego de controle; (iii) possuem relativa complexidade na implementação da pilha de protocolos de roteamento presente nos nós; (iv) produzem grande atraso na comunicação (devido aos saltos); e (v) o consumo de energia é grande. Já como pontos negativos da tecnologia LoRa, pode-se citar: (i) existência de apenas um fabricante de

hardware (*i.e.*, Semtech) cuja tecnologia do rádio é proprietária; (ii) a latência da tecnologia é grande (na ordem de ms) e a taxa de transmissão é baixa dependendo das aplicações; e (iii) por usar bandas não-licenciadas, a transmissão está sujeita a uma série de limitações regulatórias.

4.4 Resumo e discussão geral do capítulo

Neste Capítulo foram apresentados os resultados obtidos nos sete cenários nos quais foram realizados testes de campo, além dos resultados encontrados na otimização do modelo de Okumura-Hata utilizando o algoritmo genético. Análises foram feitas de acordo com o objetivo da pesquisa, que é de gerar uma base de conhecimento para possibilitar o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que auxilie no projeto de instalação e ativação de uma rede de telecomunicações LoRa voltada para a IoT, em especial para *smart grids*. Entender o fenômeno da propagação LoRa e seu comportamento em uma cidade de médio porte pode trazer inúmeros benefícios a futuros trabalhos de planejamento de cobertura, assim como a compreensão das capacidades e dos limites da tecnologia, é importante para a determinação de serviços a serem implantados.

Os resultados obtidos nos testes serviram de base, tanto para possibilitar a otimização do modelo de propagação escolhido para as cidades de Patos de Minas, Uberlândia e Brasília, quanto para verificar a validade do modelo otimizado para distâncias inferiores às inicialmente previstas pelo modelo original. A definição de um modelo de propagação para a tecnologia LoRa passa, necessariamente por essa necessidade, uma vez que tanto a sua cobertura e escalabilidade tem sido extensivamente pesquisada e células com raio de 1 km a 2 km (operando com potência de 100 mW) tem sido escolhidas, mesmo embora o alcance possa ser maior. Os resultados encontrados seguem muito próximos à especificação da tecnologia e

encorajam o aprofundamento dos estudos dessa, para utilização nas aplicações vislumbradas por este trabalho.

5 Conclusão e trabalhos futuros

5.1 Conclusão

Este trabalho buscou analisar os sinais de propagação em alguma medida de uma das mais proeminentes tecnologias de comunicação disponíveis para LPWAN: a LoRa. Ele introduziu uma metodologia para a otimização de um modelo de propagação a partir da análise da propagação e variações estocásticas. Ao mesmo tempo, levantamentos de QoS em diferentes cenários realísticos também foram feitos.

Com base nos experimentos realizados nesta pesquisa, foi possível observar que:

- a. A metodologia proposta tem capacidade de representar tanto o comportamento determinístico quanto o estocástico de sinais de propagação LoRa (dentro das limitações metodológicas aqui descritas), se considerarmos que o modelo proposto (*i.e.*, otimizado) apresenta erros menores que os modelos determinísticos empregados como referência neste estudo. Adicionalmente, tem a vantagem de incorporar, em alguma medida, o comportamento estocástico dos sinais coletados em campo ao modelo;
- b. Para serviços de *smart grids* não críticos e tolerantes a latência que exigem uma estrutura de comunicação escalável, a tecnologia LoRa se mostra - em uma primeira análise - adequada para serviços de telemetria, monitoramento, gerenciamento e automação. Ainda, células urbanas de raio de 2 km operando com as limitações de ISM, mostram-se potencialmente viáveis para estes tipos de serviços, apresentando valores de QoS toleráveis, especialmente para SF12;

- c. Dentro do cenário proposto, o modelo otimizado de Okumura-Hata pode ser empregado para análise de distâncias entre TX e RX inferiores a 1 km.

Adicionalmente, a tecnologia LoRa também demonstrou, ainda que em cenários limitados aos aqui estudados, boa robustez na comunicação, conseguindo entregar pacotes (PDR) a taxas frequentes e muitas vezes superiores a 80% e disponibilidade de comunicação superiores a 90%.

