



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

FERNANDO ANTÔNIO SARAIVA MENDES

**ANÁLISE DE UMA REDE *LORA MESH* EM
AMBIENTES URBANOS INTERNO E
EXTERNO**

NITERÓI

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

FERNANDO ANTÔNIO SARAIVA MENDES

**ANÁLISE DE UMA REDE *LORA MESH* EM AMBIENTES
URBANOS INTERNO E EXTERNO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador:
Professor D. Sc. Ricardo Campanha Carrano

NITERÓI

2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

M538a Mendes, Fernando Antônio Saraiva
Análise de Uma Rede LoRaMESH em Ambientes Urbanos Interno e Externo / Fernando Antônio Saraiva Mendes. - 2022.
234 f.

Orientador: Ricardo Campanha Carrano.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Escola de Engenharia, Niterói, 2022.

1. Internet das Coisas. 2. Redes de Computadores. 3. Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões. 4. Redes de Comunicação de Computadores. 5. Produção intelectual. I. Carrano, Ricardo Campanha, orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. III. Título.

CDD - XXX

FERNANDO ANTÔNIO SARAIVA MENDES

ANÁLISE DE UMA REDE *LORA MESH* EM AMBIENTES URBANOS INTERNO E
EXTERNO

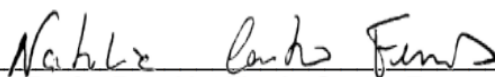
Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações da Universidade
Federal Fluminense, como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações. Área de
concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Aprovada em 18 de Fevereiro de 2022.

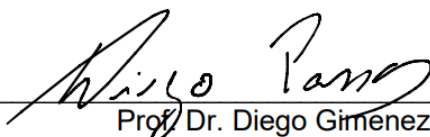
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Ricardo Campanha Carrano - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



Profa. Dra. Natália de Castro Fernandes
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Diego Gimenez Passos
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa - ISEL

Niterói

Fevereiro de 2022

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por Sua infinita generosidade, e aos meus queridos pais, in memoriam, Olavo Duarte Mendes e Yolanda Saraiva Mendes, por todo o amor incondicional que tiveram por mim, e pelos grandes valores morais deixados.

Agradecimentos

Inicialmente, gostaria de agradecer, profundamente, ao meu dileto orientador, Professor D.Sc. Ricardo Campanha Carrano, que, não obstante os inúmeros compromissos administrativos e de cátedra, sempre encontrou tempo para repassar a mim parte dos seus vastíssimos conhecimentos e experiência acadêmicos, com palavras de incentivo, bem como demonstrando, em todos os momentos, compreensão, paciência, comprometimento e intenso auxílio.

Ao caríssimo Professor João Marcos Meirelles da Silva, por todo o seu estímulo para que eu prosseguisse com os estudos, não obstante os diversos obstáculos existentes.

Ao Professor Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos, por suas inúmeras sugestões e conselhos espontâneos, que muito ajudaram e contribuíram na execução das tarefas.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da UFF (PPGEET-UFF), por toda a sua contribuição direta ou indireta para a minha formação, em especial, em ordem alfabética, Dianne Scherly de Medeiros, Diogo Menezes Ferrazani Mattos, Natalia Castro Fernandes, Tadeu Nagashima Ferreira e Vitor Hugo Ferreira, dos quais, em sua maioria, com muita honra e privilégio fui aluno.

A todos os colegas de turma com quem prazerosamente convivi, por toda a troca de experiências acadêmicas bastante enriquecedoras.

Às colegas e Servidoras da Secretaria do PPGEET-UFF, Vania Seródio, Raquel Martins e Patrícia (*in memorian*), pelo sólido e constante apoio administrativo empreendido.

Ao estimado amigo e colega Joacir de Oliveira Silva, do Laboratório MidiaCom, por suas várias sugestões maravilhosas e por nossas longas conversas sobre as diversas tecnologias de comunicações.

A todos os colegas da Secretaria do Departamento de Engenharia de Telecomunicações da UFF (TET/UFF), por suas valiosas palavras de apoio e incentivo, bem como ao companheiro Ozimar Rodrigues dos Santos, da Pós-graduação *lato sensu* em Engenharia de Telecomunicações, por seu inestimável suporte em Linux, e aos demais colegas Técnicos Administrativos do TET e da Escola de Engenharia, que, de alguma forma, muito contribuíram com seus respectivos talentos.

A esta Universidade, como um todo, que me acolheu como aluno e servidor.

Resumo

Com o surgimento da Internet das Coisas (IoT), diversas tecnologias de comunicação tornaram-se populares, entre elas aquela relacionada às Redes de Baixo Consumo e Longo Alcance (LPWAN). Atualmente, as três soluções que mais se destacam neste segmento para a conexão de dispositivos autônomos, heterogêneos e inteligentes são LoRa, Sigfox e NB-IoT. Enquanto as duas primeiras apresentam vantagens em termos de duração de bateria, capacidade e custo, a última destaca-se quando os requisitos são qualidade de serviço e latência. Este trabalho apresenta a análise de uma rede utilizando a tecnologia de comunicação LoRa com topologia em malha (*LoRa Mesh*), em ambientes urbanos interno e externo. Uma rede *LoRa Mesh* possui a particularidade de cada nó ter a capacidade de fazer o encaminhamento de mensagens recebidas que sejam destinadas a outro nó da rede. A fim de se verificar a performance e aplicabilidade desta tecnologia, foi montado um protótipo composto por três módulos, todos eles operando na frequência ISM (Industrial, Científica e Médica) de 915 MHz, sendo um deles configurado como mestre e os outros dois como escravos. A seguir, conectando-se um computador ao nó mestre, foi possível acompanhar, de forma prática, o envio e recebimento de quadros pela rede, bem como os níveis do sinal recebido. Então, foram realizados ensaios no campus da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense (UFF), na cidade de Niterói, Rio de Janeiro, em ambientes interno e externo, tanto em linha de visada como sem, bem como na orla da Praia da Boa Viagem, situada proximamente, a fim de também se registrar os níveis do sinal obtidos nas comunicações entre os módulos.

Palavras-chaves: Internet das Coisas (IoT), Redes de Baixo Consumo e Longo Alcance (LPWAN), LoRa, LoRaWAN, *LoRa Mesh*.

Abstract

With the emergence of the Internet of Things (IoT), several communication technologies have become popular, including those related to Low-Consumption and Long-Range Networks (LPWAN). Currently, the three solutions that stand out in this segment for connecting autonomous, heterogeneous and intelligent devices are LoRa, Sigfox and NB-IoT. While the first two have advantages in terms of battery life, capacity and cost, the last one stands out when the requirements are quality of service and latency. This work presents the analysis of a network using LoRa communication technology with mesh topology (*LoRa Mesh*), in indoor and outdoor urban environments. A *LoRa Mesh* network has the particularity that each node has the ability to forward received messages that are destined for another node in the network. In order to verify the performance and applicability of this technology, a prototype composed of three modules was assembled, all of them operating at the ISM (Industrial, Scientific and Medical) frequency of 915 MHz, one of them being configured as a master and the other two as slaves. Then, by connecting a computer to the master node, it was possible to conveniently monitor the sending and receiving of frames over the network, as well as the levels of the received signal. Then, tests were carried out on the campus of the Escola de Engenharia of Universidade Federal Fluminense (UFF), in the city of Niterói, Rio de Janeiro, in indoor and outdoor environments, both in line-of-sight and non-line-of-sight conditions, as well as on the edge of Praia da Boa Viagem, located nearby, in order to also record the signal levels obtained in the communications between the modules.

Keywords: Internet of Things (IoT), Low Power and Wide Area Networks (LPWAN), LoRa, LoRaWAN, *LoRa Mesh*

Lista de Figuras

FIGURA 1 - CRESCIMENTO ESTIMADO DE DISPOSITIVOS CONECTADOS À INTERNET DAS COISAS (IoT) AO LONGO DOS ANOS. AO LONGO DOS ANOS (FONTE: IoT ANALYTICS RESEARCH [65]).....	2
FIGURA 2 - CONSUMO DE ENERGIA, TAXAS DE TRANSMISSÃO EM ORDEM DE GRANDEZA E ALCANCE MÁXIMO DE ALGUMAS DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS WIRELESS (FONTE: ELECTRONIC SPECIFIER [16]).....	12
FIGURA 3 - ARQUITETURA DE UMA REDE SIGFOX (FONTE: SIGFOX. [18])	13
FIGURA 4 - ORGANIZAÇÕES PARA O ESTABELECIMENTO DE PADRÕES, JUNTO COM O GRUPO 3GPP (QUALCOMM [21]).....	15
FIGURA 5 – MODOS DE OPERAÇÃO DA TECNOLOGIA NB-IoT (FONTE: SINHA <i>ET AL.</i> [28])	16
FIGURA 6 - OS DIFERENTES ESTADOS DE UM DISPOSITIVO FINAL AO LONGO DA SUA VIDA ÚTIL (FONTE: O AUTOR)	19
FIGURA 7 – COMUNICAÇÃO BIDIRECIONAL ENTRE UM DISPOSITIVO FINAL LORAWAN DA CLASSE A E UMA ESTAÇÃO-BASE (FONTE: MEKKI <i>ET AL.</i> [5])	20
FIGURA 8 - CONSUMO DE ENERGIA POR CLASSE DE DISPOSITIVO (DIAGRAMA FORA DE ESCALA) (FONTE: SEMTECH CORPORATION [26])	21
FIGURA 9 - DESEMPENHO DAS TECNOLOGIAS SIGFOX, LoRa e NB-IoT SEGUNDO ALGUNS DOS MAIS IMPORTANTES INDICADORES DE QUALIDADE (FONTE: ADAPTADO DE MEKKI <i>ET AL.</i> [5])	21
FIGURA 10 - MULTIPLICAÇÃO DE UM SINAL POR UMA SEQUÊNCIA ESPECÍFICA DE BITS (CODE SEQUENCE) – MODULAÇÃO / ESPALHAMENTO EM FREQUÊNCIA (FONTE: SEMTECH CORPORATION [32])	29
FIGURA 11 - MULTIPLICAÇÃO DO SINAL RECEBIDO POR UMA SEQUÊNCIA ESPECÍFICA DE BITS (CODE SEQUENCE) - DEMODULAÇÃO / CONCENTRAÇÃO DE FREQUÊNCIAS (FONTE: SEMTECH CORPORATION) [32])	30
FIGURA 12 – VARIAÇÕES CONTÍNUAS CRESCENTES (<i>UP CHIRP</i>) E DECRESCENTES (<i>DOWN CHIRP</i>) NA FREQUÊNCIA DE UMA ONDA AO LONGO DO TEMPO (FONTE: RUANO [4] ; ZHANG <i>ET AL.</i> [31])	32
FIGURA 13 - VARIAÇÕES DA FREQUÊNCIA DA PORTADORA SEM E COM MODULAÇÃO (FONTE: LIE [36]).....	33
FIGURA 14 - VARIAÇÕES DA FREQUÊNCIA DA PORTADORA EM TORNO DA FREQUÊNCIA CENTRAL F_0 . (Fonte: ADAPTADO DE RUANO [4] E ZHANG ET AL [31]).....	34

FIGURA 15 - RELAÇÃO ENTRE DISTÂNCIAS, VALORES DE FATOR DE ESPALHAMENTO E TAXAS DE TRANSMISSÃO ENTRE UM DISPOSITIVO FINAL E UM RETRANSMISSOR (<i>GATEWAY</i>) (SEMTECH CORPORATION [37]).....	35
FIGURA 16 - EXEMPLO SIMPLIFICADO DOS CONCEITOS DE <i>SÍMBOLO</i> , <i>CHIP</i> E <i>CHIRP</i> (LIE [36]).....	36
FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO DE CANAIS DE FREQUÊNCIA NOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA (SEMTECH CORPORATION [10]).....	36
FIGURA 18 - RELAÇÃO ENTRE A LARGURA DE BANDA (BW) E O FATOR DE ESPALHAMENTO (SF) (FONTE: COUTAUD <i>ET AL.</i> [38]).....	39
FIGURA 19 - LARGURA DE BANDA (BW) E DURAÇÃO DE UM SÍMBOLO (T_s) (FONTE: LIE [36]).....	40
FIGURA 20 - ESPECTROGRAMAS DE SINAIS LORA MODULADOS (MOKO SMART [40] E LIE [36]).....	40
FIGURA 21 - PILHA DE PROTOCOLOS DAS TECNOLOGIAS LORA E LoRAWAN (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10]).....	44
FIGURA 22 – ARQUITETURA DE UMA REDE LoRAWAN (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10]).....	45
FIGURA 23 – ALGUNS DISPOSITIVOS SENSORES / ATUADORES EM UMA REDE LoRAWAN (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10]).....	45
FIGURA 24 – UMA MENSAGEM OU TRANSMISSÃO DE <i>UPLINK</i> (FONTE: SEMTECH CORPORATION [26]).....	46
FIGURA 25 – UMA MENSAGEM OU TRANSMISSÃO DE <i>DOWNLINK</i> (FONTE: SEMTECH CORPORATION [26]).....	46
FIGURA 26 – SENSOR INFRAVERMELHO PASSIVO (<i>PIR, PASSIVE INFRARED DIODE</i>) CONECTADO A UM LED PARA INDICAR A SUA AÇÃO. NA IMAGEM DA DIREITA A LENTE FOI REMOVIDA (FONTE: ARROW ELECTRONICS INC. [43]).....	52
FIGURA 27 – SENSOR INFRAVERMELHO ATIVO (<i>ACTIVE INFRARED SENSOR</i>) CONECTADO A UM LED PARA INDICAR A SUA AÇÃO. A COLOCAÇÃO DE UM PAPEL ENTRE O EMISSOR E O RECEPTOR INTERROMPE O SINAL ENTRE ELES, PROVOCANDO O ACENDIMENTO DO LED (FONTE: ARROW ELECTRONICS INC. [43]).....	53
FIGURA 28 – UMA ESTAÇÃO RETRANSMISSORA (<i>GATEWAY</i>) EM UMA REDE LoRAWAN (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10]).....	57
FIGURA 29 – DISPOSITIVOS FINAIS, EM UMA REDE LoRAWAN, ATENDIDOS SIMULTANEAMENTE POR VÁRIOS <i>GATEWAYS</i> , , QUE RECEBEM E TRANSMITEM AS MENSAGENS (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10])	59

FIGURA 30 – ASPECTO DO <i>GATEWAY</i> CISCO LoRAWAN (FONTE: THE THINGS NETWORK [45])	60
FIGURA 31 – IMAGEM DO <i>GATEWAY</i> KERLINK WIRBNET IBTS (FONTE: THE THINGS NETWORK [45])	61
FIGURA 32 – <i>GATEWAY MULTITECH CONDUIT</i> (FONTE: MULTITECH DEVELOPERS RESOURCES [45][47]).....	61
FIGURA 33 – <i>GATEWAY TEKTELIC KONA</i> (FONTE: THE THINGS NETWORK [45]).....	62
FIGURA 34 – <i>GATEWAY URSALINK UG87-OUTDOOR INDUSTRIAL LoRAWAN</i> (FONTE: THE THINGS NETWORK [45]).....	63
FIGURA 35 – SERVIDOR DE REDE EM UMA REDE LoRAWAN TÍPICA (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10])	64
FIGURA 36 – SERVIDORES DE APLICAÇÃO EM UMA REDE LoRAWAN (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10])	65
FIGURA 37 – SERVIDOR DE CONEXÃO EM UMA REDE LoRAWAN (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10])	66
FIGURA 38 – CHAVES DE SEGURANÇA GERADAS DURANTE O PROCEDIMENTO DE CONEXÃO (<i>JOIN PROCEDURE</i>) (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10])	68
FIGURA 39 – UM DISPOSITIVO FINAL ENVIANDO PARA O SERVIDOR DE CONEXÃO UMA MENSAGEM DE REQUISIÇÃO DE CONEXÃO (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10])	68
FIGURA 40 – SERVIDOR DE CONEXÃO ENVIANDO PARA O DISPOSITIVO FINAL UMA MENSAGEM DE ACEITAÇÃO DE CONEXÃO (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10]).....	69
FIGURA 41– CHAVES DE SESSÃO COMPARTILHADAS PELO SERVIDOR DE CONEXÃO COM OS SERVIDORES DE REDE E DE APLICAÇÃO (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10])	69
FIGURA 42–SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE DADOS EM REDES LoRAWAN (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10])	70
FIGURA 43 – OPERAÇÃO DE UM DISPOSITIVO FINAL <i>CLASSE A</i> (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10])	72
FIGURA 44–RECEPÇÃO DE MENSAGENS DE <i>DOWNLINK</i> PARA UM DISPOSITIVO FINAL <i>CLASSE A</i> (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10])	73
FIGURA 45–UM DISPOSITIVO FINAL <i>CLASSE A</i> ENVIANDO PARA A REDE <i>MENSAGENS CONFIRMADAS E NÃO CONFIRMADAS</i> (FONTE: SEMTECH CORPORATION [26])	74

FIGURA 46–PROCESSO DE ENVIO DE QUADROS DE SINCRONIZAÇÃO (BEACONS) PARA DISPOSITIVOS FINAIS <i>CLASSE B</i> (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10]).....	75
FIGURA 47–ENVIO PERIÓDICO DE QUADROS DE <i>BEACON</i> PARA A SINCRONIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS FINAIS <i>CLASSE B</i> (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10]).....	76
FIGURA 48–JANELAS DE RECEPÇÃO (<i>PING SLOTS</i>) PARA DISPOSITIVOS FINAIS <i>CLASSE B</i> (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10])	77
FIGURA 49– JANELAS DE RECEPÇÃO DE QUADROS DE <i>BEACON</i> E MENSAGENS DE <i>DOWNLINK</i> (<i>PING SLOTS</i>) POR DISPOSITIVOS FINAIS <i>CLASSE B</i> (FONTE: SEMTECH CORPORATION [35])	78
FIGURA 50–UM DISPOSITIVO OPERANDO EM <i>CLASSE C</i> (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10])	79
FIGURA 51–JANELAS DE RECEPÇÃO EM UM DISPOSITIVO OPERANDO EM <i>CLASSE C</i> (FONTE: SEMTECH CORPORATION [41])	80
FIGURA 52–ESTRUTURA DE UM QUADRO <i>LoRa</i> (<i>LoRa PHY</i>) (FONTE: <i>LoRa ALLIANCE RP002-1.0.2</i> [51])	81
FIGURA 53–REDE <i>LoRa Mesh</i> SÍNCRONA, PROPOSTA PARA UMA REGIÃO DE ZURIQUE, SUÍÇA (FONTE: <i>EBI ET AL.</i> [59]).....	82
FIGURA 54–DIAGRAMA EM BLOCOS DE UM NÓ DA REDE <i>LoRa Mesh</i> PROJETADA (FONTE: <i>EBI ET AL.</i>) [59]).....	83
FIGURA 55–CONFIGURAÇÃO DE CADA NÓ DA REDE <i>LoRa Mesh</i> 2018) [60]).....	84
FIGURA 56–ARQUITETURA BÁSICA DA REDE <i>LoRa Mesh</i> UTILIZADA PARA O ENVIO DE DADOS (FONTE: <i>ADNAN ET AL.</i> [60]).....	85
FIGURA 57–CENÁRIO DA REDE <i>LoRa Mesh</i> CONFIGURADA (FONTE: <i>ADNAN ET AL.</i> [60]).....	85
FIGURA 58–LOCALIZAÇÃO DO <i>GATEWAY</i> E DE UM DOS NÓS SENSORES DA REDE <i>LoRa Mesh</i> (FONTE: <i>ADNAN ET AL.</i> [60]).....	86
FIGURA 59–CAMADAS DE REDE PROPOSTAS PARA COMUNICAÇÃO PONTO-A-PONTO (FONTE: <i>BERTO ET AL.</i> [61]).....	87
FIGURA 60–REDE PONTO-A-PONTO BASEADA NA TECNOLOGIA EM MALHA COM CAPACIDADES MULTISSALTO (FONTE: <i>BERTO ET AL.</i> [61]).....	87

FIGURA 61—ARQUITETURA EM ALTO NÍVEL DO SISTEMA QUE INTEGROU O PROTÓTIPO (FONTE: ANDERSEN <i>ET AL.</i> [62]).....	89
FIGURA 62—VISTA DO INTERIOR DE ALGUMAS DAS GALERIAS DO COMPLEXO DE AQUEDUTOS SUBTERRÂNEOS “BOTTINI” (FONTE: ABRARDO <i>ET AL.</i> [63]).....	89
FIGURA 63—MAPA DAS GALERIAS “BOTTINI”, EMBAIXO DO CENTRO DA CIDADES DE SIENA, ITÁLIA. NA PARTE (A), APARECE, DENTRO DO RETÂNGULO EM VERMELHO, A SEÇÃO ONDE FORAM REALIZADOS ALGUNS TESTES. EM (B) ESTA SEÇÃO ESTÁ AMPLIADA (FONTE: ABRARDO <i>ET AL.</i> [63]).....	90
FIGURA 64—GALERIAS “BOTTINI”, EMBAIXO DO CENTRO DA CIDADES DE SIENA, ITÁLIA. NO LADO (A), UM MÓDULO LoRa COLOCADO NO CHÃO DE UMA DAS GALERIAS. EM (B), MEDIÇÕES DE SINAL PELA EQUIPE (FONTE: ABRARDO <i>ET AL.</i> [63]).....	91
FIGURA 65—NÓS COMPONENTES DA REDE EM MALHA PROPOSTA. NO LADO (A), APARECE UM GATEWAY E, NO (B), UM NÓ SENSOR (FONTE: ABRARDO <i>ET AL.</i> [63]).....	92
FIGURA 66—VISTAS EXTERNAS DOS LOCAIS ONDE FORAM FEITAS AS MEDIÇÕES DE SINAIS LoRa NO INTERIOR DOS CINCO ANDARES DO BLOCO D, DA ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFF, EM NITERÓI, RJ, TRANSMITIDOS DE UM MÓDULO ESP 32 FIXADO PRÓXIMO À ENTRADA PRINCIPAL (FONTE: MICHEL PESSOA DA CUNHA [64]).....	93
FIGURA 67 – COMPONENTES DA REDE IoT LoRa PARA A MEDIÇÃO DO FLUXO DE ÁGUA QUE TRAFEGAVA NO INTERIOR DE DUTOS MANTIDOS SOB MONITORAMENTO. (FONTE: HINGRID TAVARES GUIMARÃES [69])	94
FIGURA 68 – MÓDULO RÁDIO <i>LoRa MESH RD-42C</i> , DA EMPRESA RADIOENGE (FONTE: RADIOENGE [53])	97
FIGURA 69 – UMA PLACA RADIOENGE <i>USB-IoT</i> JUNTO DE UM CABO USB A/B (FONTES: RADIOENGE) [53] E O AUTOR)	97
FIGURA 70 – ESBOÇO DO PROTÓTIPO DA REDE <i>LoRa MESH</i> UTILIZADA NESTE TRABALHO (FONTE: O AUTOR)	98
FIGURA 71 – ESBOÇO DE UMA REDE <i>LoRa MESH</i> (FONTE: MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO <i>LoRa MESH</i> DA EMPRESA RADIOENGE [56])	99
FIGURA 72 – SENSOR DTH22 (FONTE: ADAFRUIT INDUSTRIES [54])	100
FIGURA 73 – MÓDULO RÁDIO <i>LoRa MESH RD42C</i> , DA EMPRESA RADIOENGE (FONTE: MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO <i>LoRa MESH</i> DA EMPRESA RADIOENGE [56])	102

FIGURA 74 – ESBOÇO DO PROTÓTIPO SIMPLIFICADO DA REDE <i>LoRa MESH</i> UTILIZADA NESTE TRABALHO (FONTE: O AUTOR))	105
FIGURA 75 – ESBOÇO DE UM QUADRO DE COMANDO SERIAL RECONHECIDO PELOS MÓDULOS <i>LoRa MESH</i> RD42C (FONTE: MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO <i>LoRa MESH</i> DA EMPRESA RADIOENGE [56])	105
FIGURA 76 – MATERIAL UTILIZADO NA CONFIGURAÇÃO DO PROTÓTIPO DA REDE <i>LoRa MESH</i> DESTE TRABALHO (FONTE: O AUTOR)	108
FIGURA 77 – RÁDIOS NO INTERIOR DE CAIXAS COBERTAS COM DUAS CAMADAS DE PAPEL ALUMÍNIO CADA (FONTE: O AUTOR)	109
FIGURA 78 – ATENUADOR J2045-20 DE 20 dB E 50 Ω DE IMPEDÂNCIA (FONTE: JBM INSTRUMENTOS [58])	110
FIGURA 79 – RÉGUA DE ATENUADORES UTILIZADA NO ENSAIO (FONTE: O AUTOR).....	110
FIGURA 80 – RÁDIOS NO INTERIOR DE CAIXAS COBERTAS COM DUAS CAMADAS PAPEL ALUMÍNIO CADA (FONTE: O AUTOR).....	112
FIGURA 81 – BLOCO D, DA ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFF, EM NITERÓI, RIO DE JANEIRO (FONTE: O AUTOR)	114
FIGURA 82 – RÁDIO ID3 FIXADO NO QUINTO ANDAR DO BLOCO D DA ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFF, NITERÓI, RJ. (FONTE: O AUTOR)	114
FIGURA 83 – POSIÇÕES ONDE FORAM FEITAS MEDIÇÕES DA POTÊNCIA DO SINAL CAPTADO POR ID0 NOS CINCO ANDARES DO BLOCO D DA ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFF, EM NITERÓI, RJ. (FONTE: O AUTOR)	115
FIGURA 84 – INTENSIDADE DO SINAL (RSSI), EM dBm, TRANSMITIDO POR ID3 PARA ID0, EM RELAÇÃO À DISTÂNCIA (M), NOS CINCO ANDARES DO BLOCO D, PARA BW=125 kHz, SF=7 E CR=4/5 (FONTE: O AUTOR).....	116
FIGURA 85 – INTENSIDADE DO SINAL (RSSI), EM dBm, TRANSMITIDO POR ID3 PARA ID0, EM RELAÇÃO À DISTÂNCIA (M), NOS CINCO ANDARES DO BLOCO D, PARA BW=125 kHz, SF=8 E CR=4/6 (FONTE: O AUTOR).....	117
FIGURA 86 – INTENSIDADE DO SINAL (RSSI), EM dBm, TRANSMITIDO POR ID3 PARA ID0, EM RELAÇÃO À DISTÂNCIA (M), NOS CINCO ANDARES DO BLOCO D, PARA A BW=125 kHz, SF=9 E CR=4/7 (FONTE: O AUTOR)	118
FIGURA 87 – INTENSIDADE DO SINAL (RSSI), EM dBm, TRANSMITIDO POR ID3 PARA ID0, EM RELAÇÃO À DISTÂNCIA (M), NOS CINCO ANDARES DO BLOCO D, PARA BW=125 kHz, SF=10 E CR=4/7 (FONTE: O AUTOR).....	119
FIGURA 88 – INTENSIDADE DO SINAL (RSSI), EM dBm, TRANSMITIDO POR ID3 PARA ID0, EM RELAÇÃO À DISTÂNCIA (M), NOS CINCO ANDARES DO BLOCO D, PARA BW=125 kHz, SF=11 E CR=4/8 (FONTE: O AUTOR).....	120

FIGURA 89 – INTENSIDADE DO SINAL (RSSI), EM dBm, TRANSMITIDO POR ID3 PARA ID0, EM RELAÇÃO À DISTÂNCIA (M), NOS CINCO ANDARES DO BLOCO D, PARA BW=125 kHz, SF=12 E CR=4/8 (FONTE: O AUTOR).....	121
FIGURA 90 – MEDIÇÕES DA INTENSIDADE DO SINAL FEITAS AO LONGO DOS CORREDORES PRINCIPAIS DOS CINCO ANDARES DO BLOCO D, DA ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFF, EM NITERÓI, RJ (FONTE: O AUTOR)	122
FIGURA 91. TEMPOS MÉDIOS DE ATRASO, EM SEGUNDOS, DA RESPOSTA DO RÁDIO ID3 A ID0, EM RELAÇÃO AO FATOR DE ESPALHAMENTO (SF) (FONTE: O AUTOR)	123
FIGURA 92 – MEDIÇÕES DA INTENSIDADE DO SINAL FEITAS NOS PONTOS A A G, AO LONGO UMA LINHA RETA, NO CAMPUS DA PRAIA VERMELHA, EM NITERÓI, RJ (FONTES: <i>GOOGLE MAPS</i> E O AUTOR)	124
FIGURA 93 – INTENSIDADE DO SINAL (RSSI), EM dBm, RECEBIDO PELO RÁDIO ID0 DE ID3, NOS PONTOS A A G, AO LONGO UMA LINHA RETA, NO CAMPUS DA PRAIA VERMELHA, EM NITERÓI, RJ (FONTE: O AUTOR)	125
FIGURA 93 – LOCALIZAÇÃO DOS RÁDIOS ID0, ID2 E ID3, NO CAMPUS DA PRAIA VERMELHA (FONTES: <i>GOOGLE MAPS</i> E O AUTOR)	126
FIGURA 95 – COMUNICAÇÕES DE ID0 COM ID2 DIRETAMENTE, E DE ID0 COM ID3 ATRAVÉS DE UM SALTO DO SINAL EM ID2 (FONTES: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR)	127
FIGURA 96 – VISTA AÉREA DA PRAIA DA BOA VIAGEM, NITERÓI, RJ (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i>)	128
FIGURA 97 – POSIÇÃO DO NÓ ID0 (MESTRE) NO COMEÇO DA PRAIA DA BOA VIAGEM, NITERÓI, RJ (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i>)	129
FIGURA 98 – DETALHE DA POSIÇÃO DO NÓ ID0 (MESTRE) NO COMEÇO DA PRAIA DA BOA VIAGEM, NITERÓI, RJ (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i>)	129
FIGURA 99 – NÓ ID0 (MESTRE) DENTRO DE UM RECIPIENTE FIXADO EM UMA ÁRVORE, NO COMEÇO DA PRAIA DA BOA VIAGEM, NITERÓI, RJ (FONTE: AUTOR)	130
FIGURA 100 – NÓ ID0 (MESTRE) DENTRO DE UM RECIPIENTE FIXADO EM UMA ÁRVORE E A SUA CONEXÃO A UM NOTEBOOK POR UM CABO USB A/B (FONTE: JOACIR DE OLIVEIRA SILVA)	130
FIGURA 101 – CALÇADA POR ONDE O NÓ ID2 FOI DESLOCADO (FLECHA EM AZUL), JUNTO AO CAMPUS DA UFF DA PRAIA VERMELHA, EM NITERÓI, RJ (FONTES: <i>GOOGLE MAPS</i> E O AUTOR)	131
FIGURA 102 – ENVIO DE COMANDOS <i>PING</i> DO NÓ ID0 PARA O NÓ ID2 (FONTES: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO VIA RÁDIO E O AUTOR)	132