O estabelecimento de intervalos de confiança realísticos e baseados em medições *in loco*, também pode ser de grande utilidade no planejamento de cobertura de redes voltadas para *smart grids*, uma vez que dados obtidos no próprio local de futuro funcionamento da rede são utilizados para solidificar a predição.

5.2 Trabalhos futuros

Considerando que as tecnologias LPWAN são relativamente recentes e que o trabalho desenvolvido nessa dissertação se baseou em várias limitações e restrições já relacionadas na Seção 1.3, uma gama de novas abordagens do tema é apresentada nessa seção. Os testes realizados levaram em conta apenas a camada física da tecnologia, assim como um *hardware* específico, de apenas um fornecedor, sendo assim, novas implementações de cenários e novos testes são propostos na sequência:

- Produzir um equipamento de *drive test* para automatizar os testes em campos e produzir maior número de amostras para enriquecer o método proposto;
- Desenvolver um estudo aprofundado sobre a real capacidade de banda de um *gateway* comercial, em aplicações de IoT, em relação ao número de *end-devices* suportado (escala);
- Desenvolver um *setup* capaz de medir e avaliar a latência da comunicação LoRa, para várias combinações de SFs e CRs;

- Investigar a influência do tipo de antena e de sua elevação em relação ao solo no alcance e na confiabilidade efetiva da tecnologia;
- Analisar a propagação em situação de *uplink*, uma vez que a elevação da antena transmissora, nessa situação e em aplicações de *smart grids*, geralmente está abaixo dos 30 metros previsto pelo método de Hata. Otimizar um modelo de propagação para comunicação em *uplink*;
- Implementar o uso de protocolos nativos (LoRaWAN) e alternativos (Dash7, *Symphony link*) no topo da camada física LoRa e realizar comparações de desempenho;
- Desenvolver ferramentas de simulação que permitam prover uma melhor compreensão do real desempenho da tecnologia, interferências, colisão de dados e outros efeitos em um cenário mais realístico;
- Acrescentar ao modelo proposto, informações geográficas, a fim de refinar o processo de predição.

As sugestões de trabalhos futuros aqui apresentadas têm o objetivo de analisar o funcionamento de uma rede LoRa em aplicações de IoT e, em especial, no caso das *smart grids*. Para esses serviços vislumbrados, técnicas de (i) retransmissão e confirmação de recebimento de mensagens, (ii) algoritmos de resiliência de rede como o ADR, (iii) mecanismos de controle e arbitração de canal e outros recursos implementados por protocolo, podem aumentar significativamente a efetividade da rede melhorando ainda mais seus resultados. Como este trabalho focou apenas no sinal em camada física, trabalhos posteriores podem também analisar estas questões sob a ótica de protocolos de rede para melhorar QoS e disponibilidade efetiva da rede.

Referências

1. Ducrot, N., et al., *Lora device developer guide*. Orange, Connected Objects and Partnership. Technical Document, 2016.
2. BNDES. *Estudo “Internet das Coisas: um plano de ação para o Brasil”*. Disponível em:<<https://www.bnDES.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/pesquisaedados/estudos/estudo-internet-das-coisas-iot/estudo-internet-das-coisas-um-plano-de-acao-para-o-brasil>>. Acesso em: 28 dez. 2018.
3. Ericsson dobraria previsão de conexões com IoT / Forbes Brasil. Disponível em:<<https://forbes.uol.com.br/last/2018/06/ericsson-dobra-previsao-de-conexoes-com-iot>>. Acesso em: 18 dez. 2018.
4. Boulogiorgos, A.-A.A., P.D. Diamantoulakis, and G.K. Karagiannidis, *Low power wide area networks (lpwans) for internet of things (iot) applications: Research challenges and future trends*. arXiv preprint arXiv:1611.07449, 2016.
5. Haxhibeqiri, J., et al., *A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application*. Sensors, 2018. **18**(11): p. 3995.
<https://doi.org/10.3390/s18113995>
6. Beire, A.R., et al. *Automatic tuning of Okumura-Hata model on railway communications*. in *Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2014 International Symposium on*. 2014. IEEE.
7. Ray, B. *The Past, Present, & Future of LPWAN*. 2018 Disponível em:<<https://www.link-labs.com/blog/past-present-future-lpwan>>. Acesso em: 18 dez. 2018.
8. Sigfox. *Coverage / Sigfox*. Disponível em:<<https://www.sigfox.com/en/coverage>>. Acesso em: 29 jan. 2019.
9. Meijers, J. *TTN Mapper*. 2018 Disponível em:<<https://ttnmapper.org>>. Acesso em: 18 dez. 2018.
10. Bui, N., et al., *The internet of energy: a web-enabled smart grid system*. IEEE Network, 2012. **26**(4): p. 39-45.
<https://doi.org/10.1109/MNET.2012.6246751>
11. *About LoRa Alliance™ / LoRa Alliance™*. 2018. Disponível em:<<https://lorawan.org/about-lora-alliance>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