FIGURA 103 – VISTA AÉREA DOS NÓS FIXOS ID0 E ID2 (FONTES: <i>GOOGLE MAPS</i> E O AUTOR)	132
FIGURA 104 – DETALHES DA POSIÇÃO FIXA DO NÓ ID2 (FONTE: JOACIR DE OLIVEIRA SILVA)	133
FIGURA 105– TELA DO APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO MOSTRANDO O ENVIO E RECEBIMENTO, COM SUCESSO, DE COMANDOS <i>PING</i> , DE ID0 PARA ID2 (FONTES: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO VIA RÁDIO E O AUTOR)	133
FIGURA 106 – TELA DO APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO MOSTRANDO O ENVIO E RECEBIMENTO, COM SUCESSO, DE COMANDOS <i>TRACEROUTE</i> , DE ID0 PARA ID2 (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO VIA RÁDIO E O AUTOR)	134
FIGURA 107 – DISTÂNCIA APROXIMADA ENTRE AS POSIÇÕES FIXAS DOS NÓS ID0 E ID2 (FONTES: <i>GOOGLE MAPS</i> E O AUTOR)	135
FIGURA 108 – VISTA AÉREA DOS PONTOS DA ORLA DA PRAIA DA BOA VIAGEM NOS QUAIS FORAM FIXADOS OS NÓS ID0 (PONTO P ₁) E ID2 (PONTO P ₂), E AQUELES POR ONDE O NÓ ID3 FOI DESLOCADO (PONTOS P ₃ A P ₁₄) (FONTES: <i>GOOGLE MAPS</i> E O AUTOR)	136
FIGURA 109 – IDENTIFICAÇÃO DOS PINOS DOS SENSORES DHT11 E DH22 (FONTE: PROJECT HUB)	160
FIGURA 110 – MÓDULO RÁDIO <i>LoRa MESH</i> DR42C, DA EMPRESA RADIOENGE (FONTE: MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO <i>LoRa MESH</i> DA EMPRESA RADIOENGE)	163
FIGURA 111–ESTRUTURA DE UM QUADRO (<i>LoRa PHY</i>) (FONTE: LoRa ALLIANCE RP002-1.0.2 [51])	166
FIGURA 112–ESTRUTURA DA CARGA ÚTIL <i>PHY</i> DE UM QUADRO LoRa (<i>PHYPAYLOAD</i>) (FONTE: LoRa ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	167
FIGURA 113–CAMPO <i>MAC HEADER (MHDR)</i> (FONTE: LoRa ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	168
FIGURA 114 – CAMPO <i>FRAME TYPES (FType)</i> (FONTE: LoRa ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	168
FIGURA 115 – CAMPO <i>MAJOR</i> , INTEGRANTE DO CAMPO <i>MAC HEADER (MHDR)</i> . (FONTE: LoRa ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	169
FIGURA 116 – CAMPO <i>MACPAYLOAD</i> , INTEGRANTE DO CAMPO <i>PHYPAYLOAD</i> (FONTE: LoRa ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	170

FIGURA 117 – CAMPO <i>FRAME HEADER (FHDR)</i> , INTEGRANTE DO CAMPO <i>MACPAYLOAD</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	170
FIGURA 118 – CAMPO <i>FRAME CONTROL (FCTRL)</i> , INTEGRANTE DO CAMPO <i>FRAME HEADER (FHDR)</i> , EM QUADROS DE <i>UPLINK</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	171
FIGURA 119 – CAMPO <i>FRAME CONTROL (FCTRL)</i> , INTEGRANTE DO CAMPO <i>FRAME HEADER (FHDR)</i> , EM QUADROS DE <i>DOWNLINK</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	173
FIGURA 120 – CAMPO <i>FRAME COUNTER (FCNT)</i> , INTEGRANTE DO CAMPO <i>FRAME HEADER (FHDR)</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	174
FIGURA 121 – CAMPO <i>FRAME OPTIONS (FOPTS)</i> , INTEGRANTE DO CAMPO <i>FRAME HEADER (FHDR)</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	175
FIGURA 122 – CAMPO <i>PORT FIELD (FPORT)</i> , INTEGRANTE DO CAMPO <i>MACPAYLOAD</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	176
FIGURA 123 – CAMPO DE CARGA ÚTIL <i>FRAME PAYLOAD (FRMPAYLOAD)</i> , INTEGRANTE DO CAMPO <i>MACPAYLOAD</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	177
FIGURA 124 – CAMPO <i>MESSAGE INTEGRITY CODE (MIC)</i> , INTEGRANTE DO CAMPO <i>PHY PAYLOAD</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	178
FIGURA 125 – FORMATO FÍSICO DE UM QUADRO <i>BEACON</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	179
FIGURA 126 – CAMPO CARGA ÚTIL DO QUADRO <i>BEACON (BNC PAYLOAD)</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	180
FIGURA 127 – CAMPO <i>RFU</i> , INTEGRANTE DO CAMPO <i>BEACON (BNC PAYLOAD)</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	181
FIGURA 128 – CAMPO <i>PARAM</i> , INTEGRANTE DO CAMPO <i>BEACON (BNC PAYLOAD)</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	182
FIGURA 129 – CAMPO <i>TIME</i> , INTEGRANTE DA PARTE COMUM DE REDE DO CAMPO <i>BEACON (BNC PAYLOAD)</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	182
FIGURA 130 – CAMPO <i>CRC</i> , INTEGRANTE DO CAMPO <i>BEACON (BNC PAYLOAD)</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	183

FIGURA 131 – CAMPOS <i>INFODESC</i> E <i>INFO</i> , INTEGRANTES DO CAMPO <i>GwSPECIFIC</i> (FONTE: LoRA ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29])	184
FIGURA 132– TELA DO APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO MOSTRANDO O ENVIO E RECEBIMENTO, COM SUCESSO, DE COMANDOS <i>PING</i> , DE ID0 PARA ID3 (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO VIA RÁDIO E O AUTOR)	187
FIGURA 133 – VISTA AÉREA DA REGIÃO ONDE APARECEM O NÓ FIXO ID2 E O NÓ MÓVEL ID3, POSICIONADO NUM PONTO DA ÁREA DE ESTACIONAMENTO EM FRENTE A ID2 (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i> , JOACIR DE OLIVEIRA SILVA E O AUTOR)	188
FIGURA 134 – DISTÂNCIA EM LINHA RETA ENTRE O NÓ FIXO ID0 E O NÓ MÓVEL ID3, POSICIONADO EM UM PONTO DA ÁREA DE ESTACIONAMENTO EM FRENTE AO NÓ FIXO ID2 (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i> E O AUTOR)	188
FIGURA 135 – VISTA AÉREA MOSTRANDO AS POSIÇÕES DOS NÓS ID2 E ID3, EM FRENTE AO <i>PRIMEIRO</i> POSTE DEPOIS DAQUELE ONDE FOI FIXADO O NÓ ID2, NO SENTIDO DA ILHA DA BOA VIAGEM (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i> , JOACIR DE OLIVEIRA SILVA E O AUTOR)	189
FIGURA 136 – TELA MOSTRANDO O ENVIO E RECEBIMENTO, COM SUCESSO, DE COMANDOS <i>TRACEROUTE</i> DE ID0 PARA ID3, ATRAVÉS DE ID2 (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR)	190
FIGURA 137 – VISTA AÉREA MOSTRANDO AS POSIÇÕES DOS NÓS ID0, ID2 E ID3 QUANDO ID3 ENCONTRAVA-SE EM FRENTE AO <i>PRIMEIRO</i> POSTE DEPOIS DAQUELE ONDE FOI FIXADO ID2, NO SENTIDO DA ILHA DA BOA VIAGEM (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR)	191
FIGURA 138 – NÓ MÓVEL ID3 NA ÁREA DE ESTACIONAMENTO EM FRENTE AO <i>SEGUNDO</i> POSTE DEPOIS DAQUELE ONDE ESTAVA O NÓ FIXO ID2 (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i> E O AUTOR)	191
FIGURA 139 – TELA DO APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO MOSTRANDO O ENVIO E RECEBIMENTO, COM SUCESSO, DE COMANDOS <i>TRACEROUTE</i> DE ID0 PARA ID3, ATRAVÉS DE ID2 (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR)	192
FIGURA 140 – VISTA AÉREA MOSTRANDO AS POSIÇÕES DOS NÓS ID0, ID2 E ID3, QUE ESTAVA NA ÁREA DE ESTACIONAMENTO EM FRENTE AO <i>SEGUNDO</i> POSTO DEPOIS DAQUELE ONDE FOI FIXADO O NÓ ID2 (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR).....	193
FIGURA 141– NÓ MÓVEL ID3 NA ÁREA DE ESTACIONAMENTO EM FRENTE AO <i>TERCEIRO</i> POSTE DEPOIS DAQUELE ONDE ESTAVA O NÓ FIXO ID2 (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i> , JOACIR DE OLIVEIRA SILVA E O AUTOR)	193
FIGURA 142 – TELA DO APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO MOSTRANDO O ENVIO PELO NÓ FIXO ID0 DE COMANDOS <i>TRACEROUTE</i> , OS QUAIS FORAM TODOS RECEBIDOS PELO NÓ ID3 COM SUCESSO (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR)	194

FIGURA 143 – NÓ MÓVEL ID3 NA ÁREA DE ESTACIONAMENTO EM FRENTE AO QUARTO POSTE DEPOIS DAQUELE ONDE ESTAVA O NÓ FIXO ID2 (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i> , JOACIR DE OLIVEIRA SILVA E O AUTOR)	195
FIGURA 144 – TELA DO APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO MOSTRANDO O ENVIO, PELO NÓ FIXO ID0 DE COMANDOS <i>TRACEROUTE</i> , DOS QUAIS A MAIORIA FOI RECEBIDA, PELO NÓ ID3, COM SUCESSO (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR).....	195
FIGURA 145 – NÓ MÓVEL ID3 NA ÁREA DE ESTACIONAMENTO EM FRENTE AO QUINTO POSTE DEPOIS DAQUELE ONDE ESTAVA O NÓ FIXO ID2 (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i> , JOACIR DE OLIVEIRA SILVA E O AUTOR)	196
FIGURA 146 – TELA DO APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO MOSTRANDO O ENVIO PELO NÓ FIXO ID0 DE COMANDOS <i>TRACEROUTE</i> , DOS QUAIS TODOS FORAM RECEBIDOS COM SUCESSO, PELO NÓ ID3 (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR).....	197
FIGURA 147 – NÓ MÓVEL ID3 NA ÁREA DE ESTACIONAMENTO EM FRENTE AO SEXTO POSTE DEPOIS DAQUELE ONDE ESTAVA O NÓ FIXO ID2 (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i> E O AUTOR)	198
FIGURA 148 – TELA DO APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO MOSTRANDO O ENVIO, PELO NÓ FIXO ID0, DE COMANDOS <i>TRACEROUTE</i> , DOS QUAIS FORAM TODOS RECEBIDOS, PELO NÓ ID3, COM SUCESSO, SENDO QUE UM DELES SOFREU INTERFERÊNCIAS (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR)	199
FIGURA 149 – NÓ MÓVEL ID3 NA ÁREA DE ESTACIONAMENTO EM FRENTE AO SÉTIMO POSTE DEPOIS DAQUELE ONDE ESTAVA O NÓ FIXO ID2 (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i> , JOACIR DE OLIVEIRA SILVA E O AUTOR)	200
FIGURA 150 – TELA DO APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO MOSTRANDO O ENVIO, PELO NÓ FIXO ID0, DE COMANDOS <i>TRACEROUTE</i> , DOS QUAIS TODOS FORAM RECEBIDOS, PELO NÓ ID3, COM SUCESSO, EMBORA ALGUNS DELES TENHAM SOFRIDO INTERFERÊNCIAS (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR)	201
FIGURA 151 – NÓ MÓVEL ID3 NA ÁREA DE ESTACIONAMENTO EM FRENTE AO OITAVO POSTE DEPOIS DAQUELE ONDE ESTAVA O NÓ FIXO ID2 (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i> , JOACIR DE OLIVEIRA SILVA E O AUTOR)	202
FIGURA 152 – TELA DO APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO MOSTRANDO O ENVIO PELO NÓ FIXO ID0 DE COMANDOS <i>TRACEROUTE</i> , DOS QUAIS TODOS FORAM RECEBIDOS, PELO NÓ ID3, COM SUCESSO, EMBORA ALGUNS DELES TENHAM SOFRIDO INTERFERÊNCIAS (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR)	203
FIGURA 153 – NÓ MÓVEL ID3 NA ÁREA DE ESTACIONAMENTO EM FRENTE AO NONO POSTE DEPOIS DAQUELE ONDE ESTAVA O NÓ FIXO ID2 (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i> , JOACIR DE OLIVEIRA SILVA E O AUTOR)	204

FIGURA 154 – TELA DO APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO MOSTRANDO O ENVIO PELO NÓ FIXO ID0 DE COMANDOS <i>TRACEROUTE</i> , DOS QUAIS A MAIORIA FOI RECEBIDA, PELO NÓ ID3, COM SUCESSO, EMBORA ALGUNS DELES TENHAM SOFRIDO INTERFERÊNCIAS OU SIDO PERDIDOS (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR)	205
FIGURA 155 – NÓ MÓVEL ID3 NA ÁREA DE ESTACIONAMENTO EM FRENTE AO <i>DÉCIMO</i> POSTE DEPOIS DAQUELE ONDE ESTAVA O NÓ FIXO ID2 (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i> , JOACIR DE OLIVEIRA SILVA E O AUTOR)	206
FIGURA 156 – TELA DO APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO MOSTRANDO O ENVIO PELO NÓ FIXO ID0 DE COMANDOS <i>TRACEROUTE</i> , DOS QUAIS A MAIORIA FOI RECEBIDA, PELO NÓ ID3, COM SUCESSO E ALGUNS DELES TENHAM SIDO PERDIDOS (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR)	207
FIGURA 157– NÓ MÓVEL ID3 NA ÁREA DE ESTACIONAMENTO EM FRENTE AO <i>DÉCIMO PRIMEIRO</i> POSTE DEPOIS DAQUELE ONDE ESTAVA O NÓ FIXO ID2 (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i> E O AUTOR)	208
FIGURA 158 – TELA DO APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO MOSTRANDO O ENVIO PELO NÓ FIXO ID0 DE COMANDOS <i>TRACEROUTE</i> , OS QUAIS TODOS FORAM PERDIDOS (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR)	209
FIGURA 159– NÓ MÓVEL ID3 NA ÁREA DE ESTACIONAMENTO EM FRENTE AO <i>DÉCIMO SEGUNDO</i> POSTE DEPOIS DAQUELE ONDE ESTAVA O NÓ FIXO ID2 (FONTE: <i>GOOGLE MAPS</i> E O AUTOR)	210
FIGURA 160 – TELA DO APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO MOSTRANDO O ENVIO PELO NÓ FIXO ID0 DE COMANDOS <i>TRACEROUTE</i> , OS QUAIS TODOS FORAM PERDIDOS (FONTE: APLICATIVO DE COMUNICAÇÃO E O AUTOR)	211

Lista de Tabelas

TABELA 1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE ALGUMAS DAS TECNOLOGIAS IOT (FONTE: <i>BLUETOOTH</i> [15])	11
TABELA 2 – QUADRO COMPARATIVO ENTRE AS TECNOLOGIAS LPWAN SIGFOX, LoRAWAN E NB-IOT (FONTE: MEKKI <i>ET AL.</i> [5] [20])	22
TABELA 3 – ALGUNS CUSTOS REFERENTES ÀS TECNOLOGIAS SIGFOX, LoRA E NB-IOT (FONTE: MEKKI <i>ET AL.</i> [5])	24
TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS DE UMA MODULAÇÃO LoRA (FONTE: SEMTECH [35]).....	37
TABELA 5 – COMBINAÇÕES DE <i>FATOR DE ESPALHAMENTO (SF)</i> E <i>LARGURA DE BANDA (BW)</i> . AS POSIÇÕES COM “X” CORRESPONDEM A SINAIS NÃO-ORTOGONAIS ENTRE SI (FONTE: SCIENCE DIRECT JOURNALS & BOOKS [39])	43
TABELA 6 – TIPOS DE ATIVAÇÃO DE UM DISPOSITIVO FINAL EM UMA REDE LoRAWAN (FONTE: SEMTECH CORPORATION [10])	67
TABELA 7 – IDENTIFICAÇÃO DOS PINOS DO MÓDULO RÁDIO <i>LoRA MESH</i> RD42C (FONTE: MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO <i>LoRA MESH</i> DA EMPRESA RADIOENGE [10])	102
TABELA 8 – ESPECIFICAÇÕES BÁSICAS DE OPERAÇÃO DO MÓDULO RÁDIO <i>LoRA MESH</i> RD42C (FONTE: MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO <i>LoRA MESH</i> DA EMPRESA RADIOENGE [56]).....	103
TABELA 9 – TAXAS DE TRANSMISSÃO DE DADOS LoRA PARA UMA <i>TAXA DE CODIFICAÇÃO (CR)</i> IGUAL A 4/5 (FONTE: MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO <i>LoRA MESH</i> DA EMPRESA RADIOENGE [56])	104
TABELA 10 – VALORES DE ATENUAÇÃO DA POTÊNCIA DO SINAL TRANSMITIDO POR ID0 PARA ID2 ATRAVÉS DA RÉGUA DE ATENUADORES (FONTE: O AUTOR)	112
TABELA 11 – VALORES DE ATENUAÇÃO DA POTÊNCIA DO SINAL TRANSMITIDO POR ID0 PARA ID3 ATRAVÉS DA RÉGUA DE ATENUADORES (FONTE: O AUTOR).....	112
TABELA 12 – RESUMO DAS MEDIÇÕES DE SINAL REALIZADAS NO CENÁRIO EXTERNO CARACTERIZADO PELA ORLA DA PRAIA DA BOA VIAGEM, EM NITERÓI, RJ (FONTE: O AUTOR).....	137
TABELA 13 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS SENSORES DHT11 E DHT22 (FONTE: ADAFRUIT INDUSTRIES [54]).....	160

TABELA 14 – ESPECIFICAÇÕES BÁSICAS DE OPERAÇÃO DO MÓDULO RÁDIO <i>LoRa MESH</i> RD42C (FONTE: MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO <i>LoRa MESH</i> DA EMPRESA RADIOENGE [56]).....	162
TABELA 15 – VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS DO MÓDULO RÁDIO <i>LoRa MESH</i> RD42C (FONTE: MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO <i>LoRa MESH</i> DA EMPRESA RADIOENGE [56]).....	162
TABELA 16 – IDENTIFICAÇÃO DOS PINOS DO MÓDULO RÁDIO <i>LoRa MESH</i> RD42C (FONTE: MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO <i>LoRa MESH</i> DA EMPRESA RADIOENGE [56]).....	163
TABELA 17 – PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DO MÓDULO RÁDIO <i>LoRa MESH</i> RD42C (FONTE: MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO <i>LoRa MESH</i> DA EMPRESA RADIOENGE [56]).....	164
TABELA 18 – TAXAS DE TRANSMISSÃO DE DADOS DO MÓDULO RÁDIO <i>LoRa MESH</i> RD42C (FONTE: MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO <i>LoRa MESH</i> DA EMPRESA RADIOENGE [56]).....	165
TABELA 19 – VALOR DECIMAL DO CAMPO <i>PORT FIELD (FPORT)</i> E A CHAVE DE CRIPTOGRAFIA <i>K</i> CORRESPONDENTE (FONTE: LoRa ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29]).....	177
TABELA 20 – CAMPO <i>INFO</i> , QUANDO <i>INFODESC</i> = 0, 1 OU 2 (FONTE: LoRa ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29]).....	185
TABELA 21 – CAMPO <i>INFO</i> , QUANDO <i>INFODESC</i> = 3 (FONTE: LoRa ALLIANCE LoRAWAN L2 1.0.4 SPECIFICATION [29]).....	185

Lista de Abreviaturas e Siglas

3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
ABP	<i>Activation By Personalization</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
ADR	<i>Adaptative Data Rate</i>
AES-128	<i>Advanced Encryption Standard 128</i>
AES-CMAC	<i>Advanced Encryption Standard–Cipher Message Authentication Code (AES-CMAC)</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
AppKey	<i>Application Encryption Key</i>
AppSKey	<i>Application Session Encryption Key</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
Bps	<i>Bits per second</i>
BT	<i>Bluetooth</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CCD	<i>Charged-Coupled Device</i>
CDMA	<i>Code-Division Multiple Access</i>
Chirp	<i>Compressed High Intensity Radar Pulse</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>

CR	<i>Code Rate</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check Code</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DevEUI	<i>end-Device serial Extended Unique Identifier</i>
DL	<i>Downlink</i>
DR	<i>Data Rate</i>
DSLR	<i>Digital Single Lens Reflex camera</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
EUI	<i>Extended Unique Identifier</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FHDR	<i>Frame Header</i>
FHSS	<i>Frequency-Hopping Spread Spectrum</i>
FPort	<i>Field Port</i>
FRMPayload	<i>MAC Frame Payload encryption</i>
FSK	<i>Frequency-Shift Keying</i>
FUOTA	<i>Firmware Updating Over The Air</i>

Gb/s	<i>Gigabits per second</i>
GND	<i>Ground</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPIO	<i>General Purpose Input / Output</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
ID	<i>Identifier</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IP67	<i>Ingress Protection level 67</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPv6	<i>Internet Protocol version 6</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical band</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LNS	<i>LoRaWAN Network Server</i>

LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LoRa Mesh	<i>Long Range Mesh Network</i>
LoS	<i>Line of Sight</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MCU	<i>Microcontroller Unit</i>
MEMS	<i>Microelectromechanical Systems</i>
MHDR	<i>MAC Header</i>
MIC	<i>Message Integrity Code</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transportation</i>
NB-IoT	<i>NarrowBand – Internet of Things</i>
NFC	<i>Near Field Communication</i>
NLoS	<i>Non Line of Sight</i>
NwkSKey	<i>Network Session encryption Key</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Single-Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
OTAA	<i>Over The Air Activation</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PIR	<i>Passive Infrared Sensor</i>
PHDR	<i>LoRa Physical Header</i>
PHDR_CRC	<i>Cyclic Redundancy Check of the LoRa Physical Header</i>

PHY	<i>Physical layer</i>
PPM	<i>Parts Per Million</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
QR Code	<i>Quick Response Code</i>
RA	<i>Registration Authority</i>
RC	<i>Rate Code</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RFU	<i>Reserved for Future Use</i>
RN	<i>Repeater Nodes</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
SC	<i>Service Center</i>
SF	<i>Spread Factor</i>
SN	<i>Sensor Nodes</i>
SSO	<i>Standards Setting Organizations</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDoA	<i>Time Difference of Arrival</i>
THSS	<i>Time-Hopping Spread Spectrum</i>
TOA	<i>Time On Air</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver / Trasmitter</i>

UL	<i>UpLink</i>
UNB	<i>Ultra Narrow band</i>
USART	<i>Universal Synchronous / Asynchronous Receiver / Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
VCC	<i>Voltage at the Common Colector</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
W-CDMA	<i>Wide-Band Code Division Multiple Access</i>
WIMAx	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i>

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Motivação	5
1.2 Objetivos	5
1.3 Estrutura do Trabalho	6
Capítulo 2 - Conceituação Teórica	7
2.1 As Origens do Sensoreamento - Telemetria	7
2.2 Tecnologias IoT	9
2.3 Algumas das principais tecnologias IoT usadas em redes LPWAN	12
2.3.1 Sigfox	12
2.3.2 NB-IoT	14
2.3.3 LoRaWAN	16
2.4 Vantagens das tecnologias LoRa e LoRaWAN	24
2.5 Comunicações por Espalhamento Espectral	26
2.5.1 O Teorema de Shannon-Hartley	26
2.5.2 Tipos de Espalhamento Espectral	27
2.6 Visão detalhada da tecnologia LoRa	32
2.6.1 Parâmetros da Modulação LoRa	34
2.6.2 Colisão e Ortogonalidade entre Sinais	38
2.6.3 Representação de um Sinal LoRa modulado em um gráfico de Frequência versus Tempo	41
2.7 Caracterização de uma rede LoRaWAN	42
2.7.1 Dispositivos Finais (End Devices)	44
2.7.2 Estações retransmissoras (Gateways)	56
2.7.3 Servidor de Rede (LoRaWAN-enabled Network Server, LNS)	62
2.7.4 Servidores de Aplicação (Application Servers)	64
2.7.5 Servidor de Conexão (Join Server)	64
2.7.6 Comissionamento de um dispositivo final em redes LoRaWAN	65
2.7.7 Segurança em redes LoRaWAN: princípios básicos	66
2.7.8 Classes de dispositivos finais	70
2.7.9 Estrutura básica dos quadros LoRa	80
Capítulo 3 - Trabalhos Relacionados	81
Capítulo 4 - Proposta do Trabalho	93
4.1 Tecnologia <i>LoRa Mesh</i>	97

4.2	Sensor de Temperatura e Umidade DHT22.....	98
4.3	Módulo rádio <i>LoRa Mesh</i> RD42C	98
4.4	Protótipo simplificado da rede <i>LoRa Mesh</i>	102
4.5	Estrutura básica dos quadros do módulo RD42C	103
Capítulo 5 - Resultados Obtidos.....		105
5.1	Metodologia utilizada nos Ensaios	106
5.2	Ensaio de bancada: régua de atenuadores de sinais de RF	110
5.3	Ensaio de campo: análise em ambientes urbanos interno e externo	111
5.3.1	Primeiro Cenário: ambiente urbano interno – Bloco D da Escola de Engenharia da UFF, em Niterói, RJ	111
5.3.2	Segundo Cenário: ambiente urbano externo – Campus da Praia Vermelha, em Niterói, RJ	120
5.3.3	Terceiro Cenário: ambiente urbano externo – Campus da Praia Vermelha, em Niterói, RJ	122
5.3.4	Quarto Cenário: ambiente urbano externo – orla da Praia da Boa Viagem, em Niterói, RJ	124
Capítulo 6 - Conclusão		149
6.1	Trabalhos Futuros	151
Bibliografia.....		152
Anexo A – Obtenção de uma expressão prática para a capacidade de um canal de comunicações a partir da equação de Shannon-Hartley		157
Anexo B – Características técnicas dos sensores DHT11 e DHT22.....		159
Anexo C – Características do módulo rádio <i>LoRa Mesh</i> Radioenge RD42C		160
Apêndice A – Detalhamento dos Quadros LoRa e Beacon.....		165
A.1	Estrutura básica dos quadros LoRa	165
A.2	Estrutura básica dos quadros Beacon	178
Apêndice B – Detalhamento das Medições realizadas na orla da Praia da Boa Viagem, em Niterói, RJ.....		185

Capítulo 1 - Introdução

A expressão Internet das Coisas (IoT), novo paradigma surgido há algumas décadas nas áreas de telecomunicações e redes de computadores, inicialmente foi associada a objetos conectados e interoperáveis que apresentavam a propriedade de serem localizados com tecnologia de identificação por radiofrequência (RFID) [1]. Mais tarde, os pesquisadores começaram a relacionar tal expressão a diversas outras tecnologias, como sensores, atuadores, aparelhos GPS, dispositivos móveis, máquinas de vários tipos e naturezas etc. [2].

Numa definição bastante simples e que, portanto, não esgota a amplitude do seu significado, a Internet as Coisas (IoT) é um termo referenciado, basicamente, à interconexão entre dispositivos os mais diversos possíveis (“Coisas”), para a troca de dados entre si, através da grande rede mundial, visando o atendimento de uma finalidade específica.

Uma definição mais formal seria:

Uma infraestrutura de rede global dinâmica, com recursos de autoconfiguração baseados em protocolos interoperáveis de comunicação, na qual “coisas” físicas e virtuais têm identidades, atributos físicos e personalidades virtuais, usam interfaces inteligentes e são perfeitamente integradas à rede de informações [3].

Atualmente, a Internet das Coisas (IoT) pode ser vista como uma grande infraestrutura de rede global à qual estão conectados bilhões de dispositivos, número este crescente, conforme pode ser observado na Figura 1, que, periodicamente, comunicam-se entre si, atendendo às mais diversas finalidades e serviços, e permitindo a existência de diversas outras importantes tecnologias associadas, como RFID, já mencionada anteriormente, código de barras, QR-Code, redes WSN (*Wireless Sensor Networks*), redes sociais, GPS (*Global Positioning System*), computação em nuvem, NFC (*Near Field Communication*), Wi-Fi, telefonia celular 1G a 5G, *Smartphones*, ZigBee, WIMAx, SigFox, LoRa, NB-IoT etc.

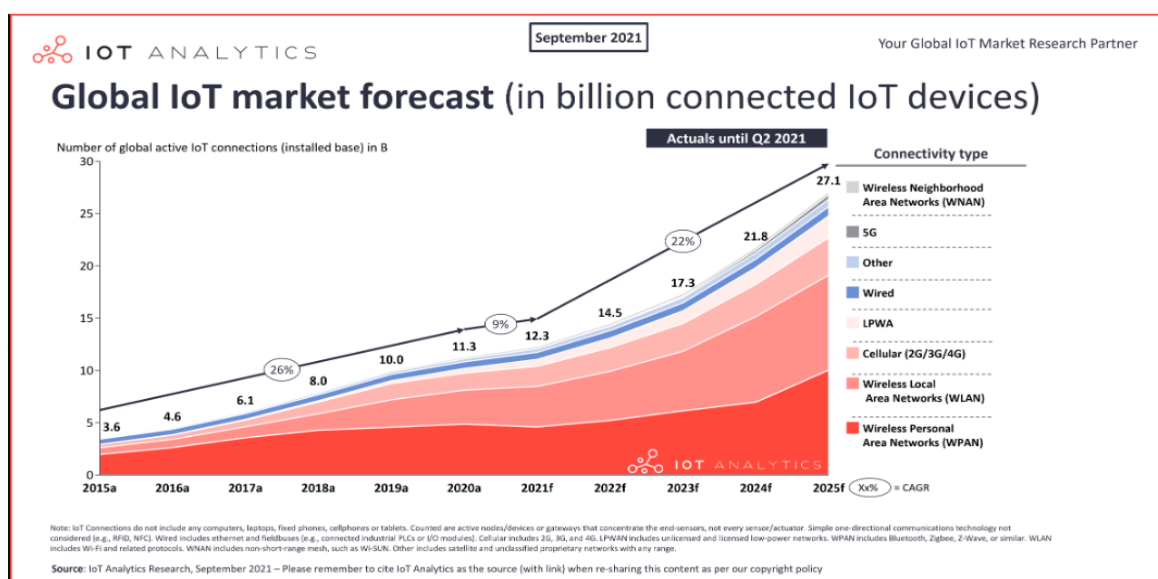


Figura 1: Crescimento estimado de dispositivos conectados à Internet das Coisas (IoT) ao longo dos anos.
Fonte: IoT ANALYTICS RESEARCH [65].

A indústria, de um modo geral, especialmente a chamada indústria 4.0, é um segmento que encontrou enormes aplicações na Internet das Coisas (IoT), nas áreas de logística, manufatura, controle de estoques, automação, nos setores farmacêutico, químico, automobilístico etc.

Também as atividades comerciais encontraram espaço para a potencialização dos seus negócios, com a forte expansão das vendas *on-line*, dos sistemas de entrega de mercadorias, da fidelização da clientela, do lançamento de novos produtos eletrodomésticos inteligentes, conectados à Internet das Coisas (IoT) etc.