12. Committee, L.A.T., *LoRaWAN 1.1 Specification*. LoRa Alliance Stand, 2017. 1(1).
13. Bankov, D., E. Khorov, and A. Lyakhov. *On the limits of lorawan channel access*. in *Engineering and Telecommunication (EnT), 2016 International Conference on*. 2016. IEEE.
14. Só Física / Efeito Doppler. Disponível em:< <https://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Acustica/doppler.php>>. Acesso em: 19 dez. 2018.
15. teleco.com.br. Disponível em:< http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwifimanaus1/pagina_3.asp>. Acesso em: 04 fev. 2019.
16. dos Anjos, A.A., *Interferência em Sistemas de Comunicação Digital - EX007*. 2016, Instituto Nacional de telecomunicações - INATEL. p. 70.
17. Augustin, A., et al., *A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things*. Sensors, 2016. 16(9): p. 1466.
<https://doi.org/10.3390/s16091466>
18. Alliance, L., *A technical overview of LoRa and LoRaWAN*. White Paper, 2015.
19. Vangelista, L., A. Zanella, and M. Zorzi. *Long-range IoT technologies: The dawn of LoRaTM*. in *Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures*. 2015. Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-27072-2_7
20. Mahmoud, M.S. and A.A. Mohamad, *A study of efficient power consumption wireless communication techniques/modules for internet of things (IoT) applications*. 2016.
21. Telkamp, T. *TTN_Technical_Presentation_thomas_v2.pptx*. Disponível em:< <https://drive.google.com/file/d/0B49WRBg1NvMgQmdlM3doaWdVMWc/view>>. Acesso em: 29 jan. 2019.
22. Kuzlu, M., M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, *Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN*. Computer Networks, 2014. 67: p. 74-88.
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.03.029>
23. *LoRa: Symbol Generation*. Disponível em:< <http://www.sghoslya.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

24. Teleco. *Tutoriais telefonia celular.* Disponível em:<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialavaltrans/pagina_2.asp>. Acesso em: 29 jan. 2019.25. Semtech, *SX1272/73 datasheet*. p. 128.
25. Semtech, *SX1272/73 datasheet*. p. 128.
26. Wixted, A.J., et al. *Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks*. in *SENSORS, 2016 IEEE*. 2016. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808712>
27. Network, T.T. *LoRa crash course by Thomas Telkamp*. 2016. Disponível em:<<https://www.youtube.com/watch?v=T3dGLqZrjIQ>>. Acesso em: 23 nov. 2018.
28. Bor, M.C., et al. *Do LoRa low-power wide-area networks scale?* in *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. 2016. ACM.
<https://doi.org/10.1145/2988287.2989163>
29. Semtech. *LoRa Modulation Basics*. 2015. Disponível em:<<https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>>. Acesso em: 29 jan. 2019.
30. Adelantado, F., et al., *Understanding the limits of LoRaWAN*. IEEE Communications magazine, 2017. **55**(9): p. 34-40.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613>
31. Gungor, V.C., et al., *A survey on smart grid potential applications and communication requirements*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013. **9**(1): p. 28-42.
<https://doi.org/10.1109/TII.2012.2218253>
32. Sciacca, S.c. *IEEE 2030 Smart Grid Interoperability Standards*. 2012. Disponível em:<http://www.ccsa.org.cn/ccsa_ieee/9--Sciacca--2030%20Smart%20Grid%20Interoperability%20%20Standards.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2019.
33. BNDES. *Roadmap tecnológico*. 2018. Disponível em:<<https://www.bnDES.gov.br/wps/wcm/connect/site/458b7552-b119-4c5b-9374-9556355fcc76/Produto-2B-relatorio-roadmap-tecnologico-completo.pdf?MOD=AJPERES&CVID=m4uYurA>>. Acesso em: 21 dez. 2018.
34. Gungor, V.C. and M.K. Korkmaz, *Wireless Link-Quality Estimation in Smart Grid Environments*. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012. **8**(2): p. 214068.
<https://doi.org/10.1155/2012/214068>