O setor de finanças é outro que tem identificado enormes aplicações em IoT, através da movimentação com segurança de grandes volumes financeiros, da automação bancária, permitindo a qualquer cliente que possua um cartão de crédito com bandeira internacional movimentar os seus recursos em qualquer parte do mundo, pagar e receber valores por *internet banking*, efetuar a compra e venda de ações de empresas nas bolsas mundiais, por meio dos *homebrokers* virtuais, do oferecimento de novos serviços, como o pagamento de despesas com *smartphones*, e tantos outros que frequentemente surgem.

Com o envelhecimento gradativo das populações mundiais, a área da saúde cada vez mais tem procurado atender às demandas sempre crescentes por recursos médicos, passando

a oferecer soluções impossíveis de serem executadas em outras épocas anteriores ao surgimento da Internet das Coisas (IoT), como o monitoramento remoto das condições vitais de pacientes por meio de sensores conectados a seus corpos, a realização de cirurgias por robôs controlados à distância, os atendimentos de pacientes por holografia, como há vários anos vem sendo feito pela Universidade Federal Fluminense, através do Projeto Telessaúde, num acordo UFF/Departamento de Engenharia de Telecomunicações (TET) e as Forças Armadas do país, para atendimento remoto às tropas e populações ribeirinhas localizadas em regiões distantes da Amazônia etc. [66], [67].

A área da educação cada vez mais utiliza os recursos disponibilizados pela Internet, oferecendo novas modalidades de ensino, cursos *on-line*, bibliotecas virtuais, democratizando, assim, o acesso ao conhecimento [68].

Já a área do entretenimento, da cultura e do lazer viram as suas atividades se desenvolverem bastante com as facilidades disponibilizadas pela grande rede, permitindo a compra e venda de ingressos de eventos diversos, visitas virtuais a museus, o oferecimento de canais de *streaming* etc., trazendo conforto, segurança e praticidade aos clientes.

Algumas aplicações já existentes na área de IoT que utilizam tecnologias de rádio de curto alcance, como *Bluetooth*, *Bluetooth Low Energy (BLE)*, *ZigBee* e outras congêneres, não se mostram apropriadas para o atendimento dos requisitos impostos pelas atividades que necessitam de longo alcance, baixas taxas de dados e pequeno consumo de energia. No entanto, as soluções oferecidas pela tecnologia celular (nas suas várias gerações, de 1G a 5G), apesar de cobrirem maiores distâncias, apresentam um gasto elevado de energia. Isso, então, levou ao surgimento de uma nova tecnologia de comunicação, através das redes de baixo consumo e longo alcance (LPWAN) [5].

As redes LPWAN caracterizam-se por oferecer conectividade a dispositivos que consomem pouca energia e encontram-se distribuídos em áreas geográficas amplas [6]. Atualmente, há várias opções de redes LPWAN disponíveis. Três das mais destacadas são as oferecidas pelas tecnologias Sigfox, NB-IoT e LoRa / LoRaWAN, com sua variação *LoRa Mesh*. Sigfox e Lora têm maior alcance e menor custo do que NB-IoT, mas esta apresenta menor latência e melhor qualidade de serviço [5].

LoRa define toda uma camada física, incluindo aspectos como códigos de correção de erros, definição das bandas de operação possíveis, largura de banda utilizada, etc. Sob outro ângulo, ela pode ser vista, também, como uma técnica de modulação de sinais de rádio por espalhamento espectral proprietária, derivada da tecnologia *Chirp Spread Spectrum* (CSS) [7], amplamente utilizada há vários anos em sonares e radares, cujo desenvolvimento teve início em 2009 quando dois pesquisadores franceses, Nicolas Sornin e Olivier Seller procuraram criar uma nova tecnologia de comunicação de longa distância e baixo consumo.

No ano seguinte, uniu-se aos dois cientistas o pesquisador Francois Sforza, e, juntos, decidiram fundar a empresa *startup* Cycleo, cujo foco inicial era o oferecimento de soluções para medidores de combustível, água, eletricidade etc. Acreditando no imenso potencial da nova técnica, em Maio de 2012, a companhia Semtech adquiriu a Cycleo, mas continuou tendo a colaboração dos três pesquisadores no aperfeiçoamento da tecnologia LoRa. Deve ser destacado que as empresas Cycleo e Semtech não criaram a tecnologia CSS, apenas iniciaram o seu uso para o envio de novos tipos de dados [8]. Via de regra, a palavra LoRaWAN associa-se ao conceito de uma rede de dispositivos conectados através de uma topologia em estrela, na qual cada nó troca mensagens exclusivamente com o nó central, ou raiz, através de um único salto [10].

Paralelamente a este processo, foi desenvolvido um protocolo de comunicação, inicialmente chamado de LoRaMAC, o qual, entre outros atributos, especificava os formatos de mensagem e as camadas de segurança, para poder operar como um protocolo de rede. Posteriormente, em Fevereiro de 2015, foi fundada a organização *LoRa Alliance*, e o nome inicial do protocolo foi rebatizado para LoRaWAN [9].

A *LoRa Alliance* é uma associação sem fins lucrativos cujos objetivos principais são “dar suporte e promover a adoção global do padrão LoRaWAN para garantir a interoperabilidade entre todos os seus produtos e tecnologias”. Responsável pelo contínuo desenvolvimento deste padrão aberto, ela possui, em consulta feita em Janeiro de 2022, 166 operadores de rede e está presente em mais de 170 países pelo mundo [9].

O termo *LoRa Mesh*, por sua vez, está associado ao conceito de uma rede em que os dispositivos se comunicam através da tecnologia LoRa, mas possuem uma topologia em

malha (*mesh*), na qual cada nó possui a capacidade de reencaminhar para outros nós as mensagens que não são destinadas a ele, por meio de multissaltos, se necessário.

1.1 Motivação

Devido ao emprego de uma técnica de comunicação derivada da usada pelo espalhamento espectral *Chirp* (CSS), a tecnologia de comunicação LoRa destaca-se por apresentar longo alcance, alcançando distâncias máximas de 5 km em ambientes urbanos e 15 km em áreas rurais, baixo consumo de energia, alta capacidade (número de mensagens transmitidas por unidade de tempo), limitada pela legislação regulatória de cada região, custo reduzido de dispositivos, segurança na transmissão dos dados, grande sensibilidade na recepção do sinal, forte resistência a interferências, imunidade a mutipercursos e desvanecimento, embora apresente baixas taxas de transmissão e maior latência do que a encontrada em outras soluções [10].

Entretanto, a natureza das redes LoRa/LoRaWAN de apresentar salto único nas transmissões de mensagens pode trazer grandes desafios ao seu uso em algumas aplicações em áreas urbanas, devido à existência de um sem número de obstáculos de todos os tipos e tamanhos, exigindo, nestes casos, o emprego de diversos repetidores (*gateways*), necessários para a requerida conectividade entre os dispositivos da rede, o que significaria a possibilidade de aumento dos custos de implantação [11]. Isso poderia justificar, então, a opção por uma rede LoRa em malha (*LoRa Mesh*) para, através dos múltiplos saltos, "contornar" tais obstáculos. Mas como, neste caso, os enlaces efetivamente usados nesta rede seriam comparativamente curtos (em relação ao alcance típico do padrão LoRa), tal fato, à primeira vista, permitiria o uso de outras tecnologias de alcance mais curto, mas que possivelmente trariam outros potenciais benefícios como taxas de transmissão de dados mais elevadas, verificadas, por exemplo, nas redes que usam o padrão IEEE 802.11ah (redes Wi-Fi Halow), ou nas que utilizam o padrão IEEE 802.15.4 (redes Wi-SUN). No entanto, se não houver a necessidade de altas taxas de transmissão, mas, sim, a de conexão de muitos dispositivos, a tecnologia *LoRa Mesh* seria, talvez, a mais indicada devido ao seu baixo custo de implantação, maior alcance e possibilidade da ligação de grande número de nós.

Em virtude destas e das demais características mencionadas acima, como motivação, levantou-se a hipótese de se investigar se haveria no mercado, por ocasião da época de

desenvolvimento deste trabalho, soluções comerciais de baixo custo que oferecessem dispositivos equipados com a tecnologia *LoRa Mesh*, a fim de se verificar o seu desempenho em cenários urbanos, em situações com linha de visada (LoS) e sem (NLoS).

1.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho consiste, então, na análise de uma rede que utiliza a tecnologia *LoRa Mesh*, composta por três dispositivos, que operam na frequência ISM de 915 MHz, de forma que a mensagem encaminhada por um dispositivo que esteja fora do alcance de outro em uma ligação de rádio direta utilize o dispositivo intermediário, para o devido reencaminhamento da mensagem entre o remetente original e o destinatário final.

Para concretizar e avaliar as premissas apresentadas, foi montado um protótipo básico composto por três dispositivos, fabricados pela empresa brasileira Radioenge. Cada módulo era constituído por um rádio *LoRa Mesh* modelo RD42C, ligado a uma placa que possuía um conector USB tipo B, de modo a permitir a conexão de um computador para configuração do *hardware* e monitoramento das grandezas de interesse, como intensidade do sinal recebido, número de quadros recebidos, níveis de ruído presentes no canal etc.

A fim de se atingir estas metas, foram definidas as seguintes etapas no desenvolvimento deste trabalho:

- comparação entre as diversas tecnologias IoT existentes no mercado na época deste estudo;
- descrição da estrutura de uma rede LoRa teórica;
- montagem de um protótipo composto por três módulos RD42C, da empresa Radioenge;
- análise do desempenho da rede *LoRa Mesh* em ambientes urbanos interno e externo, ambos com linha de visada (LoS) e sem (NLoS).

1.3 Estrutura do Trabalho

O restante dessa dissertação está estruturado como descrito a seguir. O Capítulo 2 trata da conceituação teórica sobre as tecnologias IoT, especialmente as encontradas nas redes LPWAN, como LoRa, LoRaWAN e *LoRa Mesh*, apresentando as suas características mais relevantes. O Capítulo 3 discorre sobre alguns trabalhos relacionados ao tema proposto. Já o Capítulo 4 apresenta a proposta do presente estudo. A seguir, o Capítulo 5 mostra os resultados obtidos, após as medições realizadas, e faz uma análise dos dados coletados. Por fim, o Capítulo 6 conclui a pesquisa e trata de algumas sugestões de possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Conceituação Teórica

2.1 As Origens do Sensoriamento - Telemetria

Se a Internet das Coisas for observada sob a perspectiva de uma grande rede global à qual estão conectados bilhões de dispositivos que geram dados a todo instante, através da atuação dos mais diversos tipos de sensores, deve-se levar em conta que esse processo teve a sua origem no século 19, quando começaram a surgir os primeiros sistemas clássicos de telemetria.

A *telemetria* é uma palavra de origem grega, formada a partir da junção do prefixo *tele*, que significa longe, remoto, distante, com o radical *metron*, ou medida. Portanto, medida à distância. Ela consiste, então, na geração, transmissão e processamento de dados entre dois ou mais dispositivos distantes entre si. Para isso, três elementos devem estar presentes: *elemento de medição/atuação*, formado pelos sensores e atuadores, *elemento de transmissão dos dados*, com ou sem fio, através do uso de algum tipo de facilidade, como telefonia fixa, redes cabeadas, rádio, satélite etc., e *elemento de análise e processamento dos dados*, nos locais designados para a realização do controle e da gerência deles.

Com o surgimento da telemetria, historicamente tem-se o registro dos seguintes eventos [12]:

1845: desenvolvimento dos primeiros circuitos de transmissão de dados, ligando o Palácio de Inverno do Czar russo com os quartéis-generais do exército;

1874: engenheiros franceses construíram em Mont Blanc um sistema contendo sensores de tempo e profundidade de neve, para transmissão de dados em tempo real para Paris;

1901: o inventor C. Michalke patenteou um circuito, conhecido como *selsyn*, que permitiu o envio de informações de rotações sincronizadas, precursor dos atuais sistemas de aquisição de dados;

1906: construção do primeiro conjunto de estações sismológicas do Observatório de Pulkovo, na Rússia;

1912: desenvolvimento de um sistema de telemetria pela Comunidade Edison (ComEd), para o monitoramento de cargas da sua rede elétrica. A *ComEd* é uma provedora de energia elétrica no estado de Illinois, nos Estados Unidos;

1914: conclusão da construção do Canal do Panamá e uso de sistemas de telemetria para o controle de comportas e níveis d'água;

1920: início do uso de balões para a transmissão de dados meteorológicos;

1930: início do desenvolvimento concorrente de radiossondas pelos pesquisadores Pavel Molchanov, na Rússia, e Robert Bureau, na França. No sistema de Molchanov, os valores de temperatura e pressão atmosférica eram transmitidos por sinais de rádio modulados por Código Morse. Nesta mesma década, foram feitos os primeiros testes com os foguetes alemães V-2, nos quais um sistema chamado “Messina” enviava quatro parâmetro balísticos, através de sinais de rádio.

Desde então, os sistemas de telemetria sofreram grandes avanços em funcionalidade, confiabilidade e sofisticação. Deste modo, o campo de aplicação da telemetria expandiu-se enormemente, oferecendo soluções nas mais diversas áreas, como na indústria de óleo e gás, agricultura, ciência espacial, inteligência militar, medicina/saúde, piscicultura, nas corridas automobilísticas, nos sistemas de transporte, no rastreamento da vida animal, gerenciamento de água, energia, fluidos, mercadorias e estoques etc. [12].

2.2 Tecnologias IoT

As redes sem fio e de curto alcance, como Bluetooth, Bluetooth Low Energy, Wi-fi, ZigBee, Z-Wave etc., apresentam um alcance máximo de centenas de metros, que pode ser estendido através do uso de dispositivos repetidores, o que, entretanto, irá encarecer o custo da sua implantação.

Já as redes celulares de comunicação, em suas diversas gerações (1G a 5G), apesar de oferecerem grande cobertura, têm maior consumo de energia elétrica quando comparadas às redes de baixo consumo e longo alcance (LPWAN). No entanto, o aparecimento da tecnologia 5G promete mudar esse panorama. Suas principais características são [13]: (1) taxas de transmissão de dados bem mais elevadas, de até 10 Gbps (10 a 100 vezes aquelas atualmente disponíveis nas redes 4G e 4.5G); (2) maior disponibilidade de operação ao longo do tempo; (3) ampliação da cobertura; (4) redução no consumo de energia elétrica pelas redes; (5) autonomia de até 10 anos de vida útil das baterias dos dispositivos IoT; (6) até 100 vezes o número de dispositivos conectados por unidade de área, em relação à tecnologia 4G LTE; (7) maior largura de banda por unidade de área; e (8) latência máxima de 1 milissegundo (tempo máximo de resposta a uma requisição à rede). Estes números impactantes tornam-se possíveis, entre outros motivos, através da utilização, pelas redes 5G, de frequências da ordem de 30 a 300 GHz [13].

Por outro lado, as redes de baixo consumo e longo alcance (LPWAN) vêm despertando cada vez mais a atenção das indústrias [14], pois o monitoramento em tempo real do maquinário evita ou minimiza quedas na produção das suas linhas fabris e permite o controle de forma remota, em busca do aumento da eficiência. Algumas aplicações requerem comunicação frequente e alta qualidade de serviço. Além disso, as tecnologias utilizadas nestas redes oferecem um alcance máximo teórico de 1 a 10 km em áreas urbanas e de 10 a 40 km em zonas rurais [5].

A Tabela 1 mostra as características mais relevantes das principais tecnologias presentes na Internet das Coisas (IoT), num levantamento feito em 2019 [15].

Tabela 1. Principais Características de algumas das Tecnologias IoT.

Atributo	Bluetooth Low Energy (BLE)	Wi-Fi	Z-Wave	IEEE_802.15.4 (ZigBee, Thread)	LTE-M	NB-IoT	Sigfox	LoRaWAN
Alcance Máximo	10 m - 1,5 Km	15 m - 100 m	30 m - 50 m	30 m - 100 m	1 km - 10 km	1 km - 10 km	3 Km - 50 Km	2 Km - 20 Km
Taxas de Transferência	125 kbps - 2 Mbps	54 Mbps - 1,3 Gbps	10 kbps - 100 Kbps	20 kbps - 250 Kbps	Até 1 Mbps	Até 200 Kbps	Até 100 bps	300 bps - 50 kbps
Consumo de Energia	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Baixo
Frequência do Custo	Uma vez	Uma vez	Uma vez	Uma vez	Recorrente	Recorrente	Recorrente	Uma vez
Custo do Dispositivo	Abaixo de US\$ 5,00	Abaixo de US\$ 10,00	Abaixo de US\$ 10,00	US\$ 8,00 a US\$ 15,00	US\$ 8,00 a US\$ 20,00	US\$ 8,00 a US\$ 20,00	Abaixo de US\$ 5,00	US\$ 8,00 a US\$ 15,00
Topologia	Ponto a Ponto, Estrela, Malha	Ponto a Ponto, Estrela, Malha	Malha	Malha	Estrela	Estrela	Estrela	Estrela
Número de Unidades Vendidas (em milhões, no ano de 2019)	$\cong$ 3.500	$\cong$ 3.200	$\cong$ 120	$\cong$ 420	$\cong$ 7	$\cong$ 16	$\cong$ 10	$\cong$ 45

Fonte: Bluetooth Inc. [15].

Como pode ser observado na Tabela 1, as tecnologias Wi-Fi, Z-Wave e as baseadas no padrão IEEE 802.15.4, como ZibBee, Thread etc., têm um alcance pequeno, da ordem de dezenas de metros. O Bluetooth Low Energy (BLE), por sua vez, pode atingir, segundo os seus desenvolvedores, até 240 m (Bluetooth 5.0). Já as demais tecnologias voltadas para as redes LPWAN, como Z-Wave, Sigfox, LoRaWAN e NB-IoT, chegam a alcances máximos da ordem de dezenas de quilômetros, principalmente em áreas rurais.

A Figura 2, por sua vez, apresenta um gráfico que relaciona o consumo de energia, as taxas de transmissão em ordem de grandeza e os alcances de algumas das principais tecnologias sem fio. Verifica-se que as tecnologias usadas em redes PAN (*Personal Area Network*), como Bluetooth, ZigBee, NGC, RFID e Thread, têm consumo de energia, velocidades de transmissão e alcance baixos. As redes LAN (*Local Area Network*) também atingem pequenas distâncias, mas apresentam velocidades de transmissão e consumo mais elevados. As redes WAN (*Wide Area Network*), como as de telefonia celular 2G, 3G etc., oferecem grandes taxas de transmissão e atingem longas distâncias, mas ao custo de um maior consumo de energia. Já as redes que utilizam transmissão por satélite são as que alcançam as maiores distâncias, têm altas taxas de transmissão, possuindo, conseqüentemente, alto consumo de energia. Finalmente, as redes LPWAN apresentam pequeno consumo de energia, atingem grandes distâncias, mas com baixas taxas de transmissão e maior latência.

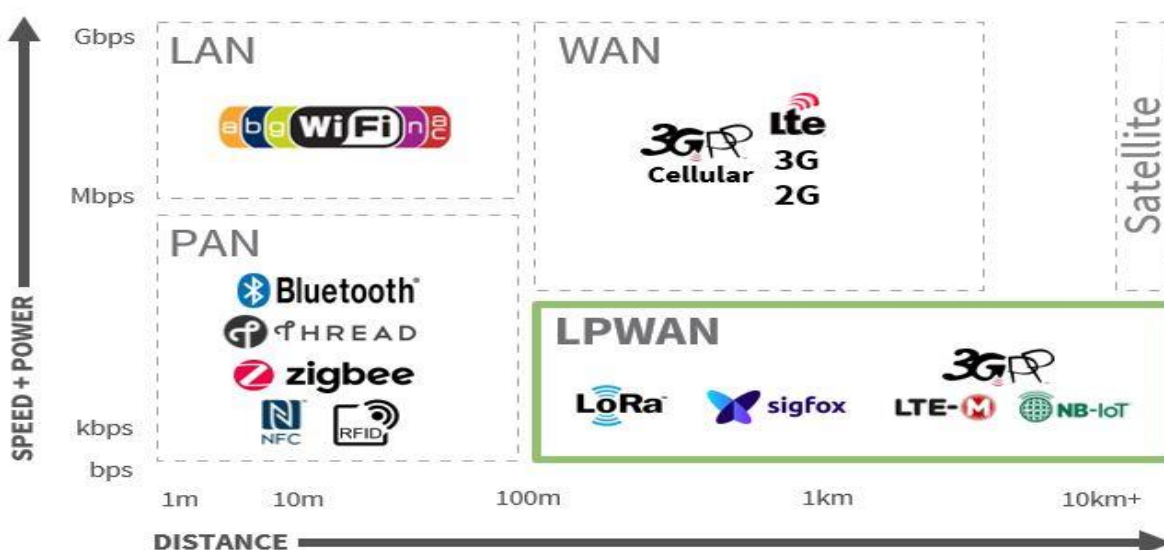


Figura 2. Consumo de energia, taxas de transmissão em ordem de grandeza e alcance máximo de algumas das principais tecnologias wireless.

Fonte: Electronic Specifier [16].

2.3 Algumas das principais tecnologias IoT usadas em Redes LPWAN

Como já mencionado, as redes LPWAN são dirigidas a aplicações que se caracterizam por possuir baixas taxas de transferência de dados, pequeno consumo de energia, grande alcance e dispositivos de custo reduzido.

Há várias opções disponíveis, sendo que três das mais proeminentes tecnologias para redes LPWAN são Sigfox, LoRa e NB-IoT. As duas primeiras usam frequências não licenciadas e protocolos assíncronos. Já a última utiliza frequências licenciadas e protocolo síncrono, o que lhe garante, teoricamente, maior proteção contra ruídos e interferências, e menores valores de latência. A seguir, será feito um breve relato sobre as principais características de cada uma delas.

2.3.1. Sigfox

A tecnologia Sigfox foi desenvolvida em 2010, em Toulouse, França, pela empresa de mesmo nome, que também atua como um provedor de rede LPWAN, fornecendo sua solução IoT em 72 países, em meados de 2021, e que continua a se expandir, através do estabelecimento de parcerias com diversos provedores de rede [5] [18].

Os principais elementos de uma rede Sigfox são dispositivos finais (sensores ou atuadores), estações base, estrutura em nuvem (Internet) e aplicações, conforme pode ser observado na Figura 3 [18].

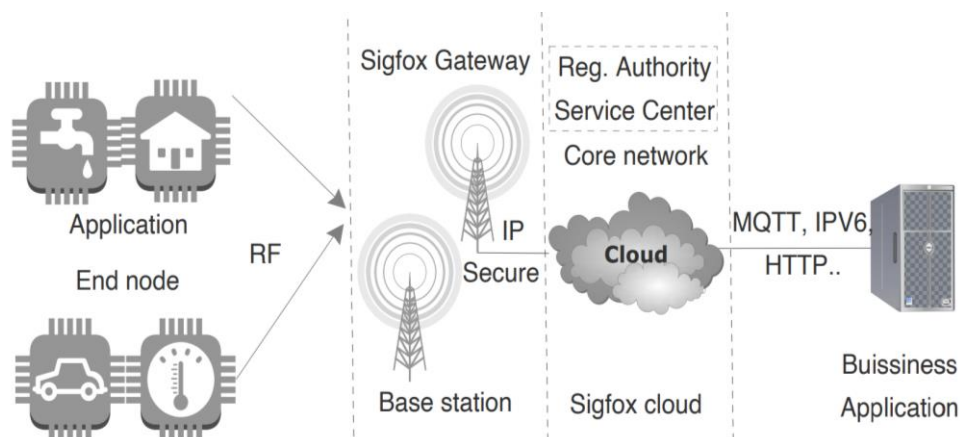


Figura 3. Arquitetura de uma rede Sigfox.

Fonte: Sigfox. [18].

Os dispositivos finais conectam-se a uma ou mais estações-base (*gateways*) por meio de sinais de rádio e, a partir destas, o sinal segue até o núcleo da rede por conexões IP. Como cada sensor pode se comunicar com as estações-base que estejam próximas, o que facilita a mobilidade, não é necessário o estabelecimento de processos de *handover* (passagem de um dispositivo móvel da área de atuação de uma estação rádio base para a da outra, com as consequentes negociações entre ambas [24][25]). O Centro de Serviço (*Service Center, SC*) e a Autoridade de Registro (*Registration Authority, RA*) integram o núcleo da rede e auxiliam no gerenciamento dos dispositivos finais, das estações-base, e nos processos de autorização de acesso de tais dispositivos à rede. Do núcleo da rede, na nuvem, até as aplicações dos usuários finais, o sinal segue através do uso de diversos tipos de protocolo, como MQTT, IPv6, HTTP etc. Já as aplicações podem interagir com os dispositivos finais através de Interfaces de Programação de Aplicações (*Application Programming Interfaces, API*) disponíveis [19].

A tecnologia Sigfox disponibiliza uma solução de comunicação baseada em *software* por meio da qual toda a complexidade do sistema fica concentrada na nuvem, o que permite a redução do consumo de energia e do custo dos dispositivos finais.

A camada física da tecnologia Sigfox, nas comunicações dos dispositivos finais às estações-base, utiliza portadoras em frequência sub-GHz, canais estreitos (UNB, Ultra Narrow Band) de 100 Hz e modulação BPSK. A empresa Sigfox opera na faixa de frequências ISM e seu valor depende da região considerada. Por exemplo, nos Estados Unidos da América, esta banda está regulamentada na faixa de 902 MHz a 928 MHz; na Europa, são usadas, de um modo geral, as faixas de 433,05 MHz a 434,79 MHz, bem como 863 MHz a 870 MHz [5].

Ao utilizar larguras de banda UNB, a tecnologia Sigfox apresenta grande imunidade a ruídos, antenas de custo reduzido, pequeno consumo de energia e alta sensibilidade nos receptores. Entretanto, a taxa de transmissão de dados é limitada a 100 bps [5]. Já o número máximo de mensagens por dia dos dispositivos finais para a rede (*Uplink messages*) é de 140 e desta para eles é de somente 4 (*Downlink messages*), por imposição regulatória, o que impede a confirmação de cada mensagem de *Uplink* encaminhada. Então, a solução adotada pela empresa Sigfox para garantir confiabilidade nas comunicações foi utilizar transmissões

com diversidade na frequência e na repetição de mensagens (cujo valor padrão é 3). Como as estações-base são programadas para receber mensagens simultaneamente em todos os canais de frequência permitidos, os dispositivos finais podem escolher aleatoriamente o canal que irão ocupar para enviar as suas mensagens, evitando ou reduzindo substancialmente a ocorrência de colisões. Em relação aos tamanhos das mensagens, o valor máximo permitido em transmissões *Uplink* é de 12 *bytes* e, em comunicações *Downlink*, é de 8 *bytes* [5][18][20].

2.3.2 NB-IoT

A sigla NB-IoT refere-se à tecnologia *Narrow Band IoT* especificada na Versão 13 (*Release 13*) lançada pelo grupo 3GPP em 2016. Este grupo foi criado em 1998 e reúne várias organizações voltadas para a definição de especificações técnicas de sistemas de comunicações celulares. A seguir, estas foram transformadas em padrões pelas sete organizações regionais parceiras, conforme ilustrado na Figura 4, chamadas de Organizações para o Estabelecimento de Padrões (*Standards Setting Organizations, SSO*), as quais são responsáveis, também, pelo desenvolvimento e reforço das políticas de direitos de propriedade intelectual dos participantes. Através da criação de protocolos específicos, são definidas as propriedades e características de sistemas celulares fim a fim, incluindo dispositivos de usuários, acesso ao rádio, núcleo da rede e serviços oferecidos, entre outras finalidades [21].



Figura 4. Organizações para o Estabelecimento de Padrões, junto com o grupo 3GPP.

Fonte: Qualcomm [21].

A tecnologia NB-IoT pode coexistir com os padrões LTE (*Long Term Evolution*) e GSM (*Global System for Mobile Communications*), operando em frequências licenciadas (como, por exemplo, 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz etc.) e utilizando uma banda de frequências de 200 kHz, o que corresponde a um bloco de recursos em uma transmissão LTE ou GSM [22], conforme mostrado na Figura 5.

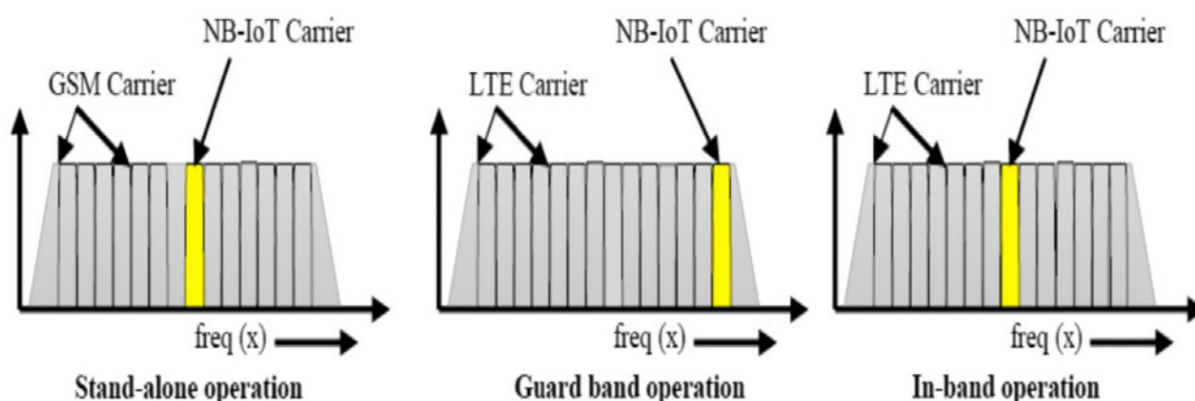


Figura 5. Modos de Operação da tecnologia NB-IoT.

Fonte: SINHA *et al.* [28].

Nesta figura são mostrados três possíveis modos de ocupação da banda de frequências por uma mensagem NB-IoT [28]:

- Operação *Stand-alone*: caracteriza-se pela ocupação de bandas de frequência GSM disponíveis para uso.
- Operação *Guard-band*: utiliza blocos vazios de recursos localizados nas bandas de guarda do intervalo de frequências ocupado pela portadora LTE; e
- Operação *In-band*: ocorre quando são usados blocos de recursos dentro do intervalo de frequências ocupado pela portadora LTE;

O grupo 3GPP recomenda a integração do padrão NB-IoT às redes celulares que utilizam o LTE pois aquele é baseado neste e poderia, assim, ser suportado através de uma atualização de *software* da infraestrutura LTE [5].

Como principais características [20], o padrão NB-IoT oferece conectividade de até 100.000 dispositivos finais por célula, com a possibilidade de escalar ainda mais este valor

através do estabelecimento de mais portadoras. Em mensagens de *Uplink*, este padrão utiliza a técnica de Acesso Múltiplo por Divisão em Frequência de Portadora Única (*Single-Carrier Frequency Division Multiple Access, FDMA*). Já para as mensagens de *Downlink* é empregada a técnica de Acesso Múltiplo Ortogonal por Divisão em Frequência de Portadora Única (*Orthogonal Single-Carrier Frequency Division Multiple Access, OFDMA*). Quanto ao tipo de modulação do sinal, o padrão NB-IoT emprega a modulação por meio da técnica Chaveamento por Mudança de Fase em Quadratura (*Quadrature Phase-Shift Keying, QPSK*) [23]. A taxa de transmissão, por sua vez, é limitada em 20 kbps para mensagens *Uplink* e 200 kbps para transmissões *Downlink*. O tamanho máximo da carga útil de dados (*payload*) é de 1.600 *bytes*. Conforme discutido em [23], a duração da bateria dos dispositivos que utilizam a tecnologia NB-IoT poderia se estender por até 10 anos, caso o número de *bytes* transmitidos diariamente seja de no máximo 200.

As atualizações do padrão NB-IoT continuam pois, de acordo com o grupo 3GPP, há interesse na inclusão de novos recursos como métodos de localização de dispositivos, mobilidade, serviços de *multicast*, pelos quais um grupo de determinados dispositivos recebem a mesma mensagem, como, por exemplo, nos casos de atualizações de *software*, comunicados etc. [5][20].

2.3.3 LoRaWAN

Conforme já observado anteriormente, a tecnologia LoRa trata dos aspectos relacionados à camada física, caracterizando-se como uma técnica proprietária de modulação de sinais, derivada daquela conhecida como *Chirp Spread Spectrum (CSS)*, de modo que os dados a serem transmitidos modulam uma onda portadora sub-GHz, na faixa ISM, cuja frequência tem o seu valor variando continuamente ao longo do tempo, conforme será detalhado mais adiante [5].

Nos Estados Unidos da América, a tecnologia LoRa usa a frequência ISM de 915 MHz, na Europa é utilizada a de 868 Mhz, enquanto que na Ásia é empregado o valor de 433 MHz. Cada região do planeta que utiliza esta tecnologia possui os seus parâmetros regionais específicos como frequência utilizada, número de canais, tamanho máximo da

carga útil (*payload*), tempo máximo diário de uso permitido etc. O padrão adota comunicação bidirecional, do tipo *half-duplex*, apresenta baixos níveis de ruído e grande resiliência a interferências [20].

Esta tecnologia utiliza um parâmetro conhecido como Fator de Espalhamento (*Spread Factor*, SF), para ajustar a robustez da transmissão às distâncias entre os dispositivos que se comunicam. Este parâmetro pode assumir os números inteiros 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12. Quanto maior o valor, maior será o alcance do sinal, pois o receptor do rádio do dispositivo terá a sua sensibilidade aumentada substancialmente e vice-versa. Entretanto, a taxa de transmissão de dados diminuirá bastante. Ela pode assumir valores entre 300 bps e 50 kbps, dependendo do Fator de Espalhamento e da largura de banda adotados. Os valores possíveis para largura de banda são 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz. Já o valor máximo de carga útil (*payload*) permitido depende da região considerada pois a tecnologia LoRa adota diferentes valores de parâmetros, conforme o país considerado. Em alguns o valor máximo de *payload* é de 243 bytes, enquanto que em outros ele pode chegar a 250 bytes [5].

Em 2015, a organização LoRa Alliance lançou a primeira versão do LoRaWAN, o protocolo de comunicação padronizado para uso em suas redes. Uma das suas principais características consiste no fato de que uma mensagem encaminhada por um dispositivo é recebida por todas as estações-base que estejam no seu alcance. Se, por um lado, esta redundância na recepção de mensagens aumenta a probabilidade de sucesso na transmissão de mensagens e localização de dispositivos (através do cálculo da diferença entre os tempos de chegada de cada uma delas ao servidor de rede, responsável por toda a gerência do sistema), por outro, pode implicar no crescimento dos custos de desenvolvimento da rede devido à necessidade de implantação de várias estações-base na região a ser atendida. As mensagens duplicadas, por sua vez, são suprimidas pelo servidor de rede, que também realiza as tarefas de verificação da integridade e segurança de cada mensagem transmitida e do envio para os dispositivos finais de mensagens de confirmação.

O protocolo LoRaWAN não faz uso da técnica de *handover* (passagem de um dispositivo móvel da área de atuação de uma estação rádio base para a da outra, com as consequentes negociações entre ambas [24][25]) pois cada estação-base (*gateway*) simplesmente encaminha as mensagens de cada dispositivo que entra na sua área de atuação.

Os dispositivos finais que costumam se movimentar devem enviar periodicamente mensagens para o servidor de rede indicando a sua localização, ou, pelo menos, quando percebem que mudaram de área de atuação de uma estação-base para outra [5].

Nas redes LPWAN, os transceptores dos dispositivos finais encontram-se, em um determinado instante, num de quatro estados possíveis:

- estado de “sono” (*sleep time*)
- estado de transmissão de mensagem (*transmission time*)
- estado de recepção de mensagem (*reception time*) e
- estado de ociosidade (*idle time*)

O estado ou intervalo de tempo de sono (*sleep time*) é aquele em que o dispositivo possui o menor gasto possível de energia e que corresponde a grande parte do tempo de vida dele.

Já o estado ou intervalo de transmissão de mensagem (*transmission time*) é aquele em que o dispositivo tem o maior gasto possível de energia.

Por sua vez, durante o estado ou intervalo de recepção de mensagem (*reception time*), o dispositivo tem um gasto possível de energia alto, porém menor do que o que ocorre durante a transmissão.

Finalmente, o estado ou intervalo de ociosidade (*idle time*) é aquele em que o dispositivo encontra-se “acordado”, mas ocioso, apresentando um gasto de energia pouco maior do que no estado de sono (*sleep time*).

A Figura 6 mostra o relacionamento entre estes quatro estados. Ao longo da sua vida útil, cada dispositivo final fica constantemente alternando entre cada um deles.

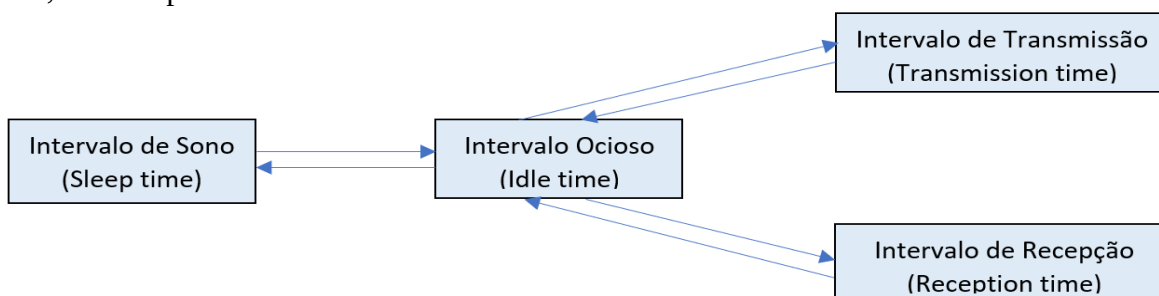


Figura 6. Os diferentes estados de um dispositivo final ao longo da sua vida útil.

Fonte: o autor.

Para atendimento às diversas necessidades de aplicações IoT, o protocolo LoRaWAN oferece três classes de dispositivos finais, conhecidas como Classe A, Classe B e Classe C, cada uma delas apresentando características específicas de atuação.

- Classe A

É a classe de dispositivos que permanecem em estado de sono na maior parte do tempo e só acordam em instantes aleatórios, para o envio de alguma mensagem. Quando há alguma mudança na leitura do sensor, ou alteração no ambiente, imediatamente despertam e enviam uma mensagem para o servidor de rede (*Uplink message*). A seguir, implementam duas janelas de tempo nas quais ficam monitorando a rede, a fim de verificar se há mensagem a receber. Caso haja, permanecem acordados até terminar o seu recebimento. Se não, voltam a dormir. A Figura 7 ilustra este conceito. Os dispositivos pertencentes à Classe A são os que possuem a maior eficiência energética, o que lhes garante a mais longa duração da bateria. Entretanto, esta Classe não pode ser usada em aplicações que requerem do dispositivo final um papel de atuador, em que deve executar alguma ação imediata, pois as mensagens enviadas a ele fora das janelas de recepção serão ignoradas [5].



Figura 7. Comunicação bidirecional entre um dispositivo final LoRaWAN da classe A e uma estação-base.
Fonte: MEKKI *et al.* [5].

- Classe B

Os dispositivos pertencentes a esta classe são programados para, em determinados instantes devidamente configuráveis, abrir janelas de recepção para possíveis mensagens que cheguem até ele (*Downlink messages*), encaminhadas pelo servidor de rede. Para isso, a rede envia periodicamente mensagens de sincronização (*beacon messages*), a fim de que cada dispositivo possa alinhar o seu relógio interno com o da rede. Os dispositivos pertencentes à Classe B apresentam um consumo de energia maior do que os da Classe A.

Além disso, todo dispositivo da classe B deve ser capaz de operar como se fosse da Classe A [5].

- Classe C

Os dispositivos Classe C são aqueles que permanecem acordados o tempo todo, escutando o meio, à espera de mensagens provenientes da rede, e só interrompem este monitoramento nos intervalos de tempo em que estiverem transmitindo mensagens (*Uplink messages*). De todas as três classes, os dispositivos da Classe C são os que têm o maior consumo de energia, como pode ser observado na Figura 8. Todo dispositivo da Classe C também deve ser capaz de operar como se fosse das Classes A ou B [5].

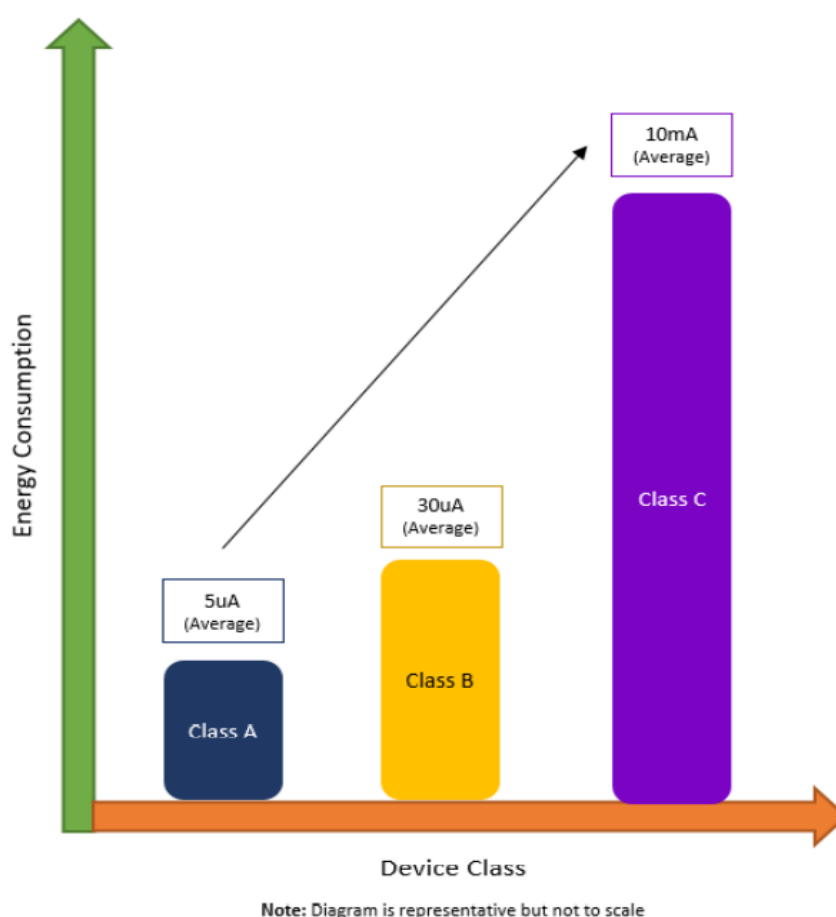


Figura 8. Consumo de Energia por Classe de Dispositivo (diagrama fora de escala).

Fonte: SEMTECH Corporation [26].

A Tabela 2 apresenta, então, um quadro comparativo das principais características das três tecnologias vistas anteriormente, Sigfox, LoRaWAN e NB-IoT. Como pode ser observado, Sigfox e LoRaWAN utilizam frequências Sub-GHz ISM, não licenciadas, enquanto que NB-IoT adota frequências do espectro licenciadas. As três trabalham com baixas taxas de transmissão de dados, pequeno consumo de energia, mensagens de pequeno tamanho (*payload*), alcançam grandes distâncias e usam bandas de frequência de tamanho reduzido.

Tabela 2. Quadro comparativo entre as tecnologias LPWAN Sigfox, LoRaWAN e NB-IoT.

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulação	Binary Shift Keying (BPSK)	Chirp Spread Spectrum (CSS)	Quadrature Binary Shift Keying (QPSK)
Frequência	Bandas ISM não-licenciadas (868 MHz na Europa, 915 MHz nos Estados Unidos da América e 433 MHz na Ásia)	Bandas ISM não-licenciadas (868 MHz na Europa, 915 MHz nos Estados Unidos da América e 433 MHz na Ásia)	Bandas de frequências licenciadas LTE (Ex.: 700 MHz, 800 MHz e 900 MHz)
Largura de Banda	100 Hz	125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz	200 kHz
Taxa de Dados máxima	100 bps	50 kbps	200 kbps
Usa transmissão bidirecional?	Sim, mas de forma limitada / <i>Half-duplex</i>	Sim / <i>Half-duplex</i>	Sim / <i>Half-duplex</i>
Número máximo de mensagens por dia	140 no <i>Uplink</i> e 4 no <i>Downlink</i>	Ilimitado, mas sujeito ao <i>duty cycle</i> local	Ilimitado, mas sujeito ao <i>duty cycle</i> local
Comprimento máximo da carga útil (<i>payload</i>)	12 <i>bytes</i> no <i>Uplink</i> e 8 <i>bytes</i> no <i>Downlink</i>	253 <i>bytes</i> , mas este valor varia de acordo com a região (país)	1.600 <i>bytes</i>
Alcance máximo anunciado pelo fabricante	10 Km, área urbana; 40 Km, em zona rural	5 Km, área urbana; 20 Km, em zona rural	1 Km, área urbana; 10 Km, em zona rural

(Continua)

Tabela 2. Quadro comparativo entre as tecnologias LPWAN Sigfox, LoRaWAN e NB-IoT. (Conclusão)

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Imunidade a interferências	Muito alta	Muito alta	Baixa
Oferece autenticação e criptografia ?	Autenticação, sim	Sim	Não
Oferece taxa de dados adaptativa ?	Não	Sim	Não
Oferece o recurso de handover ?	Os dispositivos finais (end-devices) não se vinculam a uma estação base	Os dispositivos finais (end-devices) não se vinculam a uma estação base	Os dispositivos finais (end-devices) se vinculam a uma estação base
Oferece recurso de localização de dispositivo ?	Sim (Indicação do Nível da Intensidade do Sinal Recebido, RSSI)	Sim (Diferença de tempo entre chegadas, TDOA)	Sim
Permite a criação pelo cliente de redes privadas?	Não	Sim	Não
Organização responsável pela padronização da tecnologia	A companhia Sigfox está colaborando com o Instituto Europeu de Padronização em Telecomunicações (ETSI) na padronização de redes baseadas na tecnologia Sigfox	LoRa Alliance	Third Generation Partnership Project (3GPP)

Fonte: Adaptado de MEKKI *et al.* [5][20].

Com relação a custos, devem ser levados em consideração diferentes aspectos, como, por exemplo, preços dos dispositivos finais, despesas com a implantação da rede, através da aquisição das estações-base, do servidor de rede, dos servidores de aplicação, custo do uso do espectro caso se opte pela utilização de frequências fora das faixas ISM etc. [5].

A Tabela 3 apresenta os custos envolvidos com as tecnologias SigFox, LoRaWAN e NB-IoT. Analisando-se os valores envolvidos, pode-se concluir que a tecnologia LoRaWAN possui os menores custos, seguida da tecnologia Sigfox e, por fim, da tecnologia NB-IoT, que apresenta os maiores valores, entre outros motivos, por utilizar o espectro licenciado, cuja licença de uso envolve despesas superiores a € 500 milhões de euros por MHz [28].

Tabela 3. Alguns custos referentes às tecnologias Sigfox, LoRa e NB-IoT.

	Custo do uso do Espectro	Custo de Implantação	Custo de um Dispositivo Final
Sigfox	0	> 4.000 € / estação-base	< 2 €
LoRa	0	> 100 € / <i>gateway</i> ; > 1.000 € / estação-base	3 a 5 €
NB-IoT	> 500 M€ / MHz	> 15.000 € / estação-base	> 20 €

Fonte: MEKKI *et al.* [5].

A Figura 9 mostra uma comparação entre as três tecnologias analisadas, Sigfox, LoRa e NB-IoT, segundo os principais indicadores de qualidade.

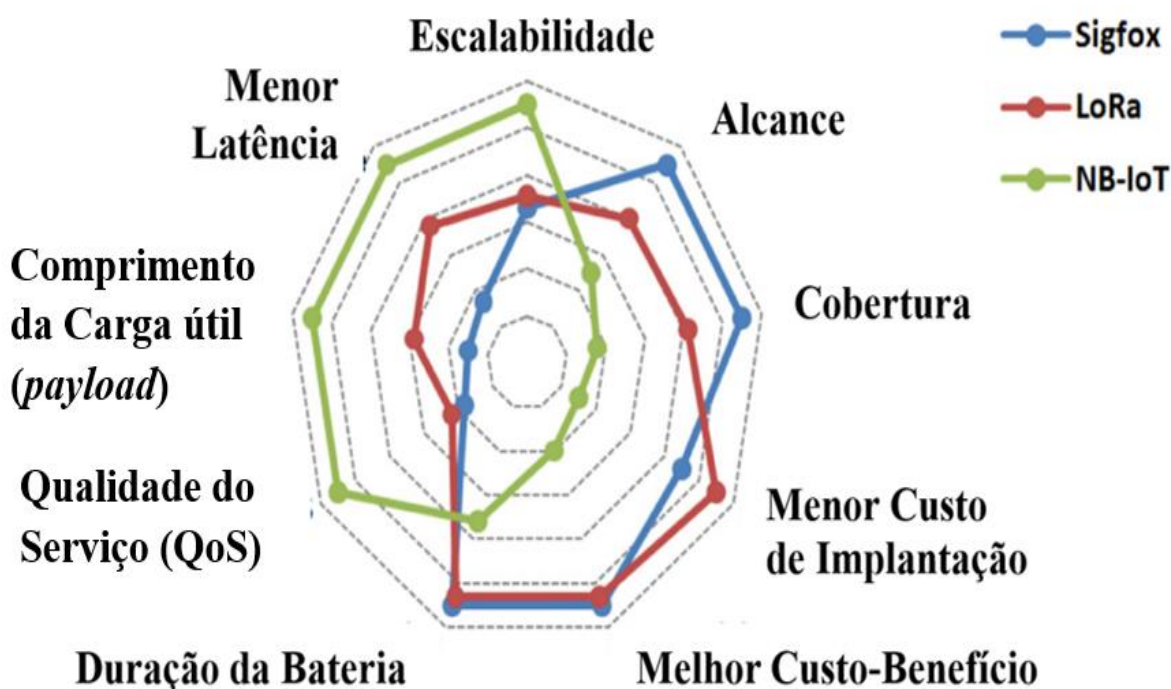


Figura 9. Desempenho das tecnologias Sigfox, LoRa e NB-IoT segundo alguns dos mais importantes indicadores de qualidade.

Fonte: Adaptado de MEKKI *et al.* [5].

2.4 Vantagens das tecnologias LoRa e LoRaWAN

Conforme visto anteriormente, as tecnologias LoRa e LoRaWAN são duas das mais destacadas soluções oferecidas, atualmente, no contexto da Internet das Coisas, quando se considera as redes de baixo consumo e longo alcance (LPWAN).

A sigla *LoRa*, abreviação das palavras inglesas *Long* e *Range*, em referência às transmissões de dados de longas distâncias que esta tecnologia oferece, representa uma técnica de modulação de radiofrequência utilizada nas redes LPWAN [8].

A palavra *LoRaWAN*, por sua vez, dá nome ao protocolo aberto lançado pela organização LoRa Alliance, com o objetivo de ser integrado às redes LPWAN desta tecnologia, para a conexão de dispositivos finais de baixo consumo de energia, autônomos, alimentados por baterias de longa duração, e normalmente separados por grandes distâncias.

Alguns dos benefícios que estas tecnologias apresentam são:

- Longo alcance

Os dispositivos podem alcançar distâncias teóricas de até 5 km em áreas urbanas e 20 km em zonas rurais. Além disso, há a possibilidade de se obter grande cobertura interna, em edificações com muitos andares.

- Grande duração da bateria

Devido ao baixo consumo médio de energia dos dispositivos, as baterias podem ter uma duração prevista de até 10 anos.

- Alta capacidade

Cada *gateway* ou estação-base, dependendo do modelo, pode vir a encaminhar centenas ou milhares de mensagens diariamente.

- Redes públicas ou privadas

Um dos grandes diferenciais desta tecnologia em relação às concorrentes é a possibilidade de, além de dispor dos serviços oferecidos pelas redes LoRaWAN públicas, o usuário pode montar, configurar e usar a sua própria rede, sem ter que incorrer em custos recorrentes, como pagamento de mensalidades, *royalties* etc.

- Baixos custos

Custos reduzidos na aquisição de dispositivos, infraestrutura mínima necessária e *software* aberto.

- Geolocalização

Normalmente utilizada em ambientes externos (*outdoor*), embora teoricamente possa ser também empregada em cenários internos (*indoor*), não necessariamente baseada em GPS pois, através de processos de triangulação entre três repetidoras (*gateways*), é possível estimar a localização de um dispositivo final.

- Atualizações remotas

Possibilidade de atualizações remotas, tanto para aplicações, quanto para a pilha de protocolos LoRaWAN, através do processo conhecido como *FUOTA*, *Firmware Updating Over The Air*.

- *Roaming*

Os dispositivos móveis podem ser localizados, de forma transparente, mesmo que se desloquem entre áreas de cobertura.

- Segurança e criptografia

Há procedimentos para a autenticação de dispositivos e mensagens, por meio da adoção de identificadores únicos, além da existência de dois níveis de criptografia,

sendo um deles destinado a comandos de rede e o outro a dados de aplicações através da utilização do padrão AES-128.

2.5 Comunicações por Espalhamento Espectral

Um sinal transmitido é considerado um sistema em espalhamento espectral (*Spread Spectrum System*, SSS) se ocupar uma largura de banda de frequências maior do que a mínima necessária para a transmissão da informação e a expansão dessa largura de banda for obtida com o uso de um código independente da informação, condição esta que exclui os sistemas de Frequência Modulada, nos quais a ampliação depende do sinal a transmitir [30]. Este espalhamento espectral, realizado desde os anos 1.940, é feito devido a vários motivos, tais como proteção contra monitoramentos indesejados, intenção de aumentar a resistência do sinal a interferências naturais, ruídos, limitação da densidade de fluxo de potência (como em comunicações por satélite) etc. [31] [70].

2.5.1 O Teorema Shannon-Hartley

Na teoria da informação, o Teorema de Shannon-Hartley enuncia que [31]:

$$C = B \log_2 \left[1 + \left(\frac{S}{N} \right) \right] \text{ bits / s} \quad (1)$$

em que:

C = capacidade do canal, representando o limite teórico máximo da taxa de transmissão de informação em bits por segundo. Esta grandeza indica o número máximo de bits que poderiam ser transmitidos por segundo com uma probabilidade de erro arbitrariamente próxima de zero;

B = largura de banda do canal em Hz;

S = potência média do sinal recebido, em watts;

N = potência média do ruído presente no canal, em watts.

Levando-se em conta que, na prática, normalmente tem-se $\left(\frac{S}{N} \right) \ll 1$ [32], a expressão (1) resultará em:

(2)

$$\ln \left[1 + \left(\frac{S}{N} \right) \right] \cong \frac{S}{N} \quad , \quad \text{para } \left(\frac{S}{N} \right) \ll 1$$

cujo desenvolvimento encontra-se detalhado no Anexo A.

Observando-se que $\frac{1}{\ln 2} \cong 1,443$ e substituindo-se o resultado dado por (2) na expressão (1), obter-se-á:

$$\frac{C}{B} \cong 1,443 \cdot \left(\frac{S}{N} \right) \quad \Leftrightarrow \quad \boxed{C \cong 1,443 \cdot \left(\frac{S}{N} \right) \cdot B} \quad (3)$$

A expressão (3) mostra que a largura de banda do canal (B) e a relação sinal/ruído (S/N) são os fatores que limitam a taxa máxima de comunicação do sistema. No entanto, num canal que tenha uma relação sinal/ruído fixa, para aumentar-se a taxa de transmissão do sinal a ser transmitido que esteja livre de erros, a capacidade do canal deve ser ampliada. Para isto, basta que a largura de banda (B) cresça, como ocorre nas técnicas de espalhamento de espectro, nas quais a ideia central é que o sinal a ser transmitido ocupe uma largura de banda de frequências maior do que precisaria mantendo a mesma potência de transmissão. Logo, aumentando-se a largura de banda, a taxa de transmissão também cresce [70].

2.5.2 Tipos de Espalhamento Espectral

Há quatro tipos básicos de espalhamento espectral de frequências e formas híbridas entre eles:

- Espalhamento Espectral por Saltos em Frequência (*Frequency-Hopping Spread Spectrum, FHSS*)

Trata-se de um método de transmissão de sinais pelo qual a frequência da onda portadora muda frequentemente para outro valor pertencente a um conjunto de frequências que ocupam uma larga faixa espectral. Estas mudanças são controladas por um código (sequência) previamente conhecido pelos sistemas transmissor e receptor.

Na prática, a banda de frequências disponível é dividida em várias sub-bandas e a frequência da portadora modulada pelo sinal a ser transmitido passa a assumir os valores centrais destas sub-bandas segundo uma ordem conhecida apenas pelo transmissor e receptor. Caso haja interferências em uma determinada região do espectro, elas só irão afetar o sinal enquanto ele estiver ocupando a respectiva sub-banda.

- Espalhamento Espectral por Sequência Direta (*Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS*)

Na técnica DSSS, o sinal de dados a ser transmitido é multiplicado por uma sequência pré-determinada de bits que possui uma taxa mais elevada, também conhecida como *sequência de chips* ou *código de espalhamento*, produzindo um sinal resultante que tem componentes de frequências maiores do que as do sinal original, significando que a sua largura de banda inicial foi ampliada. A seguir, este sinal resultante modula a fase da onda portadora, que é, então, transmitida, como ilustrado na Figura 10.

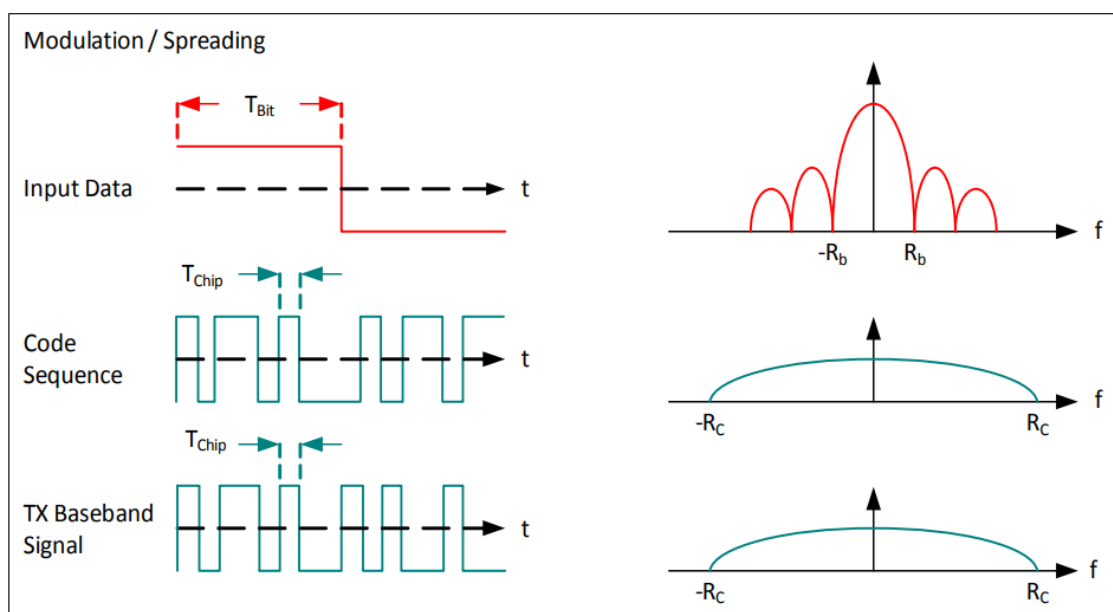


Figura 10. Multiplicação de um sinal por uma sequência específica de bits (*code sequence*) – Modulação / Espalhamento em frequência.

Fonte: SEMTECH Corporation [32].

A intensidade do espalhamento é dependente da razão “chips por bits”, quociente entre a taxa da sequência chip (*code sequence*) pela taxa de dados desejada (dados de entrada), normalmente expressa em dB e simbolizada por G_p :

$$G_P = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{R_c}{R_b} \right) \text{ dB} \quad (4)$$

na qual:

R_c taxa de chips por unidade de tempo (chips / segundo)

R_b taxa de bits por unidade de tempo (bits / segundo)

O Ganho de Processamento (G_P), dado pela expressão (4), permite que o receptor recupere corretamente o sinal de dados transmitido, mesmo nas situações em que a relação Sinal / Ruído do canal tenha um valor negativo.

No receptor, o sinal que chega é multiplicado pela mesma *sequência de chips*, ou *código de espalhamento*, que foi utilizada no transmissor, resultando em uma réplica do sinal de dados original, como pode ser visto na Figura 11.

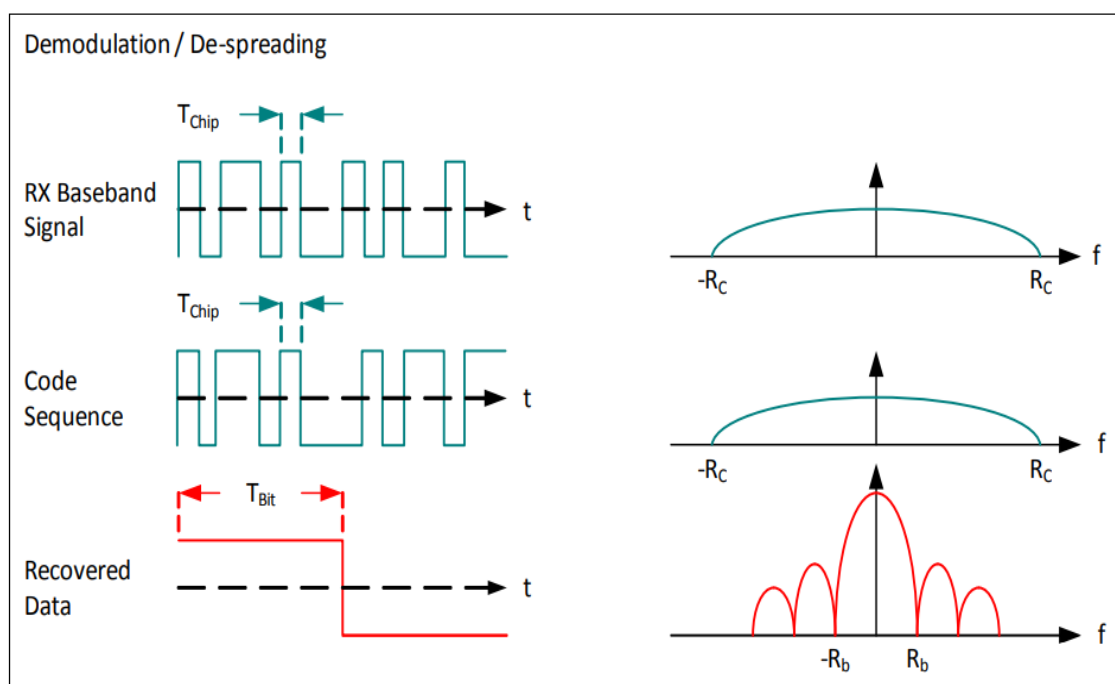


Figura 11. Multiplicação do sinal recebido por uma sequência específica de bits (*code sequence*) – Demodulação / concentração de frequências.