35. Gungor, V.C., et al., *Smart grid technologies: Communication technologies and standards*. IEEE transactions on Industrial informatics, 2011. **7**(4): p. 529-539.
<https://doi.org/10.1109/TII.2011.2166794>
36. Centenaro, M., et al., *Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios*. IEEE Wireless Communications, 2016. **23**(5): p. 60-67.
<https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743>
37. Semtech. 2019 Disponível em:< <https://www.semtech.com>>. Acesso em: 07 jan. 2019.
38. Sigfox. *Sigfox, the world's leading IoT services provider*. Disponível em:< <https://www.sigfox.com/en>>. Acesso em: 22 nov. 2018.
39. *Sigfox - The Global Communications Service Provider for the Internet of Things (IoT)*. Disponível em:< <https://www.sigfox.com/en>>. Acesso em: 23 nov. 2018.
40. Garcia, P.S.R. and J.H. Kleinschmidt, *Tecnologias Emergentes de Conectividade na IoT: Estudo de Redes LPWAN*. 2017, sn. p. 1009-1013.
41. Ingenu - Dedicated Machine Connectivity for IoT. Disponível em:< <https://www.ingenu.com>>. Acesso em: 19 dez. 2018.
42. Flyn, K. *3GPP*. Disponível em:< http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1785-nb_iot_complete>. Acesso em: 17/12/2018.
43. DIENG, O., et al., *A Study on IoT Solutions for Preventing Cattle Rustling in African Context*. 2017.
44. Pham, C. *Low-cost, low-power and long-range image sensor for visual surveillance*. in *Proceedings of the 2nd Workshop on Experiences in the Design and Implementation of Smart Objects*. 2016. ACM.
<https://doi.org/10.1145/2980147.2980156>
45. COUSIN, P., et al., *IoT, An Affordable Technology to Empower Africans Addressing Needs in Africa*. 2017.
46. Pham, C., A. Rahim, and P. Cousin. *Low-cost, long-range open IoT for smarter rural African villages*. in *Smart Cities Conference (ISC2), 2016 IEEE International*. 2016. IEEE.
47. Li, Y., et al. *Research on water meter reading system based on LoRa communication*. in *Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC), 2017 IEEE International Conference on*. 2017. IEEE.

48. Angrisani, L., et al. *LoRa protocol performance assessment in critical noise conditions.* in *2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI).* 2017. IEEE.
49. Petajajarvi, J., et al. *On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology.* in *ITS Telecommunications (ITST), 2015 14th International Conference on.* 2015. IEEE.
50. Cota, N., et al. *On the use of Okumura-Hat a propagation model on railway communications.* in *Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2013 16th International Symposium on.* 2013. IEEE.
51. Sørensen, R.B., et al., *Analysis of latency and MAC-layer performance for class A LoRaWAN.* arXiv preprint arXiv:1712.05171, 2017.
52. Yang, M. and W. Shi. *A linear least square method of propagation model tuning for 3G radio network planning.* in *Fourth International Conference on Natural Computation.* 2008. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICNC.2008.188>
53. *I-NUCLEO-LRWAN1 - USI® STM32™ Nucleo expansion board for LoRa™ - STMicroelectronics.* 2018. Disponível em:< <https://www.st.com/en/evaluation-tools/i-nucleo-lrwan1.html>>. Acesso em: 23 nov. 2018.
54. USI - Universal Global Scientific Industrial Co., L., *WM-SG-SM-42 AT Command Reference Manual.* 2016, Universal Global Scientific Industrial Co., Ltd. p. 72.
55. Rappaport, T.S., *Wireless communications: principles and practice.* Vol. 2. 1996: prentice hall PTR New Jersey.
56. Alqudah, Y.A., et al. *On the validation of path loss models based on field measurements using 800 MHz LTE network.* in *Systems Conference (SysCon), 2016 Annual IEEE.* 2016. IEEE.
57. Castro, B.S., et al., *Comparison between known propagation models using least squares tuning algorithm on 5.8 GHz in Amazon region cities.* Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 2011. **10**(1): p. 106-113.
<https://doi.org/10.1590/S2179-10742011000100011>
58. Abhayawardhana, V., et al. *Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems.* in *Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st.* 2005. IEEE.

59. Udoфia, K.M., N. Friday, and A.J. Jimoh, *Okumura-Hata Propagation Model Tuning Through Composite Function of Prediction Residual*. Mathematical and Software Engineering, 2016. **2**(2): p. 93-104.
60. Nadir, Z. and M.I. Ahmad. *Pathloss determination using Okumura-Hata model and cubic regression for missing data for Oman*. in *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*. 2010.
61. Akhpashev, R.V. and A.V. Andreev. *COST 231 Hata adaptation model for urban conditions in LTE networks*. in *Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2016 17th International Conference of Young Specialists on*. 2016. IEEE.
62. Hall, P., *The bootstrap and Edgeworth expansion*. 2013: Springer Science & Business Media.
63. Domingues, K., et al., *Estimação de Intervalos de Confiança via Reamostragem Bootstrap. I Encontro Interestadual de Engenharia de Produção-EINEPro 2015*. São João da Barra, RJ, 2015: p. 1-12.
64. Request for Comments: 1242. 1991 Disponível em:<<https://www.ietf.org/rfc/rfc1242.txt>>. Acesso em: 23 nov. 2018.
65. Aref, M. and A. Sikora. *Free space range measurements with Semtech LoRaTM technology*. in *Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS-SWS), 2014 2nd International Symposium on*. 2014. IEEE.
66. Feltrin, L., et al., *LoRaWAN: Evaluation of Link-and System-Level Performance*. IEEE Internet of Things Journal, 2018.
67. del Campo, G., et al., *Power Distribution Monitoring Using LoRa: Coverage Analysis in Suburban Areas*. 2018.
68. Guan, K., et al., *Propagation Measurements and Modeling of Crossing Bridges on High-Speed Railway at 930 MHz*. IEEE Trans. Vehicular Technology, 2014. **63**(2): p. 502-517.
<https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2275912>
69. Van den Abeele, F., et al., *Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3*. IEEE Internet of Things Journal, 2017. **4**(6): p. 2186-2198.
70. Rizzi, M., et al. *Using LoRa for industrial wireless networks*. in *Factory Communication Systems (WFCS), 2017 IEEE 13th International Workshop on*. 2017. IEEE.

71. Haxhibeqiri, J., et al. *LoRa indoor coverage and performance in an industrial environment: Case study.* in *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2017 22nd IEEE International Conference on.* 2017. IEEE.
72. Hosseinzadeh, S., et al. *Empirical propagation performance evaluation of LoRa for indoor environment.* in *Industrial Informatics (INDIN), 2017 IEEE 15th International Conference on.* 2017. IEEE.
73. Neumann, P., J. Montavont, and T. Noël. *Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN): A LoRaWAN case study.* in *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2016 IEEE 12th International Conference on.* 2016. IEEE.
74. Wang, W., Y. Xu, and M. Khanna, *A survey on the communication architectures in smart grid.* *Computer networks*, 2011. **55**(15): p. 3604-3629.
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2011.07.010>