Fonte: SEMTECH Corporation [32].

Esta técnica é utilizada nas redes locais sem fio Wi-Fi 802.11b, 802.11g, 802.11n e na telefonia móvel de terceira geração W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*).

Entretanto, uma das desvantagens dos sistemas DSSS é que eles exigem uma sincronização muito rígida entre o transmissor e o receptor, o que implica na necessidade de se usar circuitos altamente precisos e, portanto, caros [10].

- Espalhamento Espectral por Saltos no Tempo (*Time-Hopping Spread Spectrum, THSS*)

Neste tipo de técnica, grupos de bits são transmitidos de forma intermitente em um ou mais intervalos de tempo (*time slots*), dentro de um quadro (*frame*) contendo um número elevado de intervalos. A escolha dos intervalos de tempo a serem ocupados em cada quadro segue uma sequência pseudoaleatória. Normalmente tal técnica não é utilizada sozinha, mas, sim, associada a alguma outra.

O salto no tempo (THSS) não é, estritamente falando, uma técnica de espalhamento espectral, o qual ocorre devido a outros fatores associados, como quando se usa pulsos de curta duração e grande ocupação no espectro de frequências, ou em associações híbridas do tipo TH-FHSS.

- Espalhamento Espectral *Chirp* (*Compressed High Intensity Radar Pulse Spread Spectrum, CSS*)

Na área de radiocomunicações, o *espalhamento espectral chirp* ocorre quando o sinal a ser transmitido passa a ocupar uma largura de banda de frequências maior do que aquela que normalmente possui, e a frequência da portadora varia continuamente e linearmente durante certos intervalos de tempo, entre um valor mínimo e um máximo. Quando a frequência desta cresce, tem-se um “*up chirp*” e, quando diminui continuamente, obtém-se um “*down chirp*”, como esboçado na Figura 12. Nesta figura, pode-se observar que, em uma excursão *up-chirp*, a frequência da portadora cresce linearmente ao longo do tempo, desde uma frequência mínima (f_2) até uma máxima (f_1). Já num movimento *down-chirp*, ocorre o contrário, com a frequência da portadora variando do valor máximo (f_1) para o mínimo (f_2).

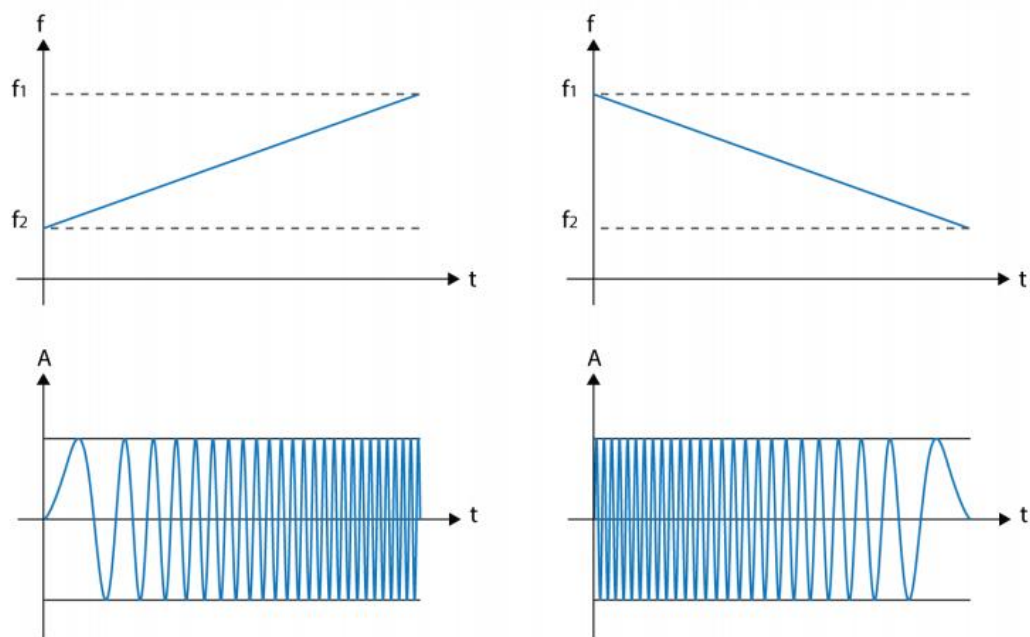


Figura 12. Variações contínuas crescentes (*up-chirp*) e decrescentes (*down-chirp*) na frequência de uma onda portadora ao longo do tempo.

Fonte: RUANO [4], ZHANG *et al.* [31].

O *Espalhamento Espectral Chirp* foi inicialmente desenvolvido para aplicações de radar, por volta de 1940, sendo tradicionalmente utilizado em comunicações militares, nas quais se requer um alto grau de segurança. Entretanto, nos últimos vinte e cinco anos esta técnica de modulação tem sido empregada, crescentemente, em aplicações de transmissão de dados, devido às suas características de baixo consumo de energia, longo alcance e robustez quanto à degradação do canal devido a multicaminhos, desvanecimento, efeito Doppler e interferências obstrutivas intrabanda [32].

2.6. Visão detalhada da tecnologia LoRa

Nesta técnica, como já mencionado, a variação linear ascendente ou descendente da frequência da onda portadora é chamada de *chirp*. O sinal de dados é transmitido através de excursões ascendentes seguidas de determinados saltos em frequência, como ilustrado na Figura 13, que mostra à esquerda o comportamento da portadora sem modulação (quatro chirps básicos, não modulados) e, à direita, o seu aspecto quando modulada (um *chirp* não modulado seguido de três modulados).

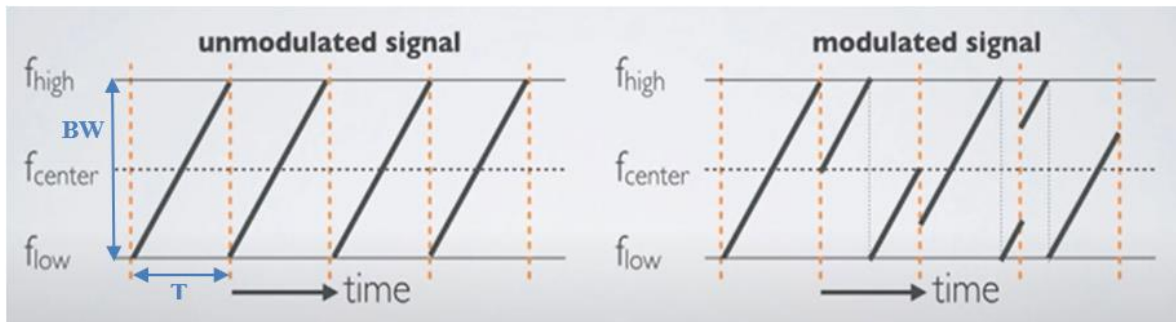


Figura 13. Variações da frequência da Portadora sem e com modulação.

Fonte: LIE [36].

Um *chirp* linear não modulado é chamado de “chirp base” e pode ser matematicamente descrito em função do tempo de uma forma bastante simplificada através da expressão [33]:

$$x(t) = e^{j\theta(t)} = e^{j\left\{2\pi\left[\frac{BW}{2T}t^2 + \left(f_0 - \frac{BW}{2}\right)t\right] + \theta_0\right\}} \quad (5)$$

na qual:

j número imaginário ($j = \sqrt{(-1)}$)

$\theta(t)$ expressão do ângulo fasor (vetor circulante) do sinal no instante t

θ_0 fase inicial

BW largura de banda

T duração do *chirp* (ou duração de um Símbolo, T_s , como será detalhado mais adiante)

f_0 frequência central da portadora ($= f_{center}$, na Figura 13).

Na expressão (5), tem-se:

$$\theta(t) = 2\pi \left[\frac{BW}{2T} t^2 + \left(f_o - \frac{BW}{2} \right) t \right] + \theta_o \quad (5)$$

A derivada primeira da expressão (5) em relação ao tempo resultará na frequência angular $\omega(t)$:

$$\omega(t) = \frac{d[\theta(t)]}{dt} = 2\pi \left[\frac{BW}{T} t + \left(f_o - \frac{BW}{2} \right) \right] \quad (6)$$

Substituindo-se a definição $\omega(t) = 2\pi f(t)$ na expressão (6), obter-se-á:

$$\begin{aligned} \omega(t) &= 2\pi f(t) = 2\pi \left[\frac{BW}{T} t + \left(f_o - \frac{BW}{2} \right) \right] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow f(t) &= \frac{BW}{T} t + \left(f_o - \frac{BW}{2} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

cujo gráfico tem o esboço dado pela Figura 14:

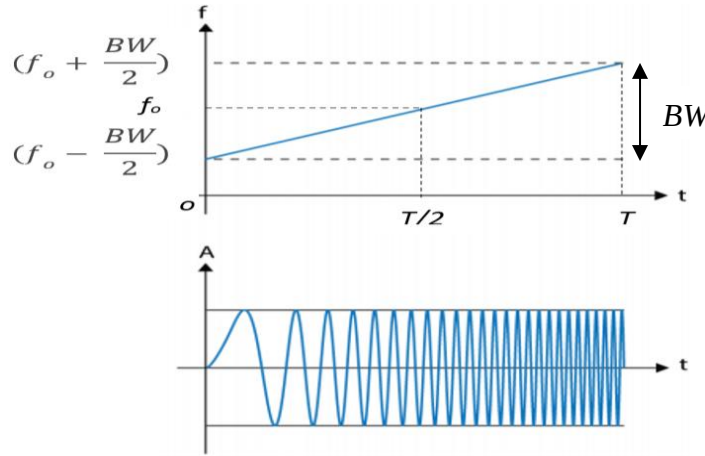


Figura 14. Variações da frequência da Portadora em torno da frequência central f_o .

Fonte: adaptado de RUANO [4] e ZHANG *et al.* [31].

A frequência da portadora, na expressão (7), varia, então, linearmente com o tempo, desde $\left(f_o - \frac{BW}{2} \right)$ até $\left(f_o + \frac{BW}{2} \right)$, ao longo da largura de banda BW e da duração T do *chirp*.

2.6.1 Parâmetros da Modulação LoRa

- Fator de Espalhamento (*Spreading Factor*, SF)

Na tecnologia LoRa, o *Fator de Espalhamento* (*Spreading Factor*, SF) é um inteiro que pode assumir valores inteiros de 7 a 12, conferindo maior ou menor robustez à transmissão do sinal em relação às ocorrências de ruído e desvanecimento [34]. Assim, a modulação LoRa possui seis diferentes fatores de espalhamento (SF7 = 7, SF8 = 8, ..., SF12 = 12). Quanto mais alto o valor, maior será a sensibilidade do receptor para demodular sem erros o sinal recebido, permitindo que o transmissor esteja mais distante dele. No entanto, à medida em que o Fator de Espalhamento é aumentado, as taxas de transmissão de dados diminuem e os intervalos de tempo gastos para o envio de cada mensagem (*Time On Air*, TOA, também chamado de *dwell time*) crescem, assim como o consumo de energia. A Figura 15 mostra a relação entre distâncias, valores de Fator de Espalhamento e taxas de transmissão entre um dispositivo final e um retransmissor (*gateway*).

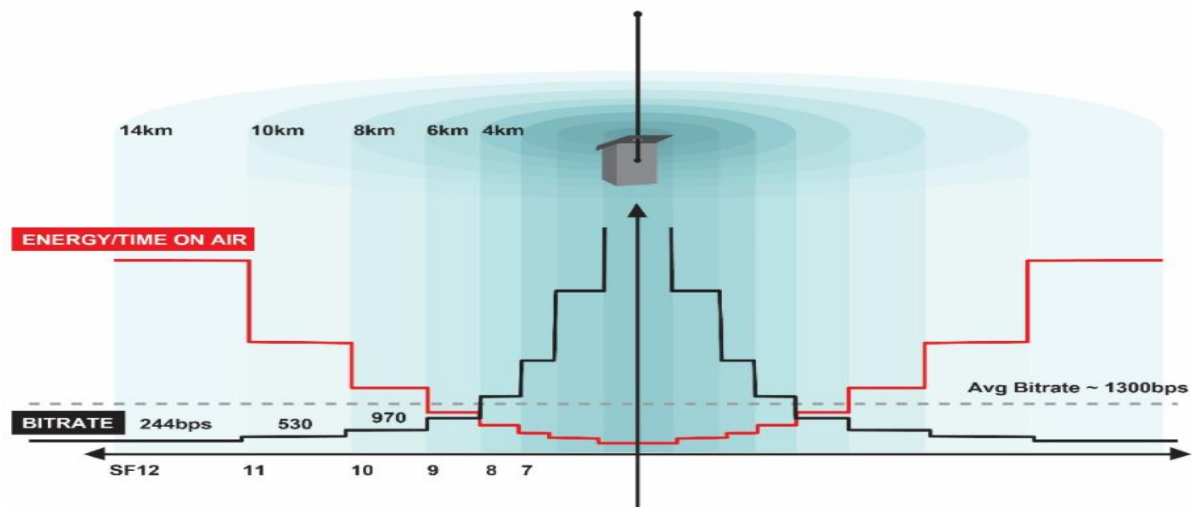


Figura 15. Relação entre distâncias, valores de Fator de Espalhamento e taxas de transmissão entre um dispositivo final e um retransmissor (*gateway*).

Fonte: SEMTECH Corporation [37].

Um *Símbolo* representa um ou mais bits de dados. O número de bits utilizado em um *Símbolo* é precisamente o valor do *Fator de Espalhamento* (SF) adotado. Cada *Símbolo* possui 2^{SF} valores, também chamados de *Chips*. Um *Chip* traduz-se como uma forma particular de excursão da frequência da portadora. Se, por exemplo, em uma transmissão LoRa cada *Símbolo* é representado por 7 bits (SF = 7), então haveria $2^{SF} = 2^7 = 128$ *Chips* possíveis, como ilustrado de forma bastante simplificada na Figura 16, na qual é mostrado

um *Chip* que representaria o *Símbolo* dado pela sequência binária 1011111 (= 95 em decimal). Já um *Chirp* significa a excursão da frequência da portadora de forma ascendente, de uma frequência menor para uma maior (*up-chirp*), ou descendente, de uma frequência mais elevada para uma menos elevada (*down-chirp*). A Figura 16 apresenta uma ilustração dos conceitos de *Símbolo*, *Chip* e *Chirp*.

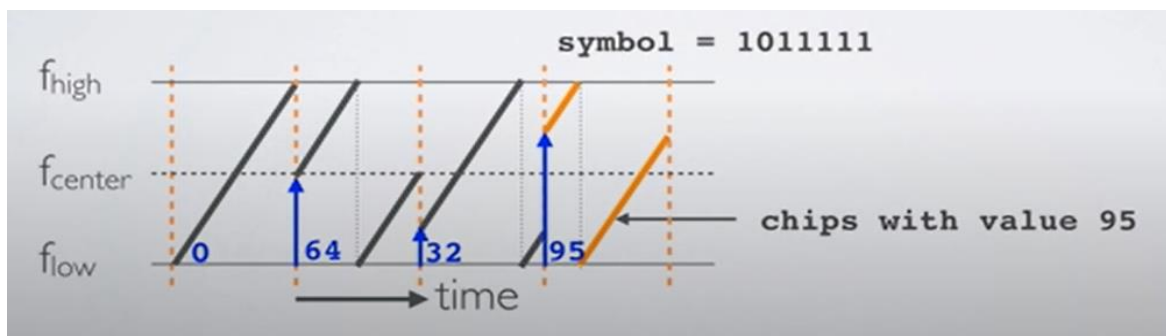


Figura 16. Exemplo simplificado dos conceitos de *Símbolo*, *Chip* e *Chirp*.

Fonte: LIE [36].

- Largura de Banda (Bandwidth, BW)

A tecnologia LoRa trabalha com várias larguras de banda, sendo as mais comuns as de 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz. Se deseja-se transmitir dados a taxas elevadas, então a largura de banda indicada seria a de 500 kHz, ao passo que, se o objetivo é chegar a grandes distâncias, o valor de 125 kHz deveria ser escolhido. Quanto menor for a largura de banda, maior será a sensibilidade do receptor, mas o intervalo de tempo para a transmissão da mensagem (*Time On Air*, TOA) aumentará, o que significará maior gasto de bateria do dispositivo. As características da modulação LoRa variam de acordo com a região, sendo definidas pela organização LoRa Alliance. Nos Estados Unidos da América, por exemplo, são utilizados 64 canais de 125 kHz e 8 de 500 kHz para mensagens de *Uplink*, assim como 8 canais de 500 kHz para mensagens de *Downlink*, conforme ilustrado na Figura 17.

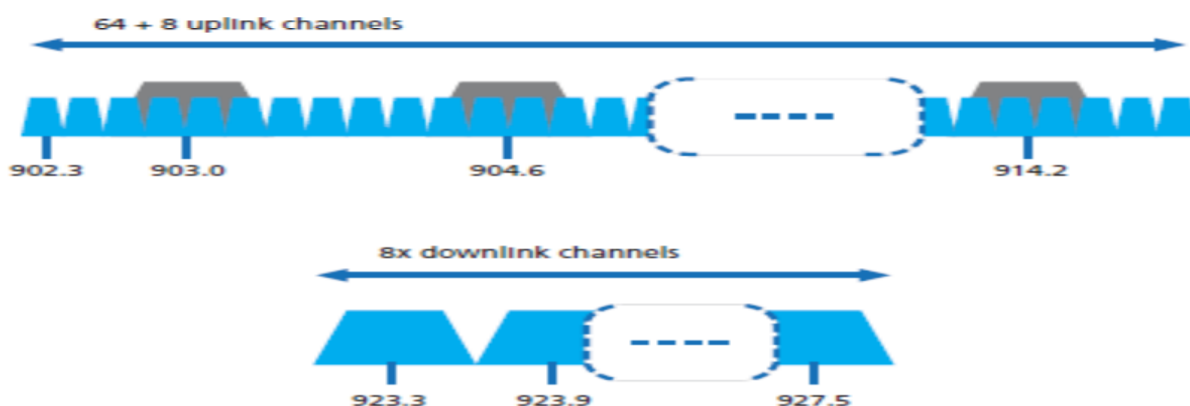


Figura 17. Distribuição de canais de frequência nos Estados Unidos da América.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

A Tabela 4 mostra diferentes dados de uma modulação LoRa que poderiam ser utilizados na transmissão de mensagens de um dispositivo final para a rede LoRa (*Uplink messages*) ou desta para o dispositivo final (*Downlink messages*) em um canal que utiliza uma largura de banda de 125 kHz ou 500 kHz. Como pode ser observado, Fatores de Espalhamento com valores mais elevados estão relacionados a taxas de transmissão menores, maiores distâncias entre o transmissor e receptor, intervalos de tempo mais longos para transmissão de cada mensagem (*Time On Air, TOA*, ou *dwell time*) e tamanhos de mensagens mais reduzidos (*payloads*).

Tabela 4. Características de uma modulação LoRa.

Sigla da Taxa de Dados (DR)	Fator de Espalhamento (SF)	Largura de Banda (BW)	Sentido do envio da Mensagem (<i>Uplink</i> ou <i>Downlink</i>)	Taxa de Dados (bits por segundo)	Tamanho máximo da mensagem (<i>payload</i>) em bytes
0	SF10	125 kHz	<i>Uplink</i>	980	11
1	SF9	125 kHz	<i>Uplink</i>	1.760	53
2	SF8	125 kHz	<i>Uplink</i>	3.125	125
3	SF7	125 kHz	<i>Uplink</i>	5.470	242
4	SF8	500 kHz	<i>Uplink</i>	12.500	242
5 - 7	-	-	-	-	
8	SF12	500 kHz	<i>Downlink</i>	980	53
9	SF11	500 kHz	<i>Downlink</i>	1.760	129
10	SF10	500 kHz	<i>Downlink</i>	3.125	242
11	SF9	500 kHz	<i>Downlink</i>	5.470	242
12	SF8	500 kHz	<i>Downlink</i>	12.500	242
13	SF8	500 kHz	<i>Downlink</i>	21.900	242

Fonte: SEMTECH [10].

- Taxa de Codificação (*Coding Rate, CR*)

A *Taxa de Codificação* corresponde a uma fração na qual o numerador representa um número de bits de dados e o denominador é igual a este valor acrescido de uma quantidade de bits de redundância, que pode assumir os valores 1, 2, 3 ou 4 [32]. Deste modo, a *Taxa de Codificação* é uma fração igual a $4/5$, ou $4/6$, ou $4/7$, ou $4/8$, significando que, para cada 4 bits de dados a serem transmitidos, serão acrescidos 1, 2, 3 ou 4 bits de redundância, respectivamente, para a implementação do sistema de identificação e correção de erros *Forward Correction Error (FEC)*. Neste caso, quanto maior for o número de bits

de redundância acrescentados aos bits de dados, maior será o tempo gasto para a transmissão de cada mensagem (*Time On Air, TOA*).

- Taxa Nominal de Bits do sinal de dados (R_b)

Define-se como *Taxa Nominal de Bits do sinal de dados*, simbolizada por R_b , a expressão:

$$R_b = SF \cdot \left[\frac{4}{\left(\frac{4+R}{2^{SF}} \right)} \right] \quad (8)$$

na qual, tem -se:

SF = Fator de Espalhamento (pode assumir os valores 7, 8, 9, 10, 11 ou 12);

R = Número de bits de redundância (valores possíveis: 1, 2, 3 ou 4);

BW = Largura de Banda;

Observando- se que o quociente $\left(\frac{4}{4+R} \right)$ é a *Taxa de Codificação*, a expressão (8) resultará em:

$$R_b = SF \cdot \left(\frac{\text{Taxa de Codificação}}{\frac{2^{SF}}{BW}} \right) \quad (9)$$

na qual, tem -se:

$$\text{Taxa de Codificação} = \frac{4}{4 + R} \quad (10)$$

com o número de bits de redundância (R) podendo assumir, como visto, os valores 1, 2, 3 ou 4.

Através das expressões (9) e (10), verifica-se que, uma vez, escolhidas a *Taxa de Codificação (CR)* e a *Largura de Banda (BW)*, quanto maior for valor do *Fator de Espalhamento (SF)*, menor será a *Taxa Nominal de Bits do sinal de dados (R_b)*, pois o quociente $\left(\frac{SF}{2^{SF}} \right)$ diminui com o crescimento de SF. Por outro lado, isto proporcionará um

aumento da sensibilidade do receptor, facilitando o trabalho do receptor, que terá mais tempo para realizar a demodulação do sinal recebido, o que levará a um maior gasto de energia.

Assim, quando o receptor encontra-se próximo do transmissor, a taxa de transmissão de dados LoRa é mais elevada, o tempo de transmissão (TOA) e o Fator de Espalhamento (SF) assumem valores menores e a sensibilidade do dispositivo é baixa.

Quando o receptor encontra-se distante do transmissor, a taxa de transmissão de dados LoRa é menor, o tempo de transmissão (TOA) e o Fator de Espalhamento (SF) assumem valores maiores e a sensibilidade do dispositivo torna-se alta.

A Figura 18 mostra a relação entre o *Fator de Espalhamento (SF)* e a *Largura de Banda (BW)*. Verifica-se que, quanto menor for a *Largura de Banda*, maior será a duração de um *Símbolo*, significando que a taxa de transmissão de dados diminuirá, e, consequentemente, o intervalo de tempo para o envio de cada mensagem (*Time On Air*) crescerá. A duração de um *Símbolo* aumenta com o *Fator de Espalhamento*. Isso é um dos elementos que fazem com que o valor de SF reduza a taxa de transmissão.

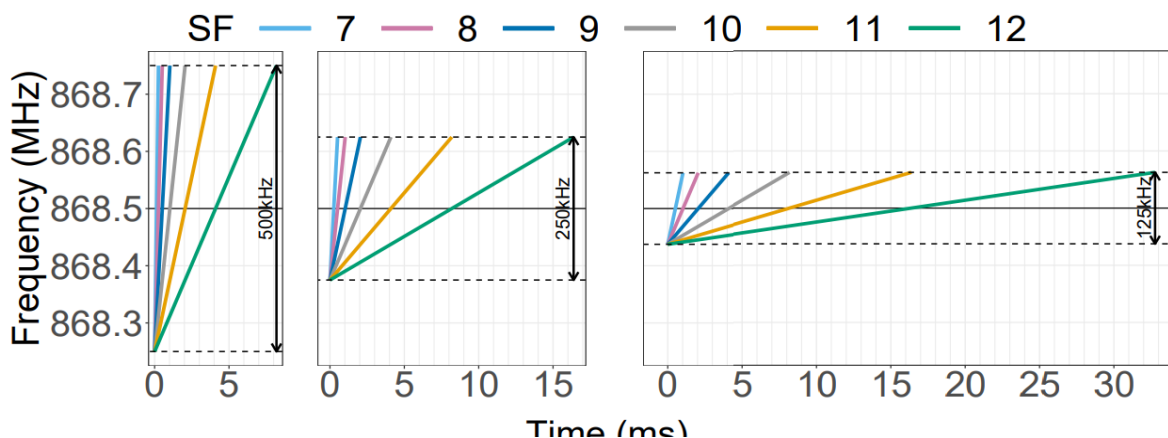


Figura 18. Relação entre a Largura de Banda (BW) e o Fator de Espalhamento (SF).

Fonte: COUTAUD *et al.* [38].

2.6.2 Colisão e Ortogonalidade entre Sinais

Na tecnologia LoRa, mensagens de dados que utilizam *Fatores de Espalhamento* diferentes são, em princípio, ortogonais entre si, o que significa que elas são, até certo ponto, “invisíveis” uma para as outras, comportando-se como se fossem ruídos para as demais.

Assim, duas mensagens diferentes que chegam ao mesmo tempo em um receptor, no mesmo canal de frequência, mas cada uma usando um *Fator de Espalhamento* distinto, não colidirão, sendo demoduladas normalmente. Por outro lado, se, neste caso, o *Fator de Espalhamento* de ambas for o mesmo, haverá colisão, mas, caso um dos sinais seja 6 dB mais forte do que o outro, ele sobreviverá, sendo, também, demodulado [10].

Entretanto, a ortogonalidade entre *Fatores de Espalhamento* possui algumas exceções [39]. Conceitualmente, a propriedade da ortogonalidade pode ser vista da seguinte forma: diferentes *Fatores de Espalhamento* dão origem a variações *chirp* distintas, ou seja, a diferentes padrões de mudança da frequência da onda portadora ao longo do tempo. Como no *Espalhamento Espectral Chirp (CSS)* estas variações são lineares, quando plotadas em um gráfico frequência versus tempo, representarão retas como as representadas na Figura 18. Assim, teoricamente, diferentes *Fatores de Espalhamento* darão origem a inclinações distintas, provendo a propriedade da ortogonalidade. No entanto, nem todas as combinações dos parâmetros LoRa *Largura de Banda (BW)* e *Fator de Espalhamento (SF)* são ortogonais pois algumas podem resultar em inclinações (coeficientes angulares) idênticas da reta *chirp*. Na Figura 19, a inclinação da variação *chirp* pode ser calculada como mostrado em seguida:

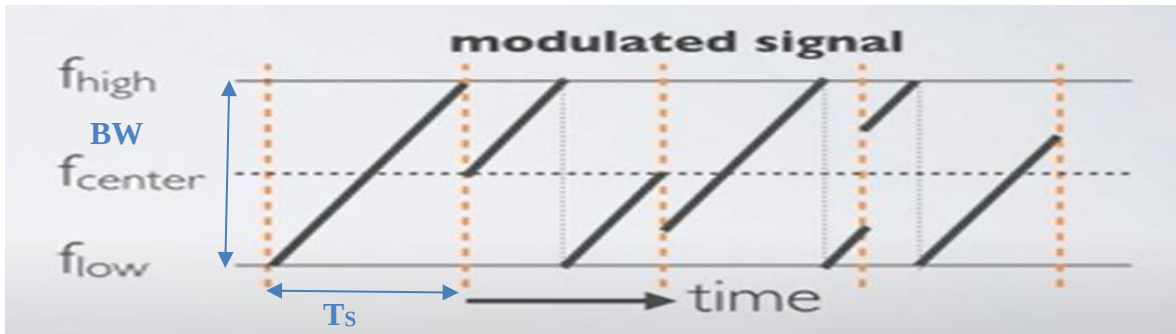


Figura 19. Largura de Banda (BW) e duração de um Símbolo (T_s).

Fonte: LIE [36].

$$inclinação = coeficiente angular = \frac{f_{high} - f_{low}}{T_s} = \frac{BW}{T_s} \quad (11)$$

- Período de um Símbolo (T_s)

Na tecnologia LoRa, o *período de um Símbolo*, representado por T_s , é o intervalo de tempo gasto pela variação completa de frequência de um *chip* do Símbolo (confor (12) mostrado na Figura 19) e é definido como:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW}$$

na qual:

SF = Fator de Espalhamento do sinal LoRA(valores: 7, 8, 9, 10, 11 ou 12);

BW = Largura de Banda;

Substituindo-se em (11) a expressão de T_s dada por (12), obter-se-á:

$$inclinação = coeficiente angular = \frac{BW}{T_s} = \frac{BW}{\frac{2^{SF}}{BW}} = \frac{(BW)^2}{2^{SF}} \quad (13)$$

A expressão (13) mostra que é possível existir mais de uma combinação (SF ; BW) que resulte na mesma inclinação da reta *chirp*. De fato, por exemplo, os pares de parâmetros (SF7 ; BW125 kHz), (SF9 ; BW250 kHz) e (SF11 ; BW500 kHz) resultam no mesmo coeficiente angular (inclinação da reta *chirp*):

$$\begin{aligned} inclinação = coeficiente angular &= \frac{(BW)^2}{2^{SF}} = \\ &= \frac{(125.000)^2}{2^7} = \frac{(250.000)^2}{2^9} = \frac{(500.000)^2}{2^{11}} \cong 122.070,31 \end{aligned}$$

Portanto, dois ou mais sinais que possuam estes valores de parâmetros não serão ortogonais entre si e, se chegarem a um receptor ao mesmo tempo, usando o mesmo canal de frequência, colidirão, apesar de possuírem *Fatores de Espalhamento (SF)* e *Larguras de Banda (BW)* completamente diferentes.

A Tabela 5 apresenta todas as combinações dos parâmetros LoRa *Fator de Espalhamento (SF)* e *Largura de Banda (BW)*, para os valores desta de 125 KHz, 250 kHz e 500 kHz. As posições da tabela onde há um caracter “X” correspondem àquelas combinações de parâmetros de sinais que não são ortogonais, os quais, se utilizados, poderão gerar colisões entre eles.

Tabela 5. Combinações de *Fator de Espalhamento (SF)* e *Largura de Banda (BW)*. As posições com “X” correspondem a sinais não-ortogonais entre si.

SF		7	8	9	10	11	12	7	8	9	10	11	12	7	8	9	10	11	12
	BW	125	125	125	125	125	125	250	250	250	250	250	250	500	500	500	500	500	500
7	125	x								x								x	
8	125		x								x								x
9	125			x								x							
10	125				x								x						
11	125					x													
12	125						x												
7	250							x								x			
8	250								x								x		
9	250	x								x								x	
10	250		x								x								x
11	250			x								x							
12	250				x								x						
7	500													x					
8	500														x				
9	500							x								x			
10	500								x								x		
11	500	x								x								x	
12	500		x								x								x

Fonte: Science Direct Journals & Books [39].

2.6.3 Representação de um sinal LoRa modulado em um gráfico de Frequência versus Tempo

A Figura 20 apresenta os espectrogramas de três sinais LoRa modulados, através de um gráfico de frequência versus tempo, sendo o primeiro um esboço teórico e os outros dois reais. Como pode ser notado, o sinal transmitido caracteriza-se por apresentar inicialmente de 6 a 10 *up-chirps* como preâmbulo, cujo número exato depende da região considerada, seguidos de 2 a 2,25 *down-chirps* para sincronização e, por fim, vêm os *Símbolos* que compõem a mensagem.

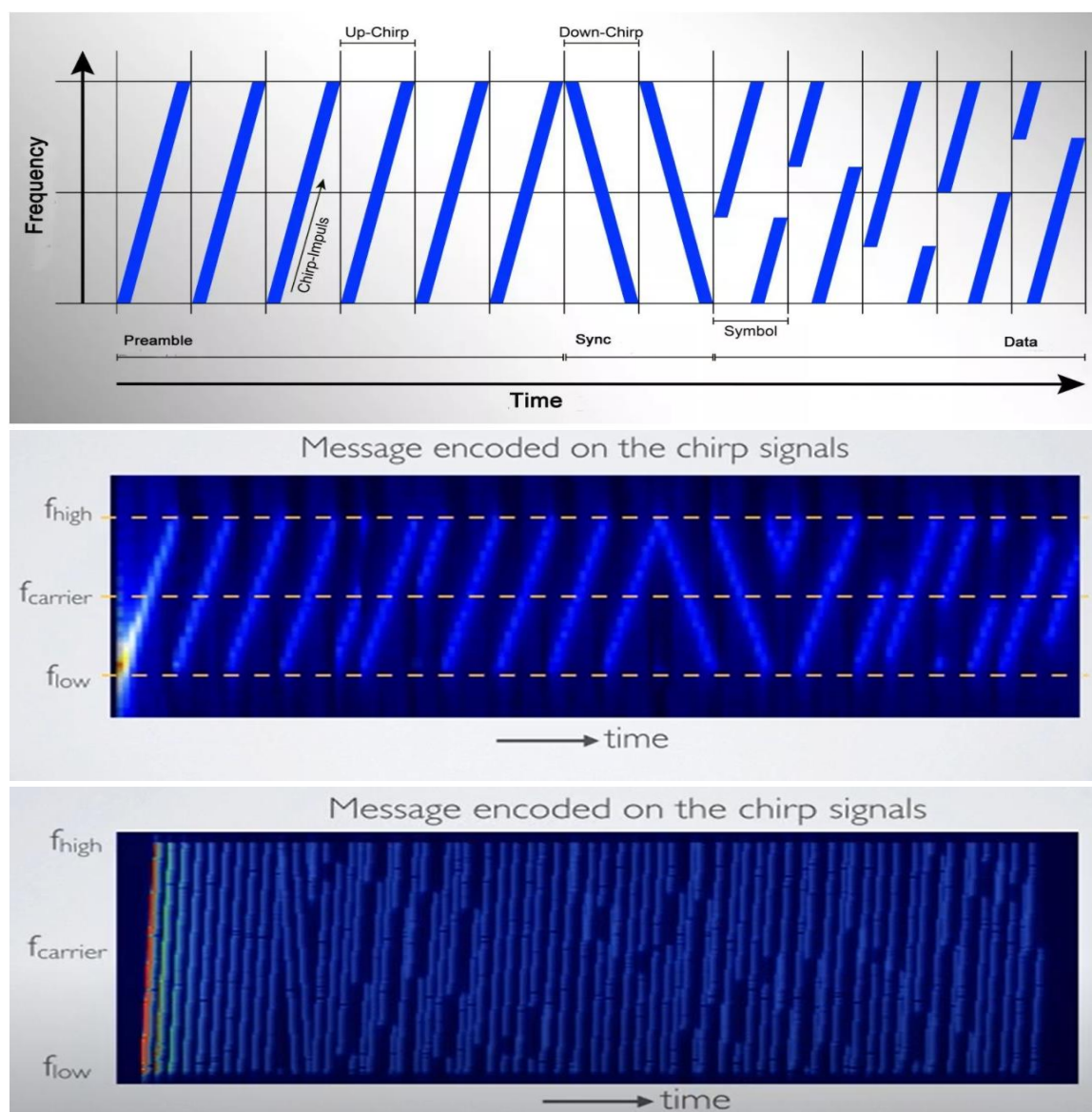


Figura 20. Espectrogramas de sinais LoRa modulados.

Fontes: MOKO SMART (primeiro espectrograma) [40] e LIE (os demais) [36].

2.7 Caracterização de uma rede LoRaWAN

Enquanto o termo LoRa se refere à camada física (também simbolizada pela sigla PHY), responsável pela técnica de modulação sem fio que permite a comunicação a longas distâncias, a palavra LoRaWAN representa o protocolo aberto de rede, padronizado e mantido pela associação LoRa Alliance, que possibilita o gerenciamento da transmissão e recepção de mensagens bidirecionais entre os seus componentes, oferecendo recursos como mobilidade, localização, atualizações remotas e segurança dos dados, entre outros.

A Figura 21 apresenta a pilha de protocolos das tecnologias LoRa e LoRaWAN. Como pode ser observado, a *camada física (PHY)* trata dos aspectos relacionados com a transmissão de mensagens via rádio utilizando-se a modulação LoRa, nas frequências pertencentes à faixa ISM (*Industrial, Scientific and Medical band*), as quais variam de acordo com a região considerada. Continuando a análise da pilha de protocolos, o estrato seguinte é a *camada MAC (Media Access Control)*, responsável pela gerência da rede LoRaWAN propriamente dita, lidando com o encaminhamento de pacotes de mensagens de dados ou de comandos dos dispositivos finais para a rede e vice-versa. A seguir, tem-se a *camada de Aplicação*, voltada para os aspectos referentes à coleta de dados e o seu envio à rede pelos sensores, para processamento pelas aplicações, e, na volta, o envio de comandos por estas, para execução de tarefas pelos atuadores.

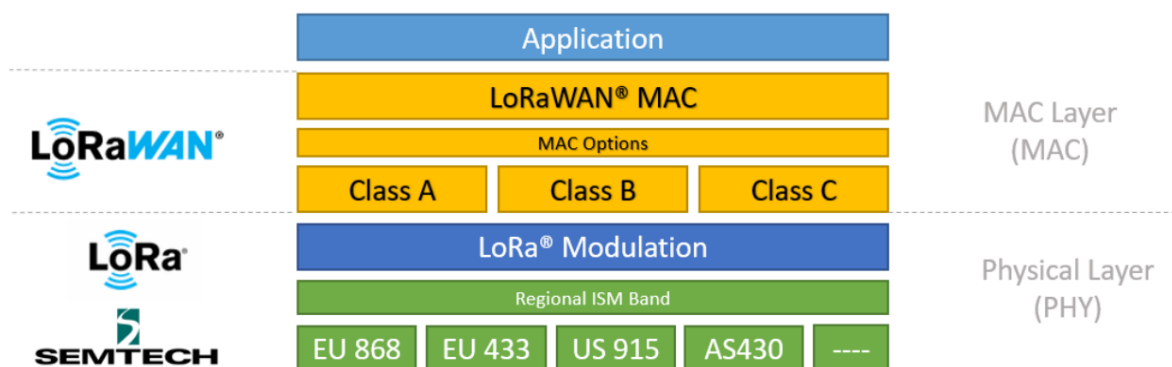


Figura 21. Pilha de protocolos das tecnologias LoRa e LoRaWAN.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

Uma rede LoRaWAN típica é composta por dispositivos finais (*end devices*), retransmissores de mensagens (*gateways*), servidores de rede (*network servers*), servidores de autenticação (*join servers*), servidores de aplicações (*application servers*) e usuários finais, conforme ilustrado na Figura 22, na qual pode ser observado que a comunicação entre os dispositivos finais e as estações retransmissoras (*gateways*) é feita via rádio, através de modulação LoRa. Destas (*gateways*) para o resto dos componentes da rede LoRaWAN, a conexão se dá por intermédio da pilha TCP/IP, através de enlaces feitos por ligações celulares, cabos ethernet ou *wi-fi*.

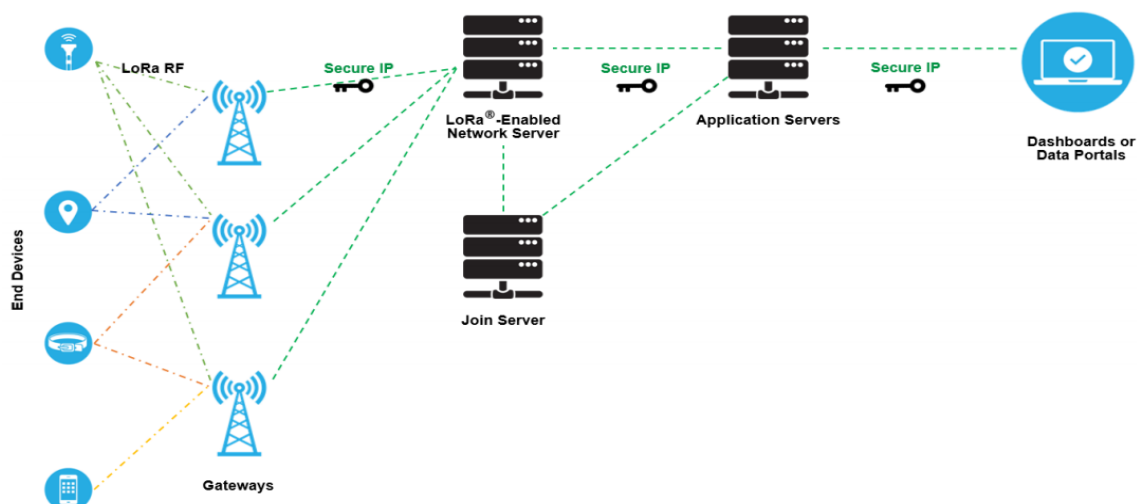


Figura 22. Arquitetura de uma rede LoRaWAN.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

2.7.1 Dispositivos Finais (*End Devices*)

Um dispositivo final habilitado para operar em uma rede LoRaWAN é, normalmente, um sensor ou atuador conectado a ela através de estações retransmissoras (*gateways*) via rádio, de modo que as mensagens trafegam por meio do uso de modulação de radiofrequência (RF) LoRa [10]. A Figura 23 mostra, destacados dentro de uma elipse desenhada na cor laranja, alguns tipos de sensores em uma rede LoRaWAN, que podem ser, basicamente, sensores de temperatura, umidade, pressão atmosférica, medidor de nível d'água, coleira para localização de animais etc.

LoRa-based End Devices

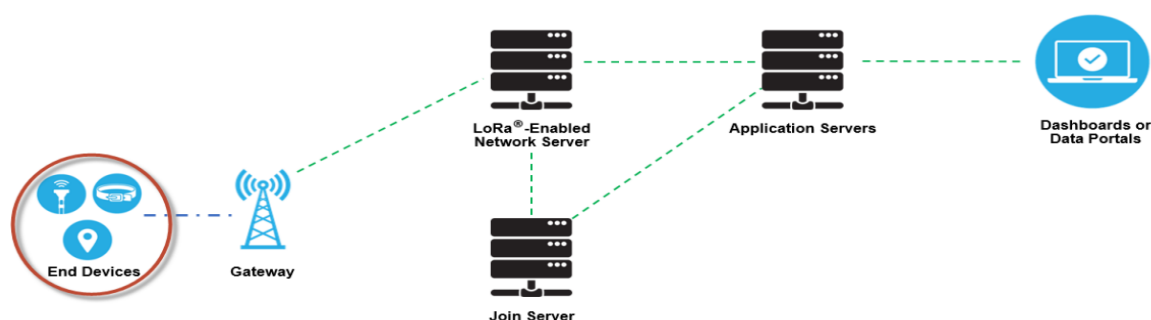


Figura 23. Alguns dispositivos sensores / atuadores em uma rede LoRaWAN.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

Em uma rede LoRaWAN, toda mensagem originada por um dispositivo final que é encaminhada à rede, destinada a algum de seus componentes como estações retransmissoras (*gateways*), servidores de rede, de autenticação ou de aplicação é chamada de *mensagem ou transmissão de Uplink*, como pode ser visto na Figura 24.

Uplink Transmission

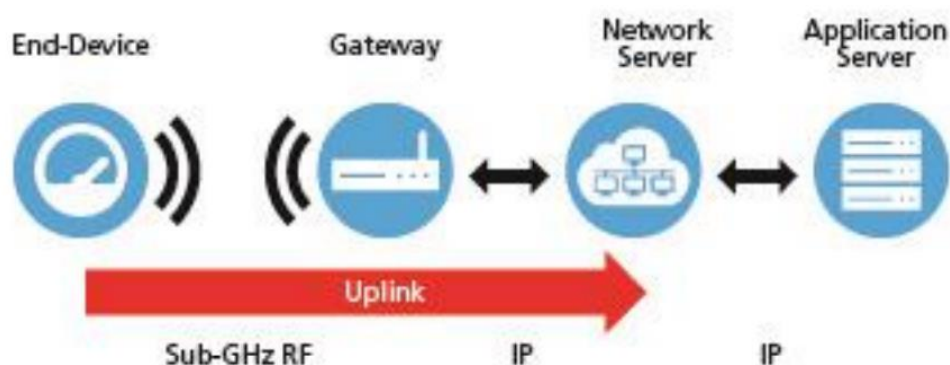


Figura 24. Uma mensagem ou transmissão de *Uplink*.

Fonte: SEMTECH Corporation [26].

De forma contrária, toda mensagem originada por algum dos componentes da rede LoRaWAN, como estações retransmissoras (*gateways*), servidores de rede, de autenticação ou de aplicação, destinada a um dispositivo final é chamada de *mensagem ou transmissão de Downlink*, como ilustrado na Figura 25.

Downlink Transmission

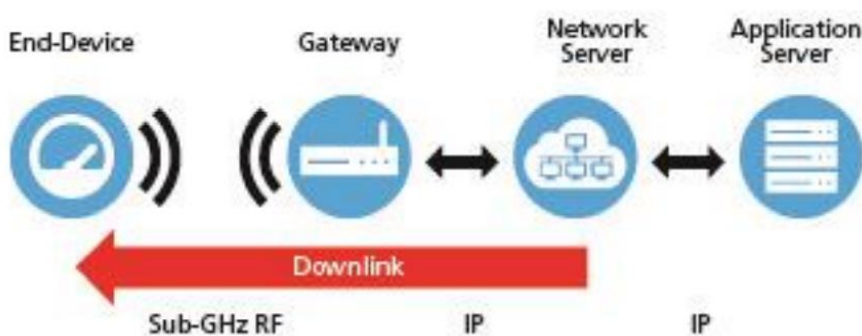


Figura 25. Uma mensagem ou transmissão de *Downlink*.

Fonte: SEMTECH Corporation [26].

Via de regra, o dispositivo final é um elemento autônomo, geralmente alimentado por bateria, que está, na maior parte do tempo, em estado de repouso, “dormindo”, com baixo consumo de energia. Quando atua na função de sensor, ao ocorrer alguma mudança no ambiente à sua volta ou ser despertado por um relógio (*timer*), realiza a medição do evento físico para o qual foi programado, digitaliza os dados colhidos e os envia, por comunicação

de radiofrequência, para as estações retransmissoras (*gateways*) que estiverem no seu raio de ação. Caso funcione como atuador, ao receber o comando para agir, o dispositivo realiza a tarefa determinada. Por fim, o dispositivo volta a “dormir”, diminuindo ao mínimo, novamente, o consumo de energia elétrica.

Durante o processo de fabricação, os dispositivos finais baseados na tecnologia LoRa recebem diversos identificadores únicos, que serão utilizados para a sua ativação e administração, assegurando, assim, o transporte seguro de mensagens em redes LoRaWAN públicas ou privadas, bem como a entrega de dados criptografados à *nuvem* [10].

❖ Dispositivos Finais (*End Devices*) Sensores

Alguns dos tipos de dispositivos finais utilizados na Internet das Coisas (IoT) configurados para atuar como Sensores seriam [42]:

- Sensores de Temperatura

São particularmente úteis em fábricas, armazéns, sistemas meteorológicos, na agricultura, na qual a temperatura do solo é monitorada para se maximizar o crescimento das culturas, em indústrias químicas, metalúrgicas, nucleares etc.

Apresentam-se segundo três tipos básicos:

- Detetores de Temperatura por Variação da Resistência Elétrica

Caracterizam-se como instrumentos que, em geral, medem a temperatura por meio da variação da resistência elétrica.

- Termistores

São dispositivos que apresentam uma resistência elétrica que varia, com grande sensibilidade, com a temperatura, sendo amplamente utilizados em eletrônica, como, por

exemplo, em termômetros eletrônicos ou sistemas nos quais se deseja evitar o aumento excessivo no valor de correntes elétricas.

➤ Termopares

Consistem de pares de diferentes condutores que, quando submetidos ao calor, apresentam uma força eletromotriz entre eles proporcional à diferença de temperatura que se estabelece. Podem ser utilizados como sensores de temperatura ou, em alguns casos, como fontes de energia de baixíssima intensidade de tensão elétrica e corrente relativamente alta.

- Sensores de Umidade

Também conhecidos como Higrômetros, são dispositivos usados para a medição da concentração de vapor d'água no ar, no solo ou em espaços confinados. Têm ampla utilização em estações meteorológicas, para a aferição e previsão do tempo, encontrando, também, aplicações na agricultura, no monitoramento do ambiente, da saúde, na indústria alimentícia, na tecnologia HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), a qual procura oferecer condições térmicas e de qualidade do ar confortáveis para a vida, seja em ambientes interiores de casas, prédios, construções diversas etc., ou veiculares, e em diversas outros campos.

Os Higrômetros dividem-se nos tipos clássico e moderno. Os primeiros abrangem os higrômetros antigos, os de bobina metal-papel, os de tensão capilar, os psicrômetros (termômetros com um bulbo seco e outro úmido) e os de ponto de orvalho de espelho resfriado. Os segundos podem ser do tipo capacitivo, resistivo, termal, gravimétrico e óptico.

- Sensores de Luz

São encontrados nas modernas TVs inteligentes, em telefones celulares, nas telas de computadores, etc., para o ajuste do brilho de acordo com a intensidade da luz ambiente, bem como em aplicações nas cidades inteligentes, permitindo o controle da iluminação das ruas, de acordo com a claridade, gerando economia de energia.

Apresentam-se, entre outras, na forma de:

➤ Fotoresistor

Consiste em um elemento sensível à luz cuja resistência elétrica muda de acordo com a radiação luminosa, podendo ser usado, por exemplo, como um sensor de proximidade ou, mesmo, como um sensor de temperatura.

➤ Fotodiodo

Consiste em um diodo que utiliza o *efeito fotoelétrico*, que é a emissão de elétrons, (chamados de *fotoelétrons*) por alguns materiais, geralmente metálicos, quando atingidos por radiações eletromagnéticas de determinadas frequências, normalmente elevadas. Quando um fóton (*quantum* elementar de radiação eletromagnética) contendo energia significativa atinge a junção de um fotodiodo e é absorvido por algum elétron da estrutura, este, então, migra para a banda de condutividade, criando, assim, um par elétron-lacuna. Os fotodiodos são amplamente utilizados na indústria de automação (em sistemas de sinalização e controle), telecomunicações (acopladores ópticos e ligações optoeletrônicas) etc.

- Sensores Acústicos

Permitem o monitoramento do nível de ruído em um determinado ambiente, sendo empregados em diversas aplicações, inclusive na prevenção da poluição sonora. Podem ser de vários tipos, entre os quais os seguintes:

➤ Microfone

É um dispositivo usado para a captação de som, sendo classificado de acordo com o princípio de transdução (processo de transformação de um tipo de energia em outro) utilizado. Assim, há microfones condensadores (também chamados de microfones capacitivos ou eletrostáticos), microfones por eletretos, microfones dinâmicos, microfones por fita, microfones a carbono, microfones piezoelétricos, microfones por fibra óptica,

microfones a laser, microfones baseados em líquidos, microfones baseados em Mems (microelectromechanical systems) etc.

➤ Geofone

Consiste em um sensor que converte as vibrações de frequência e amplitude do solo em tensões elétricas, permitindo a aferição das suas magnitudes, como encontrado em sismógrafos.

➤ Hidrofone

É um microfone utilizado para a captação de sons que se propagam na água ou em outros líquidos. Trata-se de um elemento estrutural básico de sonares passivos, utilizados na indústria da pesca, na detecção de cardumes de peixes.

- Sensores de Nível d'água

Na prevenção de desastres naturais, os dados coletados pelos sensores que monitoram os níveis de água podem ser empregados para análises e previsões em sistemas de alerta contra inundações. Além disso, tais sensores encontram grandes aplicações em processos industriais, no controle e otimização de manufaturas. Entre os tipos principais, destacam-se:

➤ Sensor por pressão hidrostática

É usado para a medição do nível de enchimento de líquidos e opera a partir do, assim chamado, *paradoxo hidrostático*: a pressão hidrostática existente em um ponto do líquido dentro de um tanque é diretamente proporcional somente à altura da coluna de líquido, não importando a forma ou volume do tanque.

➤ Sensor Óptico

Consiste em um sensor que determina o nível do líquido através da refração da luz incidente nele. Os sensores ópticos apresentam uma certa vantagem em relação aos demais sensores de nível d'água típicos devido ao fato de que estes são limitados por suas partes mecânicas móveis ou desgastes sofridos com o uso.

- Sensores de presença ou proximidade

Através da emissão de um feixe de radiação eletromagnética, este tipo de sensor é capaz de monitorar a presença do seu objeto-alvo e determinar a distância que separa ambos. Sua alta confiabilidade e grande durabilidade implicam no seu uso em diversos setores da Internet das Coisas, como, por exemplo, em carros inteligentes, na robótica, em manufaturas, em máquinas em geral, na aviação e em estacionamentos inteligentes, entre outras aplicações.

Entre as classes principais, destacam-se:

➤ Radar Doppler

Este dispositivo utiliza o *efeito Doppler*, que consiste no cálculo da diferença entre o valor da frequência da onda emitida por ele na direção e no sentido da fonte (objeto-alvo) e o valor da frequência refletida por esta que é captada pelo radar. Este sensor é empregado, não só para detectar objetos e determinar a sua localização, como, também, para identificar a sua direção e velocidade.

➤ Sensor de ocupação

É um tipo de sensor de presença que emprega luz infravermelha ou altas frequências para detectar movimento em salas, escritórios, corredores, banheiros, armazéns etc.

- Sensores de movimento

Além do seu emprego em edifícios inteligentes para o monitoramento de espaços públicos e privados contra furtos ou a entrada de pessoas não autorizadas, este tipo de sensor vem sendo utilizado, também, em sistemas de gerenciamento de energia, câmeras inteligentes, dispositivos autônomos etc.

Entre as classes principais, pode-se citar:

- Sensor de movimento ultrassônico ativo

Ele envia ondas ultrassônicas para o objeto-alvo, recebendo as ondas refletidas por este.

- Sensor infravermelho passivo de movimento (PIR, Passive Infrared Sensor)

Este tipo de sensor usa um par de sensores piroelétricos dispostos lado a lado para detectar o calor de objetos no ambiente [42]. Quando a diferença de sinal entre ambos os sensores muda (como ocorre, por exemplo, quando uma pessoa entra na sala onde está o sensor infravermelho), o dispositivo entra em ação, ligando um alarme, notificando autoridades etc.

A radiação infravermelha é concentrada em cada um dos dois sensores piroelétricos através de uma série de lentes construídas em torno do sensor infravermelho, ampliando, desta maneira, a sua área de monitoramento, conforme mostrado na Figura 26.

Passive IR Sensors

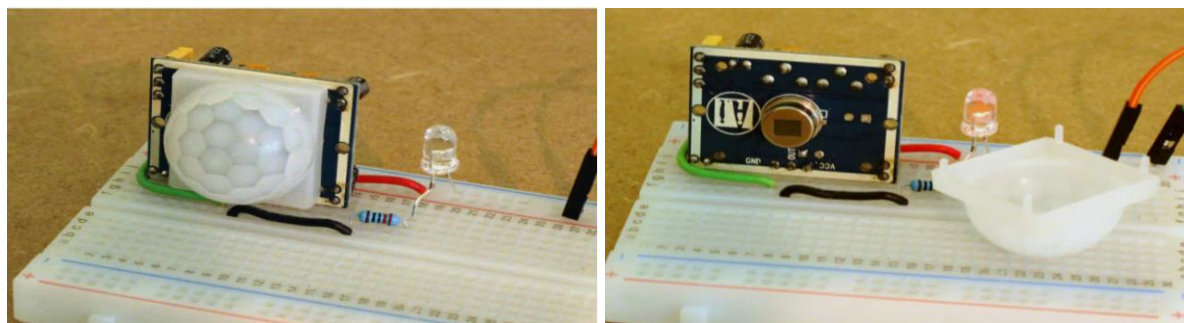


Figura 26. Sensor Infravermelho Passivo (PIR, Passive Infrared Sensor) conectado a um LED para indicar a sua ação. Na imagem da direita, a lente foi removida.

Fonte: ARROW ELECTRONICS INC. [43].

➤ Sensor infravermelho ativo de movimento (*Active Infrared Sensor*)

Um sensor infravermelho ativo é composto por um elemento emissor e um receptor, ambos dispostos um de frente para o outro. Se o espaço entre eles se encontra livre, o receptor simplesmente recebe o sinal do emissor. Quando algum objeto surge entre eles, o sinal é interrompido, indicando a sua presença, conforme ilustrado na Figura 27, na qual a colocação de um papel entre o emissor e o receptor interrompe o sinal entre eles, provocando o acendimento do LED.

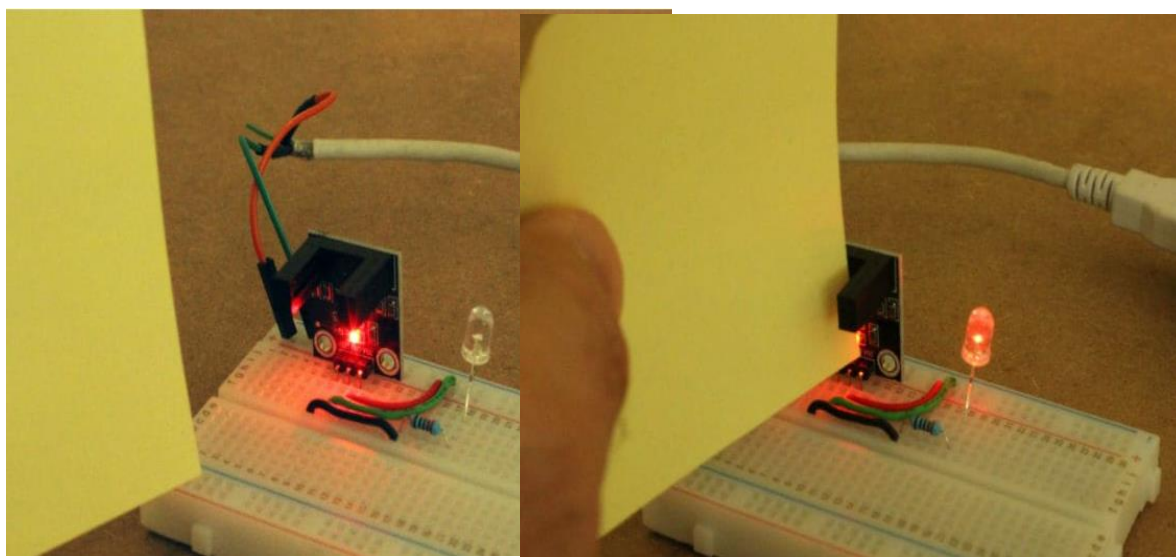


Figura 27. Sensor infravermelho ativo (*Active Infrared Sensor*) conectado a um LED para indicar a sua ação. A colocação de um papel entre o emissor e o receptor interrompe o sinal entre eles, provocando o acendimento do LED.

Fonte: ARROW ELECTRONICS INC. [43].

O sensor infravermelho ativo possui algumas variações, como, por exemplo, no caso em que tanto o emissor quanto o receptor estão próximos um do outro, mas ambos de frente para o mesmo lado, de forma que o receptor pode detectar a reflexão do sinal do emissor em um objeto que entra na área.

Uma outra versão do sensor infravermelho ativo mencionado acima seria aquela em que existe um refletor fixo que direciona o sinal do emissor para o refletor, evitando-se, assim, a instalação de um componente elétrico remoto. Quando um objeto se posiciona em frente ao sensor infravermelho ativo, o sinal captado pelo receptor é cortado, denunciando, então, a presença do intruso.

Cada método apresenta as suas vantagens e desvantagens, de acordo com o material que o sensor deverá detectar, além de outras especificidades.

➤ Sensor ativo por radar

Consiste em um sensor que emite e recebe radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas, permitindo a localização de estruturas através das nuvens, chuvas, durante a noite etc. É muito utilizado em satélites, para estudos de vegetação, desmatamentos, estruturas geológicas, climas, fenômenos meteorológicos, ocupações urbanas e vários outros propósitos.

- Sensores baseados em giroscópio

A função deste tipo de sensor é detectar rotações e medir velocidades angulares, encontrando aplicação em sistemas de navegação, robótica, produtos eletrônicos e processos industriais de um modo geral. Entre os tipos principais, pode-se destacar:

➤ Acelerômetro

Este tipo de sensor não mantém uma direção constante, mas indica a velocidade angular do objeto no qual está localizado. Este grupo inclui: *giroscópios mecânicos*, os quais têm liberdade de rotação limitada, normalmente a um dos eixos do sistema de coordenadas cartesianas; *giroscópios ópticos*, a laser e fibra óptica; e dispositivos que fazem uso do *efeito Coriolis*.

➤ Indicador de rumo

É um giroscópio que permite a determinação da rotação do corpo no qual está instalado, sendo, frequentemente, constituído por um objeto rígido que gira com rapidez, usualmente um disco, suspenso em uma estrutura adequada que permite a sua livre rotação em relação ao sistema de referência, por exemplo, a estrutura onde está localizado.

- Sensores químicos

São utilizados na detecção de componentes químicos em substâncias sólidas, líquidas ou gasosas, constituindo-se em elementos indispensáveis nos sistemas de segurança industrial, na proteção de ambientes, nas forças armadas, na pesquisa científica, no monitoramento da qualidade do ar etc. Entre os tipos principais, pode-se mencionar:

- Bafômetro eletroquímico

Consiste em um sensor utilizado para se determinar a concentração de álcool no sangue. Este tipo de sensor é resistente a efeitos colaterais como mentol, fumaça de cigarro ou ácido cítrico e pode indicar a concentração de álcool no ar exalado com acurácia da ordem de 0,01 ‰ (parte por mil) [43].

- Nariz eletrônico

É um conjunto de detetores que reagem a diferentes tipos de partículas contidas no ambiente ou às suas propriedades, como a presença de ligações químicas específicas, acidez, alcalinidade, habilidade de estabilização de dipolos vizinhos etc.

- Sensores de imagens

Este tipo de sensor faz a conversão de dados ópticos em impulsos elétricos, permitindo que o dispositivo no qual ele está instalado visualize o ambiente ao seu redor e tome as devidas providências, de acordo com a análise dos dados, como ocorre em veículos inteligentes, sistemas de segurança, equipamentos militares como radares e sonares, dispositivos médicos de imagens e, naturalmente, câmeras digitais. Entre os diversos tipos, pode-se destacar:

➤ Sensor de pixel ativo

É feito por um conjunto constituído por muitos elementos fotossensíveis construídos com tecnologia CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), sendo encontrado em aparelhos como webcams, câmeras digitais compactas, câmeras DSLR (*Digital Single Lens Reflex*, ou câmeras reflexo de uma só lente), elementos de controle em produções automatizadas, câmeras digitais de raio X etc.

➤ Dispositivo de carga acoplada (CCD, Charged-Coupled Device)

Consiste em um sistema contendo diversos elementos fotossensíveis que registram a imagem e permitem a leitura de um sinal elétrico proporcional à quantidade de luz incidente. Filtros coloridos utilizados neste tipo de sensor podem ser facilmente encontrados em câmeras digitais, proporcionando-lhes a habilidade de registrarem a intensidade de uma largura específica do espectro de luz em um determinado ponto da matriz de pontos da imagem.

❖ Dispositivos Finais (*End Devices*) Atuadores

Conforme o próprio nome sugere, os dispositivos finais atuadores realizam algum tipo de ação no ambiente imediato, permitindo, assim, a correta operação de máquinas ou dispositivos nos quais estão instalados. Com pequenas dimensões, são raramente visíveis, em geral, durante sua operação, mas os efeitos do seu trabalho podem ser percebidos em veículos, máquinas industriais ou qualquer outro equipamento eletrônico que utilize tecnologias de automação [43].

Os dispositivos finais atuadores podem ser classificados em quatro grandes categorias, de acordo com o seu padrão de construção e a função desempenhada na aplicação:

- Atuadores lineares

São utilizados para a movimentação de objetos ou elementos em uma linha reta.

- Motores

Permitem a rotação precisa de componentes de objetos ou de dispositivos inteiros.

- Relés

Esta categoria inclui os atuadores baseados em eletroímãs, usados na operação de interruptores de lâmpadas, aquecedores ou mesmo em veículos inteligentes.

- Solenóides

Empregados principalmente em aparelhos eletrodomésticos como parte de mecanismos de bloqueio ou disparo, eles também agem como controladores em sistemas IoT de monitoramento de vazamentos de água ou combustível.

2.7.2 Estações retransmissoras (*gateways*)

A função básica de uma estação retransmissora (*gateway*) em uma rede LoRaWAN é receber as mensagens enviadas via radiofrequência por todos os dispositivos finais que estejam dentro do seu raio de ação e encaminhá-las Servidor de Rede LoRaWAN (*LoRaWAN Network Server, LNS*), ao qual está conectado por Wi-Fi, conexão celular ou cabo ethernet. A Figura 28 apresenta em destaque uma estação retransmissora (*gateway*) numa rede LoRaWAN.

LoRaWAN Gateways

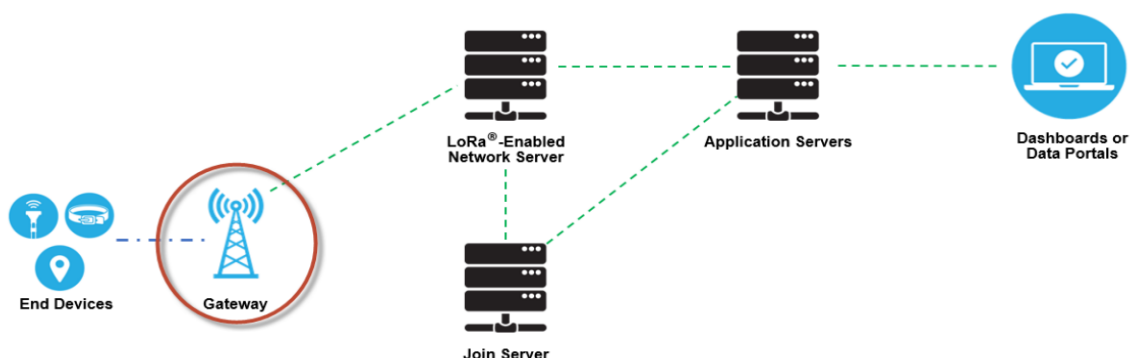


Figura 28. Uma estação retransmissora (*gateway*) em uma rede LoRaWAN.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

A função principal de uma estação retransmissora (*gateway*) em uma rede LoRaWAN é receber as mensagens de rádio encaminhadas por qualquer dispositivo final que esteja dentro do seu raio de ação e entregá-las, através de uma conexão IP, para o servidor de rede (*LoRaWAN network server, LNS*), assim como disponibilizar, para um ou mais dispositivos finais, as mensagens enviadas por ele (servidor de rede). Esta conexão IP pode ser implementada através de *ethernet*, ligação celular ou por *wi-fi*.

Em uma rede LoRaWAN, não há uma associação constante e definitiva entre uma estação retransmissora (*gateway*) e um dispositivo final, já que este pode ser atendido por várias delas, ao mesmo tempo, desde que se encontre dentro das suas áreas de atuação, como ilustrado na Figura 29. Isto permite o estabelecimento de um sistema de geolocalização de baixo custo nos *gateways* [10], permitindo que cada pacote de mensagem *Uplink* enviado pelo dispositivo final seja recebido por todos os *gateways* que estiverem ao alcance, o que reduz fortemente o gasto de energia de dispositivos finais móveis, bem como a taxa de erro de pacotes de mensagem, uma vez que é alta a probabilidade de ao menos uma estação retransmissora tê-la recebido com sucesso. Cabe ao servidor de rede (LNS) efetuar a eliminação dos pacotes duplicados.

O *gateway* em uma rede LoRa WAN atua na camada física, fazendo, em essência a retransmissão de mensagens de rádio recebidas por ele dos dispositivos finais (*Uplink*) e as encaminha para o servidor de rede por *ethernet*, IP ou Wi-Fi. No sentido contrário, o *gateway* recebe as mensagens enviadas pelo servidor de rede (por *ethernet*, IP ou Wi-Fi) e as retransmite para o dispositivo final de destino por rádio (*Downlink*). Ao receber um pacote de dados de um dispositivo final, verifica a sua integridade por meio do exame do *Código de Verificação de Redundância Cíclica (Cyclic Redundance Check Code, CRC)*. Caso esteja correto, adiciona alguns metadados, como o nível RSSI (*Received Signal Strength Indication*), que mede a intensidade do sinal recebido, e, opcionalmente, um registro de data e hora (*timestamp*), e envia o pacote de dados para o servidor de rede (LNS).

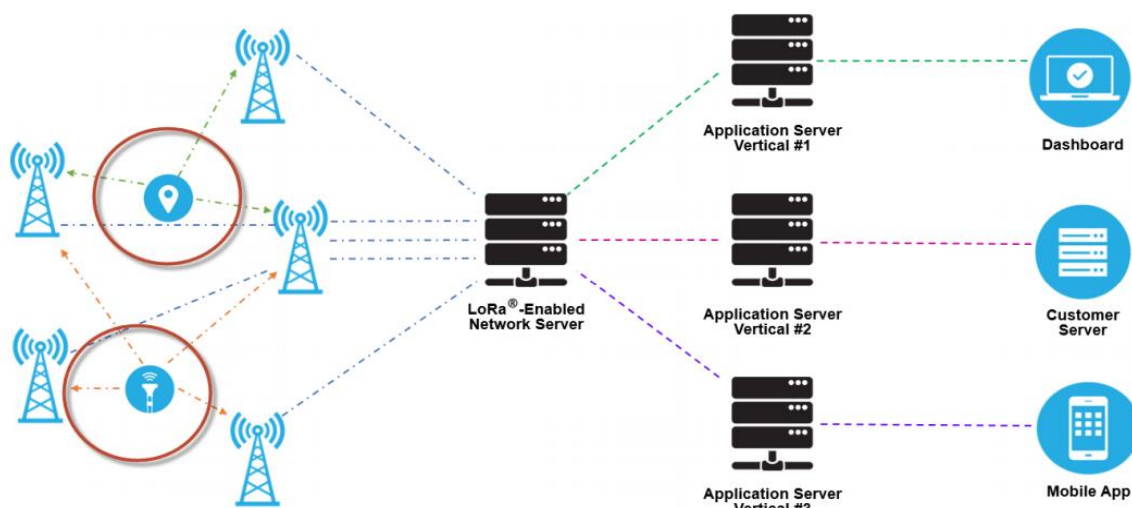


Figura 29. Dispositivos finais, em uma rede LoRaWAN, atendidos simultaneamente por vários gateways, que recebem e transmitem as mensagens.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

Como já mencionado, numa transmissão de mensagem *Uplink*, vários gateways podem vir a receber a mesma mensagem LoRa encaminhada por um dispositivo final. Então, compete ao servidor de rede (LNS) selecionar a melhor cópia, através do nível RSSI mais forte, memorizando as referências do gateway que a forneceu, e eliminar as demais cópias do pacote.

No sentido contrário, em uma transmissão de mensagem *Downlink*, quando o servidor de rede (LNS) tem dados a enviar para algum dispositivo final, ele irá selecionar o gateway que lhe havia fornecido a mensagem de *Uplink* com o nível de RSSI mais forte, por entender que tal gateway é o que está fisicamente mais próximo do dispositivo final destinatário. Então, o servidor de rede (LNS) envia o pacote de dados para este gateway, que, ao recebê-lo, o reencaminha para o dispositivo final destinatário, sem sequer analisar o seu conteúdo (*payload*).

Em termos de capacidade, atualmente os gateways de 8 (oito), 16 (dezesesseis) ou 64 (sessenta e quatro) canais de frequências são bastante utilizados e a sua escolha depende dos requisitos de tráfego da rede LoRaWAN a ser implantada.

❖ Alguns exemplos de Gateways

- Cisco LoraWan Gateway

O *gateway* Cisco LoRaWan é uma solução em nível de operadora adequada para aplicações nas quais é necessário o uso de um *gateway* de maior porte. Ele suporta 18 canais de frequência e possui recurso de geolocalização através do cálculo das diferenças nos tempos de chegada dos sinais de dados encaminhados pelos usuários finais (*TDoA*, *Time Difference of Arrival*), e, também, através da verificação do nível da intensidade do sinal recebido (*RSSI*, *Received Signal Strength Indication*) [45][46]. A Figura 30 mostra o *gateway* Cisco LoRaWan.



Figura 30. Aspecto do *gateway* Cisco LoRaWan.

Fonte: THE THINGS NETWORK [45].

- Kerlink Wirbnet iBTS Gateway

O *gateway* Kerlink Wirbnet iBTS é um dispositivo em nível de operadora que apresenta alta capacidade, e pode ser usado em serviços de geolocalização sem GPS. Ele possui uma arquitetura modular que permite a sua configuração e ampliação de acordo com a necessidade. Assim, a partir desta modularidade, é possível operar com as tecnologias Ethernet ou GPRS/EDGE/HSPA/CDMA/LTE, nas frequências LoRa não licenciadas (ISM) de 868 MHz, 902 a 928 MHz, ou 915 a 928 MHz. Além disso, pode atuar com um número de canais de frequência entre 8 e 64 e possui interface para antena única (omnidirecional), dual (permitindo diversidade espacial ou polarização dupla) ou tripla (para setorização) [45]. A Figura 31 mostra o *gateway* Kerlink Wirbnet iBTS.

Wirnet iBTS



Figura 31. Imagem do gateway *Kerlink Wirbnet iBTS*.

Fonte: THE THINGS NETWORK [45].

- Multitech Conduit Programmable Gateway

O *Multitech Conduit* é um gateway para aplicações IoT em nível industrial que permite configuração remota e expansões, e possui recursos de Wi-Fi, Bluetooth (BT), Bluetooth de Baixa Energia (BLE), Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS), 8 canais de frequência e dois slots de placas de acessórios que possibilitam a introdução de cartões *Multitech mCard* para ligação a cabos ou interface sem fio, tornando possível a conexão a diversos tipos de dispositivos próximos, como pode ser observado na Figura 32 [45][47].

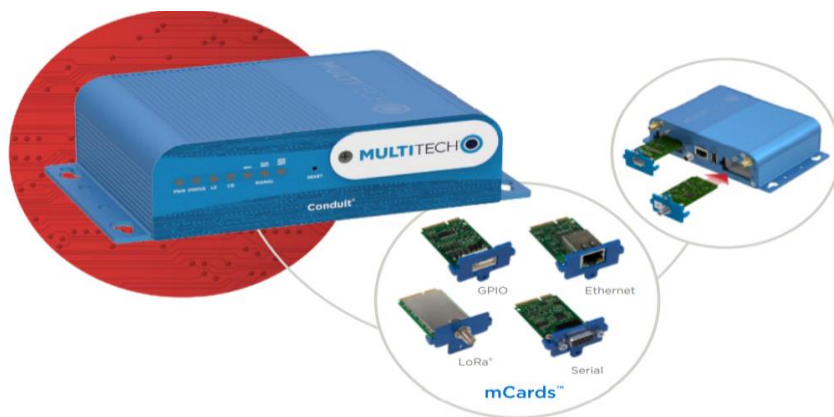


Figura 32. Gateway *Multitech Conduit*.

Fonte: MULTITECH DEVELOPERS RESOURCES [45][47].

- TEKTELIC KONA IoT Gateway

Este gateway é um dispositivo com grau de operadora para redes IoT LoRaWAN, oferece alta escalabilidade e suporta até 12 milhões de mensagens por dia. Destina-se a redes

públicas ou privadas que requerem aplicações *full duplex*, vários canais de transmissão (Tx) e recepção (Rx), confiabilidade e relação custo / benefício que justifique por alguns anos o investimento feito em sua aquisição. A Figura 33 mostra os aspectos externo e interno deste dispositivo. Entre as suas características principais, destacam-se: Divisão em Frequência Duplex (FDD) com (64+8) Rx e (2+2) Canais Tx; Divisão em Tempo Duplex (TDD) com 32 Canais Rx e (2+2) Canais Tx; Bandas de frequências globais de NA915 (Estados Unidos), EU868 (Europa), AS923 (Ásia), JP920 (Japão), CH779 (China) etc.; suporte para antena dual, para obtenção de diversidade em recepção e capacidade em transmissão; conexão à infraestrutura de rede por soluções Ethernet (via cabos metálicos ou ópticos) ou 3G/4G; sincronização precisa à rede por GPS, com *hold-over*; recurso de geolocalização customizável por TDoA; potência de transmissão de até 30 dBm (1 watt);

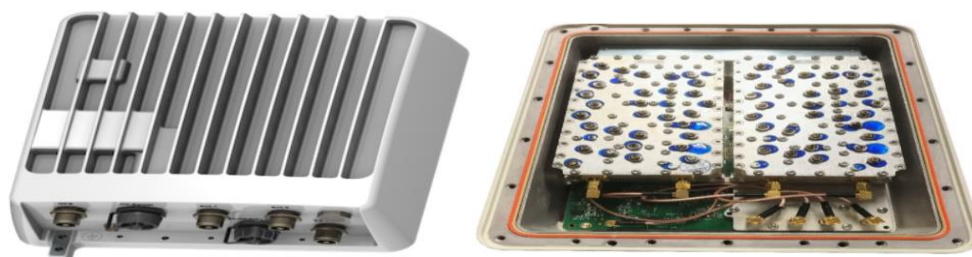


Figura 33. Gateway Tektelic Kona.

Fonte: THE THINGS NETWORK [45].

- Ursalink UG87-Outdoor Industrial LoRaWAN Gateway

Este *gateway* foi projetado para aplicações em cidades inteligentes de grandes dimensões, nas quais pode ser usado em medições, gerenciamento de frotas, monitoramento de postes de luz etc. Ele destina-se a aplicações *outdoor*, sendo fabricado com uma cobertura nível *IP67* ⁽¹⁾, que oferece proteção contra poeira, umidade e imersão temporária em água de até 1,0 metro de profundidade [46], pode figurar com 8 ou 16 canais de frequência, atuar nas bandas de 433 MHz (EU433) ou 868 MHz (EU868) na Europa, 902 MHz nos Estados Unidos (US902), 915 MHz na Austrália (AU915), 470 MHz no Canadá (CN470), 923 MHz na Ásia (AS923), 920 MHz na Coreia do Sul (KR920). Possui sensibilidade de 140 dBm, a uma taxa de transmissão de dados de 292 bps, e apresenta uma potência máxima de saída de 27 dBm [49]. A Figura 34 ilustra o aspecto físico do *gateway*. Como pode ser notado, ele é montado com 4 ou 5 antenas, assim discriminadas: antena *LoRa1*, para o modelo com 8 canais de frequência, antena *GPS*, para serviços de geolocalização, antena *LTE*, para

comunicação com redes de telefonia celular, antena *LoRa2*, se o modelo for de 16 canais de frequência (o modelo de 8 canais possui apenas a antena *LoRa1*), e antena *Wi-Fi*, para ligação a redes sem fio [50].



Figura 34. Gateway Ursalink UG87-Outdoor Industrial LoRaWAN.

Fonte: THE THINGS NETWORK [45].

⁽¹⁾ Obs.: a cobertura *IP* (Ingress Protection) é um sistema publicado pela *Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC)* para coberturas de dispositivos elétricos e eletrônicos. Os códigos *IP* classificam o nível de proteção que uma cobertura deste tipo oferece contra a entrada de partículas sólidas e água. A classificação *IP* é feita pela sequência de letras *IP* seguida de dois dígitos decimais. O primeiro representa o nível de proteção oferecido pela cobertura contra substâncias sólidas, como dedos, sujeira e poeira. Já o segundo dígito mostra o nível de proteção contra a presença de água. Assim, no código *IP67*, por exemplo, o primeiro dígito, tendo o valor 6, indica que a cobertura apresenta proteção total contra poeira, não permitindo a sua entrada no interior. Já o segundo dígito, sendo 7, mostra que a cobertura garante proteção contra a sua imersão em água até a profundidade de 1,0 metro [48].

2.7.3 Servidor de Rede (*LoRaWAN-enabled Network Server, LNS*)

O Servidor de Rede (*LNS*) é o componente da rede *LoRaWAN* responsável pelo seu gerenciamento. Para isso, ele controla dinamicamente a rede, de modo a adaptá-la às condições constantemente variáveis, estabelece conexões seguras através do padrão de criptografia avançado *AES-128*, tanto no transporte de dados fim a fim, entre o dispositivo final *LoRaWAN* e os usuários de aplicações na nuvem, quanto no tráfego de controle que ocorre entre aquele (dispositivo final) e o servidor de rede [10]. A Figura 35 apresenta um esboço de uma rede *LoRaWAN* na qual encontra-se destacado o servidor de rede.

Network Server

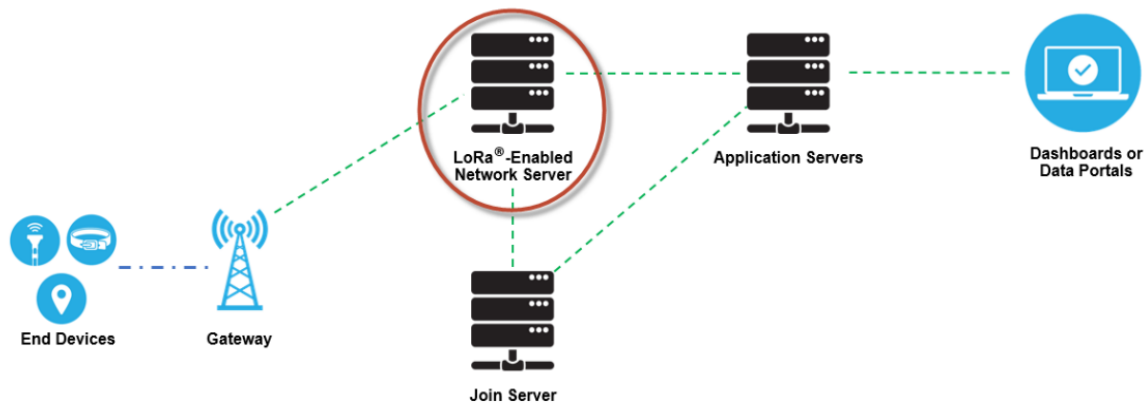


Figura 35. Servidor de rede em uma rede LoRaWAN típica.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

O servidor de rede procura garantir a autenticidade de cada sensor conectado a ela (rede), bem como a integridade de cada uma das mensagens que trafegam na mesma, sem que ele tenha, entretanto, acesso aos dados das aplicações.

Todo servidor de rede LoRaWAN possui, em geral, as seguintes atribuições principais [10]:

- encaminhamento de mensagens de solicitação de conexão à rede (*join-request messages*) e mensagens de aceitação de conexão a ela (*join-accept messages*), trocadas entre os dispositivos finais e o servidor de conexão (*join server*);
- checagem do endereço de rede do dispositivo;
- encaminhamento de dados de aplicação *Uplink*, do dispositivo final para os servidores de aplicação apropriados;
- autenticação de quadro e gerenciamento do contador de quadros;
- enfileiramento de dados *Downlink* provenientes de um servidor de aplicação para um dispositivo conectado à rede;
- confirmação de mensagens recebidas;
- adaptação das taxas de transmissão de dados por meio do protocolo ADR (*Adaptive Data Rate protocol*) [37].

2.7.4 Servidores de Aplicação (*Application Servers*)

Os Servidores de Aplicação são os elementos da rede responsáveis pela interpretação e, também, pelo tratamento e gerenciamento dos dados. Além disso, eles geram todas as cargas úteis de dados (*payloads*) na camada de aplicação a serem encaminhadas aos dispositivos finais conectados à rede (*Downlink payloads*) [10]. Na Figura 36 está ilustrado em destaque esta categoria de servidores.

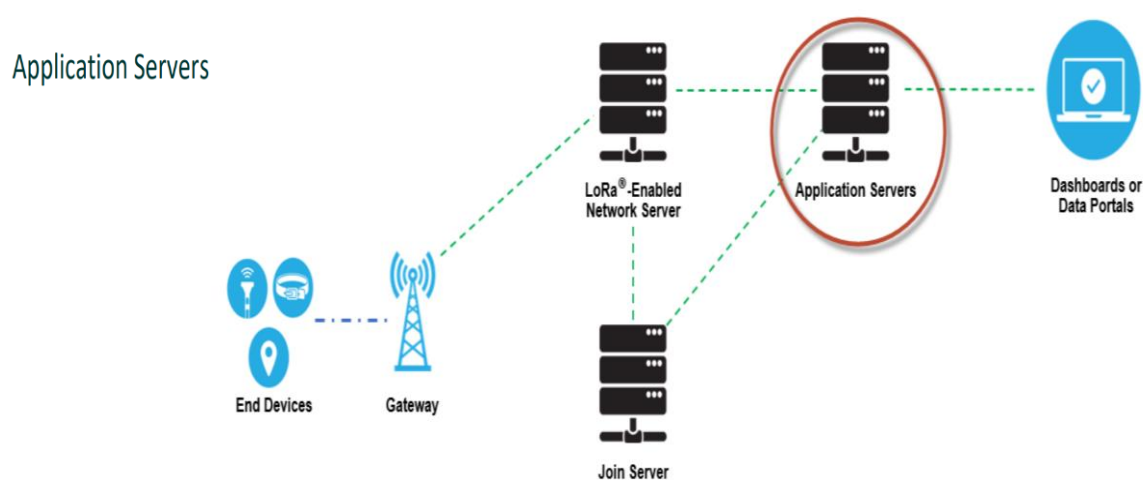


Figura 36. Servidores de aplicação em uma rede LoRaWAN.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

2.7.5 Servidor de Conexão (*Join Server*)

O Servidor de Conexão (*Join Server*) em uma rede LoRaWAN é o elemento que gerencia o chamado *processo de ativação pelo ar* (*Over The Air Activation, OTAA*) para os dispositivos finais que desejam se conectar a ela.

Este servidor dispõe da informação necessária para processar os quadros *Uplink* de requisição, por um dispositivo final, de conexão à rede (*join-request frames*) e gerar os quadros *Downlink* de aceitação desta (*join-accept frames*). Ele, então, sinaliza ao servidor de rede qual servidor de aplicação deve ser acionado para atender ao dispositivo final que requisitou tal conexão e, também, realiza os procedimentos para a obtenção das chaves de

criptografia que serão utilizadas nas sessões de aplicação e de rede. A seguir, envia a chave da sessão de rede para o servidor de rede e a chave da sessão de aplicação para o respectivo servidor de aplicação requisitado [10]. A Figura 37 mostra em destaque o esboço de um servidor de conexão em uma rede LoRaWAN.

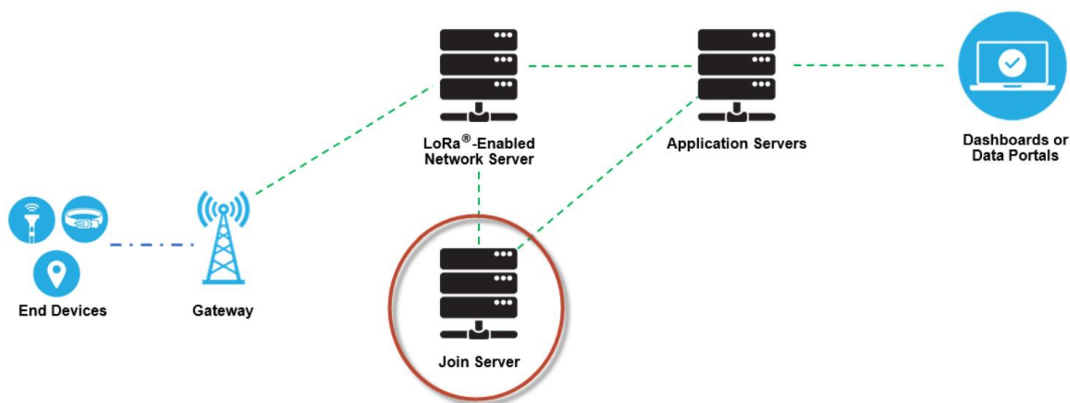


Figura 37. Servidor de conexão em uma rede LoRaWAN.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

Para a obtenção das chaves de criptografia que serão usadas nas sessões de aplicação e de rede, o servidor de conexão deve ter os seguintes dados do dispositivo final sob seu controle:

- Identificador único serial do dispositivo (*end-device serial unique identifier, DevEUI*);
- Identificador do servidor de aplicação;
- Perfil de serviço do dispositivo final; e
- Chave de criptografia da aplicação (*application encryption key, AppKey*).

2.7.6 Comissionamento de um dispositivo final em redes LoRaWAN

Em uma rede LoRaWAN, os dispositivos finais que desejam se conectar a ela devem, por razões de segurança, qualidade de serviço, faturamento etc., primeiramente, ser comissionados (autenticados, certificados, autorizados) e ativados no início da operação de conexão. Assim, o processo de comissionamento seguramente alinha cada dispositivo final

e a rede com relação aos parâmetros essenciais de provisionamento, tais como identificadores, localização de servidores, chaves de criptografia etc. [10].

As redes LoRaWAN admitem dois tipos de ativação de dispositivos finais: a *Ativação pelo Ar (Over-The-Air Activation, OTAA)*, preferida por ser mais segura, e a *Ativação por Personalização (Activation By Personalization)*, mais simples, porém, vulnerável. A Tabela 6 apresenta as principais características de ambos os tipos de ativação.

Tabela 6. Tipos de Ativação de um dispositivo final em redes LoRaWAN. [39].

Ativação pelo Ar (OTAA)	Ativação por Personalização (ABP)
• Os fabricantes de dispositivos finais, de forma autônoma, geram os parâmetros de provisionamento essenciais.	• Processo de comissionamento simplificado (menos seguro).
• Chaves seguras (derivadas e com a duração de uma sessão) podem ser renovadas regularmente.	• Os identificadores (IDs) e as chaves são personalizados na fabricação.
• Os dispositivos finais podem armazenar várias "identidades" para, de forma dinâmica e segura, trocar de redes e operadores durante as suas vidas úteis.	• Os dispositivos finais tornam-se imediatamente funcionais ao serem ligados. Não há processo de conexão à rede.
• Disponibilidade de opções de segurança de alto nível invioláveis.	• Os dispositivos finais são vinculados a uma rede ou serviço. O identificador de rede (NetID) é uma porção do endereço de rede do dispositivo.

Fonte: SEMTECH CORPORATION [10].

2.7.7 Segurança em redes LoRaWAN: princípios básicos

Nas redes LoRaWAN, há dois elementos-chave relacionados à segurança: o *procedimento de conexão de um dispositivo final* e a *autenticação de mensagens*. O primeiro envolve o estabelecimento de uma autenticação mútua entre o dispositivo e a rede à qual deseja se conectar. Somente dispositivos finais autorizados podem se ligar à rede. Já o segundo elemento refere-se ao fato de que as mensagens de aplicação ou de camada MAC

são autenticadas na origem, protegidas em sua integridade e criptografadas de modo fim a fim, desde o dispositivo final até o servidor de aplicação e vice-versa [10].

Assim, estes requisitos de segurança garantem que somente dispositivos legítimos se conectem à rede LoRaWAN e que o tráfego de rede não seja monitorado, capturado ou reeditado (alterado).

- **O procedimento de conexão de um dispositivo final à rede LoRaWAN [10]**

Os dispositivos finais armazenam, de forma segura, chaves-raiz individuais, e versões correspondentes delas são guardadas, de modo igualmente seguro, no servidor de conexão, como ilustrado na Figura 38.

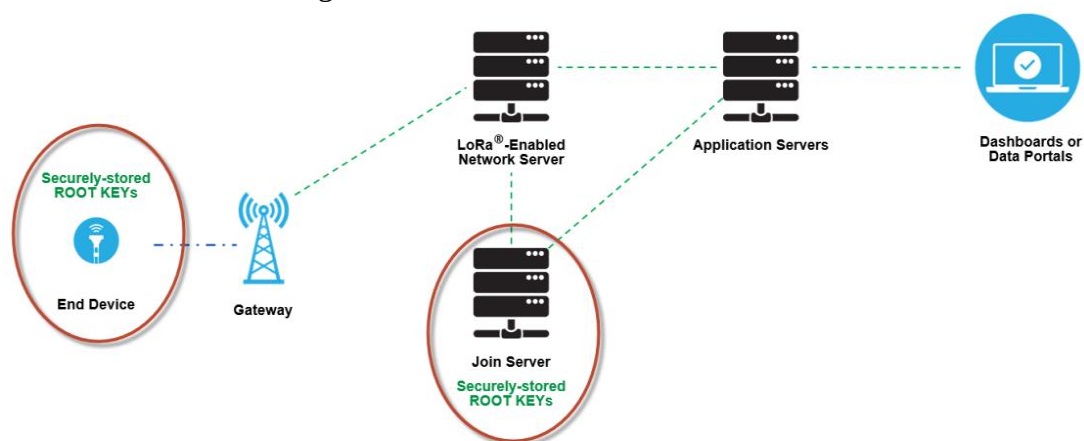


Figura 38. Chaves de segurança geradas durante o procedimento de conexão (*Join procedure*).

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

O dispositivo final envia para o servidor de conexão (*join server*) uma mensagem de requisição de conexão à rede (*join request message*), conforme esboçado na Figura 39.

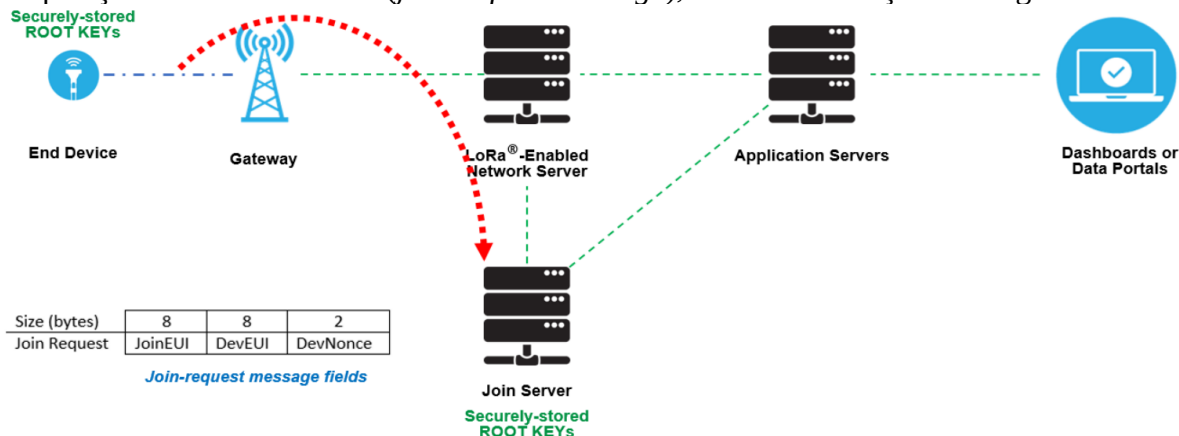


Figura 39. Um dispositivo final enviando para o servidor de conexão uma mensagem de requisição de conexão.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

Ao receber a mensagem de requisição de conexão, o servidor de conexão verifica se o dispositivo final está autorizado a acessar a rede. Caso não tenha permissão de acesso, a mensagem é descartada. Por outro lado, se estiver habilitado a se conectar à rede, o servidor de conexão autentica o dispositivo final e, então, envia uma mensagem de aceitação de conexão (*join accept message*), como mostrado na Figura 40.

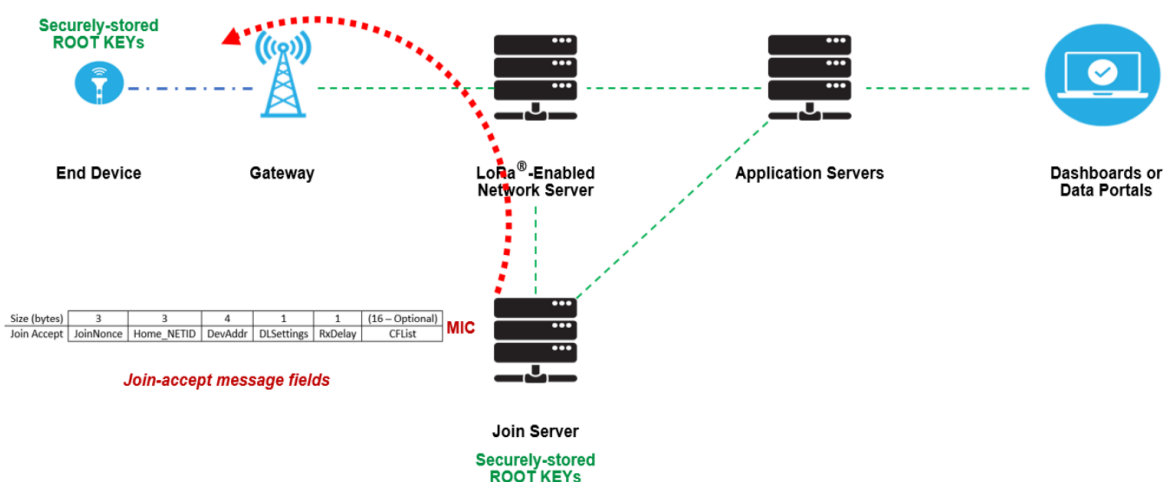


Figura 40. Servidor de conexão enviando para o dispositivo final uma mensagem de aceitação de conexão.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

A seguir, o dispositivo final obtém localmente chaves de sessão (*NwkSKey* e *AppSKey*), a partir do conteúdo dos parâmetros *DevEUI*, *JoinEUI*, *DevNonce*, chaves-raiz e campos existentes nas mensagens de requisição de conexão à rede e de aceitação de conexão. Dispositivos invasores não logram êxito em invadir redes LoRaWAN pois, para isto, teriam que conhecer o conteúdo de todos estes campos.

Por outro lado, o servidor de conexão também deriva chaves de sessão a partir de identificadores seriais (ID), chaves-raiz e campos das mensagens de requisição de conexão à rede e de aceitação de conexão. Por fim, este servidor compartilha as chaves de sessão com os servidores de rede e de aplicação, conforme ilustrado na Figura 41.

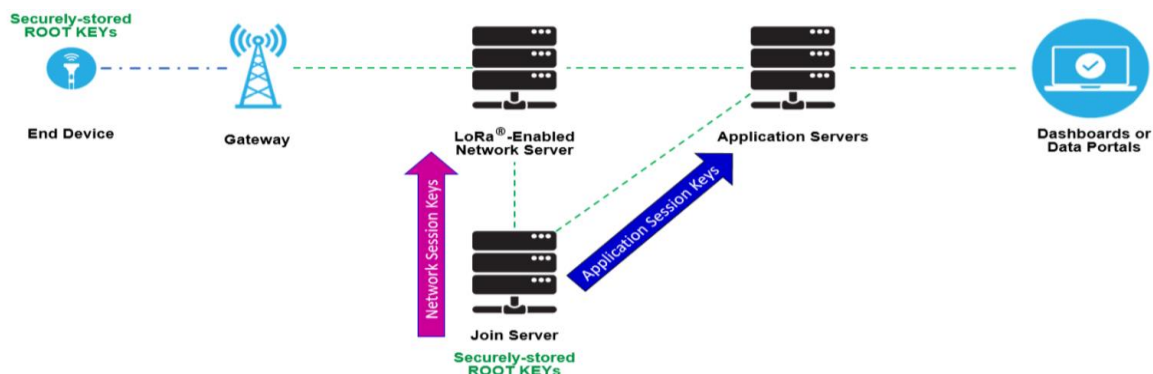


Figura 41. Chaves de sessão compartilhadas pelo servidor de conexão com os servidores de rede e de aplicação.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

O tráfego de controle existente entre o dispositivo final e o servidor de rede é protegido por meio de uma *Chave de Sessão de Rede (NwkSKey)*, que é específica para cada dispositivo final. Ela é usada para duas finalidades principais [29]:

- para que, tanto o servidor de rede, quanto o dispositivo final possam efetuar o cálculo e verificação do conteúdo do campo *Código de Integridade de Mensagem (MIC)* de todos os *quadros de dados* que trafegam pela rede, a fim de que seja garantida a integridade deles; e
- para a criptografia e descryptografia da carga útil dos *quadros de controle*, que contêm apenas comandos de controle (MAC).

Por sua vez, uma *Chave de Sessão de Aplicação (AppSKey)* é utilizada para a proteção do tráfego de dados que flui entre o dispositivo final e o servidor de aplicação. Deste modo, a especificação LoRaWAN garante que, nem o *gateway*, nem o servidor de rede têm acesso aos dados do usuário.

Aqui cabe ser mencionada a diferença entre as chaves *AppKey* e *AppSKey*. A primeira (*AppKey*) é uma chave raiz AES-128 específica para o dispositivo final. Quando este se conecta a uma rede através do método de *Ativação pelo Ar (OTAA)*, a chave *AppKey* é armazenada nele (dispositivo final) e é utilizada para derivar as chaves de sessão *NwkSKey* e *AppSKey* específicas para que o dispositivo final possa, durante a sessão, criptografar e verificar os dados de comunicação de rede e de aplicação. Por outro lado, se o dispositivo final se conecta à rede por meio do método de *Ativação por Personalização (ABP)*, não há uso da chave *AppKey* [30]. A Figura 42 mostra um esboço dos sistemas de proteção de dados em redes LoRaWAN.

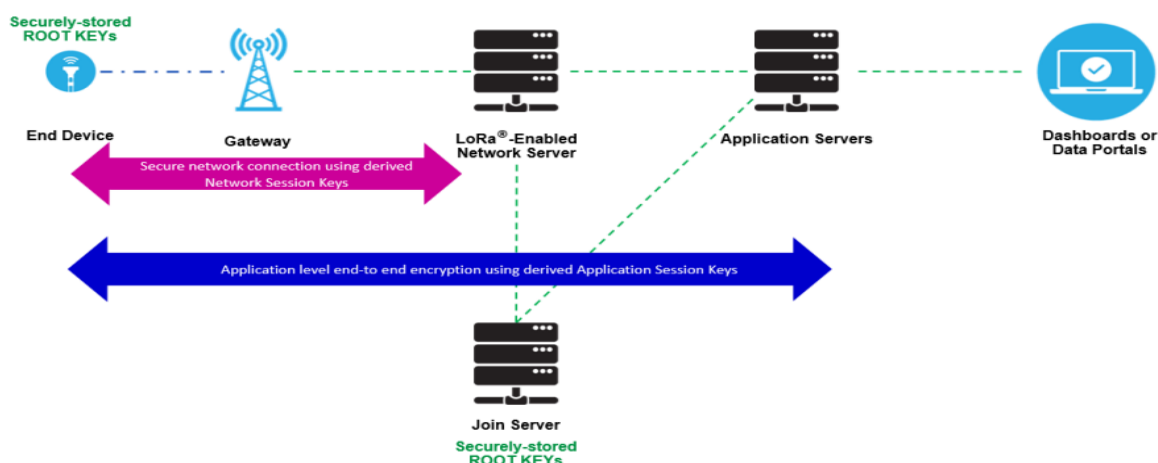


Figura 42. Sistemas de proteção de dados em redes LoRaWAN.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

2.7.8 Classes de dispositivos finais

Conforme já abordado anteriormente de forma breve neste trabalho, os dispositivos finais LoRa podem operar segundo um de três modos possíveis, denominados *Classe A*, *Classe B* e *Classe C*, as quais diferenciam-se principalmente pelo consumo de energia elétrica, entre outras particularidades. Os dispositivos *Classe A* são os que apresentam o menor consumo de energia. Já os da *Classe B* apresentam um gasto de energia mais elevado, e devem, também, ser capazes de atuar na *Classe A*. Por sua vez, os dispositivos *Classe C* são os que possuem o maior consumo de energia, e precisam, também, ser capazes de atuar nas *Classes A* e *B* [10]. A seguir, serão abordadas as principais características de cada uma destas três Classes.

- Dispositivos Finais *Classe A*

O dispositivo final LoRa pertencente a esta classe passa a maior parte do tempo em estado ocioso, ou em estado de “sono” (“dormindo”). No entanto, quando ocorre, alguma mudança no ambiente em que se encontra, e para a qual está programado a monitorar, desperta, realiza a medição do(s) fenômeno(s) e, a seguir, envia uma mensagem de *Uplink* para a rede, transmitindo para ela os dados coletados. Então, aguarda um período de tempo, que pode ser configurado, após o qual inicia um período de “escuta” do meio, em busca de mensagens de resposta originadas pela rede (durante a janela de recepção *Rx1*). Se o dispositivo final não receber qualquer mensagem de *Downlink* da rede durante esse intervalo de tempo, ele volta a “dormir”, até despertar mais tarde, iniciando, novamente, uma escuta do meio, à espera de mensagens da rede (durante a janela de recepção *Rx2*). Se nenhuma resposta for recebida durante esse segundo intervalo de tempo, o dispositivo final retornará a “dormir”, e só despertará outra vez se, e quando, tiver dados a enviar para rede [10].

É importante assinalar que não há qualquer possibilidade de uma aplicação que utiliza um dispositivo final *Classe A* “acordá-lo”. Ou seja, na *Classe A*, uma comunicação é iniciada somente pelo dispositivos final. Se a rede transmitir para ele qualquer mensagem fora das duas janelas de recepção (*Rx1* e *Rx2*), ela será perdida. Devido a esta limitação, os dispositivos finais *Classe A* não podem ser utilizados como *atuadores*. Assim, toda vez em

que a rede deseja enviar alguma mensagem ao dispositivo final *Classe A* (mensagem de *Downlink*), deverá, obrigatoriamente, aguardar a abertura, por parte dele, da próxima janela de escuta *Rx1* ou da *Rx2*.

A Figura 43 mostra um esboço do modo de atuação de um dispositivo final *Classe A*. Deve ser ressaltado que a duração do intervalo de tempo que ocorre entre o término da janela de recepção *Rx1* e o início da janela de recepção *Rx2* é configurada em função da duração do intervalo de tempo existente entre o término da transmissão de *Uplink* feita pelo dispositivo final para a rede e o início da janela de recepção *Rx1*. Em outras palavras, estes dois intervalos de tempo são configuráveis no protocolo LoRaWAN.

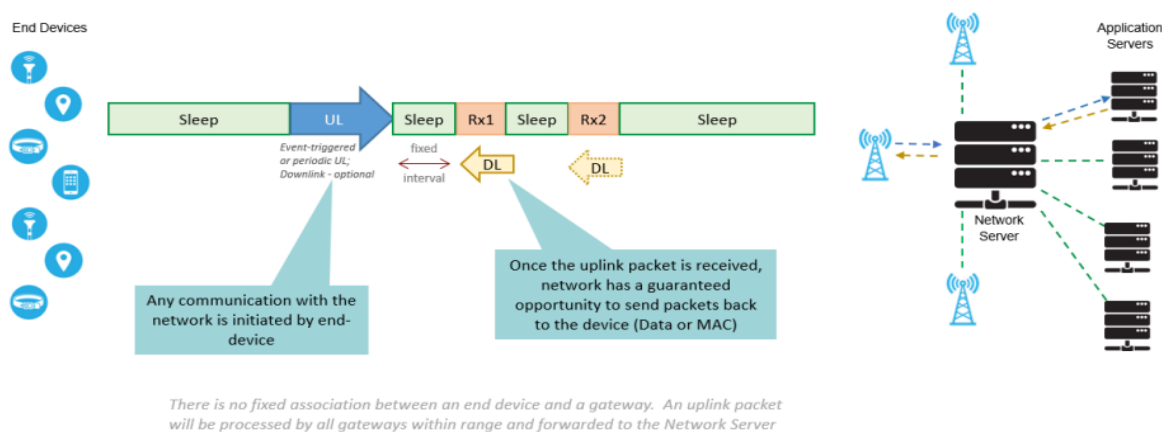


Figura 43. Operação de um dispositivo final *Classe A*.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

Portanto, após o envio de uma mensagem de *Uplink*, um dispositivo *Classe A*, volta a “dormir”, acordando pouco depois, para abrir uma pequena janela de Recepção *Rx1*, durante a qual ele tentará “escutar” o meio, à procura de algum sinal de preâmbulo, que normalmente antecede a recepção de quadros de dados. Se detectar sinal de preâmbulo, permanecerá com a janela *Rx1* aberta o tempo que for necessário para demodular totalmente o quadro de dados que chegou. Depois, fecha a janela *Rx1* e não abre mais a janela *Rx2* pois a probabilidade de receber mensagens de *Downlink* em ambas as janelas *RX1* e *Rx2* é quase nula, e, assim, volta a “dormir”, só despertando novamente quando for transmitir alguma outra mensagem de *Uplink* para a rede. Por outro lado, se não identificar nenhum sinal de preâmbulo na janela *Rx1*, a encerra, em seguida, e volta a “dormir”, despertando, pouco depois, para abrir a janela *RX2*. Novamente, se detectar sinal de preâmbulo, permanecerá com a janela *Rx2* aberta o tempo que for necessário para demodular totalmente o quadro de dados que chegou. Entretanto, se não houver a recepção de qualquer mensagem de *Downlink*

proveniente da rede, ele encerrará a janela *Rx2* e voltará a “dormir”, só vindo a despertar de novo quando desejar realizar uma nova transmissão de *Uplink* para a rede. A Figura 44 ilustra a recepção de mensagens de *Downlink* por um dispositivo final *Classe A*.

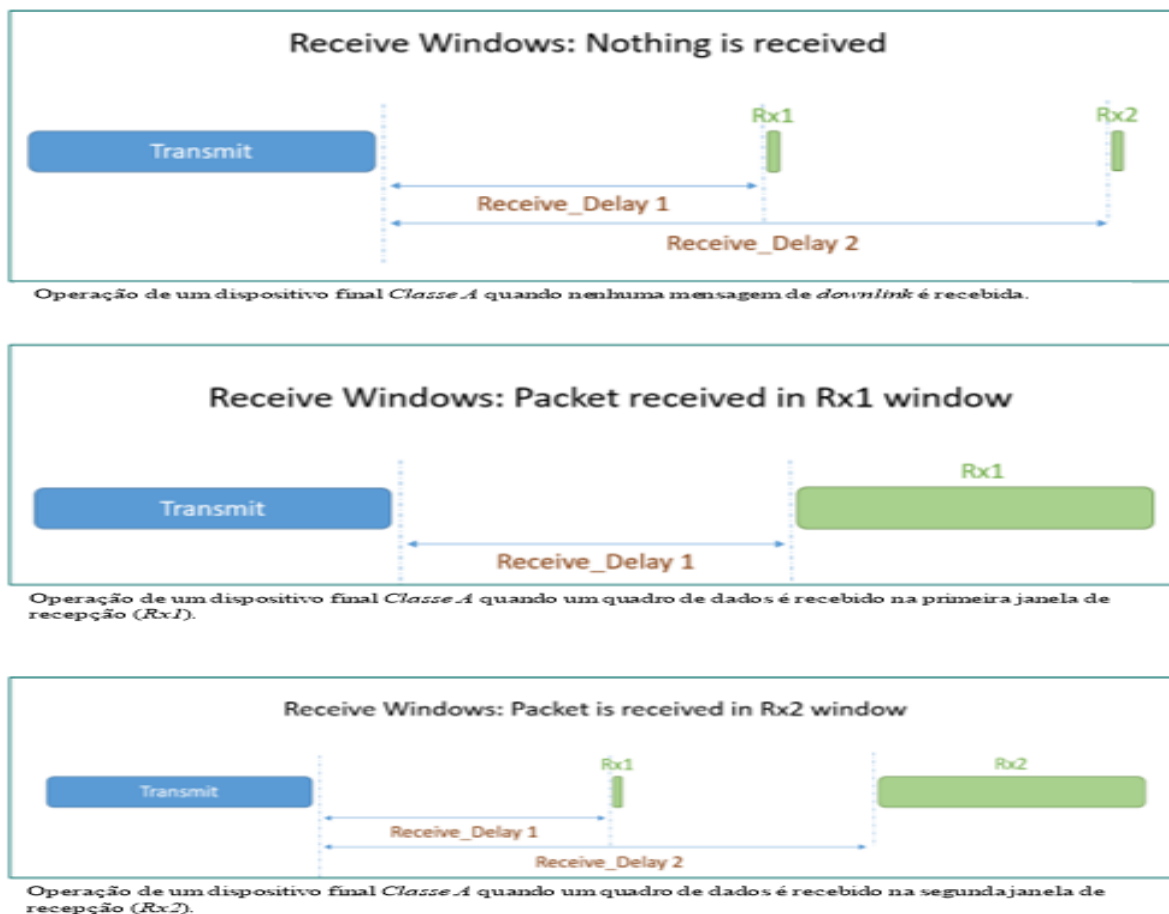


Figura 44. Recepção de mensagens de *Downlink* por um dispositivo final *Classe A*.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

Com relação às frequências de rádio e taxas de dados utilizadas, deve ser mencionado que o sinal de *Downlink* que ocorre durante a janela *Rx1* possui uma frequência que é função da frequência do sinal de *Uplink*, e uma taxa de dados que é, também, função da taxa de dados deste sinal (*uplink*). Esta dependência varia de acordo com a região (país) considerada. Por sua vez, o sinal de *Downlink* que ocorre durante a janela *Rx2* possui uma frequência e uma taxa de dados que podem ser configuradas através do uso de comandos MAC específicos [26].

As mensagens, em uma rede LoRaWAN, encaminhadas pelos dispositivos finais para os servidores de rede ou de aplicações e vice-versa podem ser do tipo *confirmado* ou *não confirmado*. Assim, quando um elemento da rede (dispositivo final, servidor de rede ou

servidor de aplicação) envia para algum outro uma mensagem *não confirmada*, ele, obviamente, não requer confirmação por parte deste. Já, quando a mensagem transmitida é do tipo *confirmado*, o remetente fica aguardando a confirmação por parte do destinatário. Como nesta rede mensagens de *Downlink* constituem-se em um recurso de certo modo escasso, as *mensagens confirmadas* devem ser utilizadas com certa parcimônia, preferencialmente para dados de sensores considerados muito importantes [26].

Como exemplo de *mensagens confirmadas* e *não confirmadas*, a Figura 45 mostra um sensor cardíaco transmitindo para um servidor de aplicação mensagens criptografadas do tipo *não confirmado* (os três retângulos e linhas tracejadas azuis partindo destes, no lado esquerdo do diagrama), as quais são recebidas por dois *gateways*. Estes, por sua vez, adicionam metadados criptografados às mensagens e as encaminham para o servidor de rede, que, então, os descriptografa e, a seguir, envia os quadros de dados para o servidor de aplicação, que, finalmente, recupera os dados, depois de descriptografá-los. Logo depois, o sensor cardíaco envia um sinal de alerta (primeiro retângulo mais à esquerda, em laranja) na forma de uma *mensagem confirmada*. Depois de decorrido um certo intervalo de tempo e não ter recebido uma confirmação, o sensor cardíaco envia outro sinal de alerta também como *mensagem confirmada* (retângulo em laranja do meio). Como novamente não recebe qualquer confirmação, o sensor envia um terceiro sinal de alerta (retângulo em laranja mais à direita) igualmente como *mensagem confirmada*. Finalmente, o servidor de aplicação transmite um sinal de confirmação para o sensor cardíaco através do servidor de rede, que direciona tal confirmação para o *gateway* mais adequado, o qual a entrega para o sensor [26].

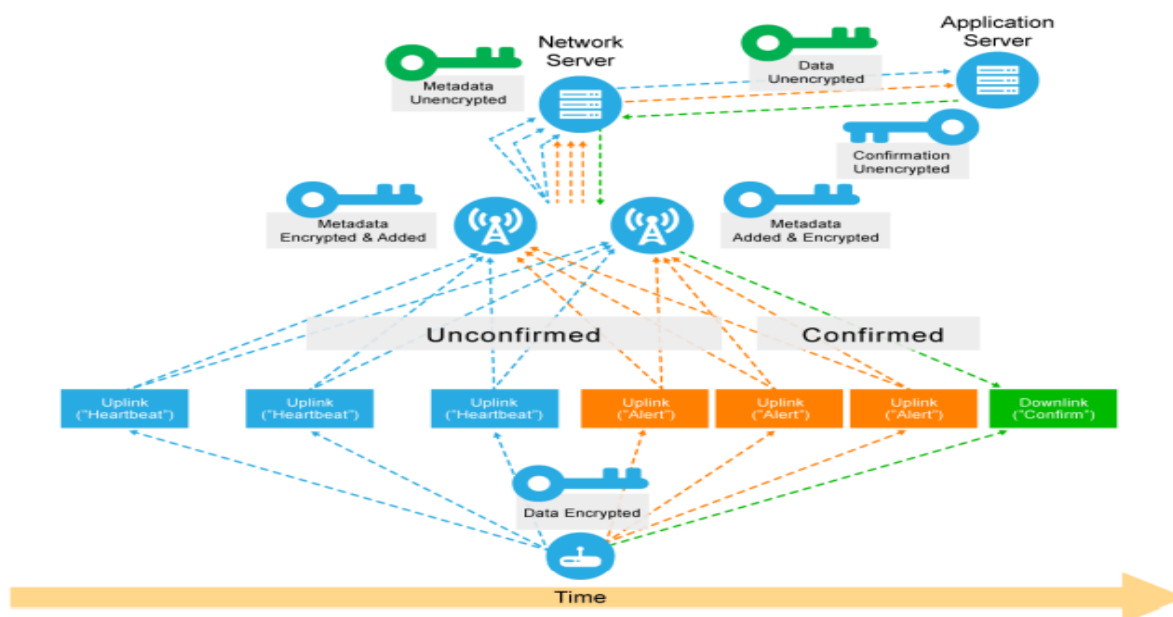


Figura 45. Um dispositivo final Classe A enviando para a rede mensagens confirmadas e não confirmadas.
Fonte: SEMTECH Corporation [26].

Deve ser dito que, quando o dispositivo final é de *Classe A*, toda mensagem de *Downlink* destinada a ele, seja de confirmação ou não, somente deverá ser entregue durante as janelas de recepção *Rx1* ou *Rx2*, caso contrário, ela (mensagem) será ignorada, conforme já mencionado.

- Dispositivos Finais *Classe B*

Os dispositivos finais que operam na *Classe B*, em vez de abrir apenas duas janelas de recepção, *Rx1* e *Rx2*, como o fazem os da *Classe A*, após cada transmissão de *Uplink*, caracterizam-se por abrir, periódica e indefinidamente ao longo do tempo, diversas janelas de recepção (*ping slots*), durante as quais “escutam” o meio, à procura de sinais provenientes da rede. Como consequência deste comportamento, o consumo de energia dos dispositivos *Classe B* é mais elevado do que os da *Classe A*, mas isto permite que a rede possa se comunicar com eles em um número maior de ocasiões. Além disso, os dispositivos *Classe B* devem ter condições de operar em *Classe A*, embora não simultaneamente.

Para que o modo de comunicação em *Classe B* funcione, é necessário que a rede envie periodicamente, através dos *gateways*, quadros de sincronização de tempo dos nós (dispositivos finais) chamados de *beacons*, conforme esboçado na Figura 46. Assim, cada dispositivo final deve periodicamente receber um destes quadros de sincronização (*beaconing process*), de modo que possa alinhar o seu relógio interno ao da rede, a fim de determinar os instantes exatos em que deve abrir e fechar cada janela de recepção [10].

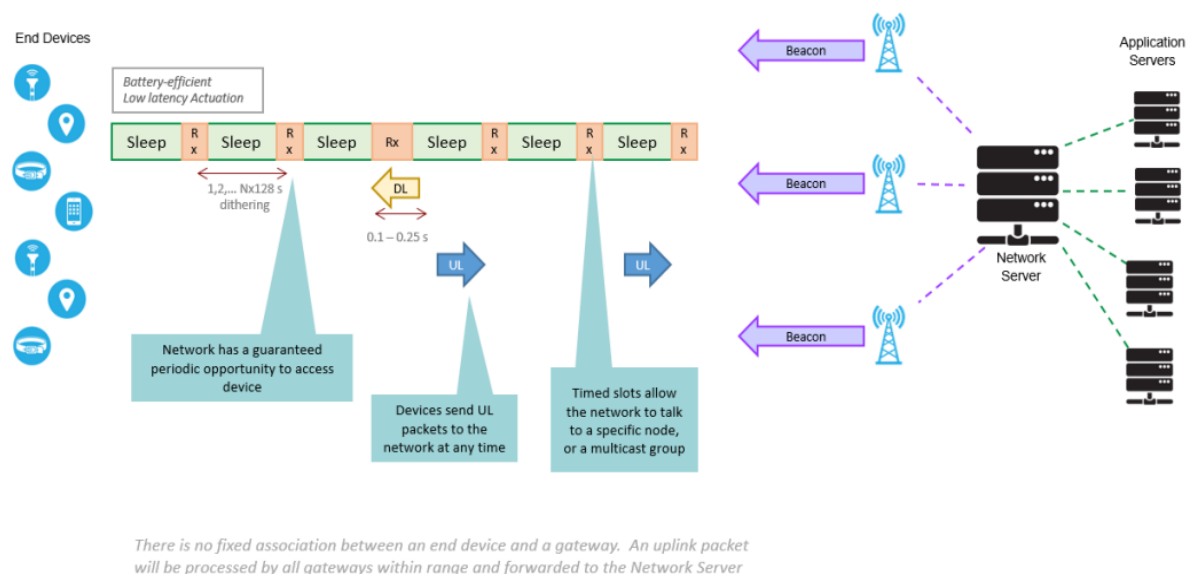


Figura 46. Processo de envio de quadros de sincronização (beacons) para dispositivos finais *Classe B*.
Fonte: SEMTECH Corporation [10].

Cumprе destacar que os dispositivos *Classe B* não precisam processar cada quadro de *beacon* se os seus relógios internos já estiverem alinhados ao da rede. Na maioria dos casos, fazer a sincronização algumas vezes ao longo do dia é suficiente, o que traz um mínimo impacto à duração da bateria, nos dispositivos finais, como ilustrado na Figura 47, na qual é mostrado que a rede envia, a cada 128 s, um quadro de *beacon*, o que resulta, portanto, na transmissão de 675 quadros de sincronização (*beacon*) por dia ($675 \times 128 \text{ s} = 86.400 \text{ s} = 24 \text{ h}$) [10].

Para que uma rede LoRaWAN admita dispositivos finais *Classe B*, é necessário que todos os seus *gateways* possuam um receptor GPS, para o fornecimento de quadros de *beacon* para sincronização dos dispositivos.

Como todos os *gateways* transmitem de forma sincronizada quadros de *beacon* através do mesmo canal de frequência e usando os mesmos parâmetros de rádio, um dispositivo *Classe B* que esteja ao alcance de vários deles irá receber a superposição de vários quadros de *beacon*, todos chegando com diferentes atenuações e distorções de fase. Assim, para que o dispositivo final consiga, então, demodular estes quadros superpostos com o mínimo de interferência possível, os *gateways* devem, sincronizadamente, enviar seus quadros de *beacon* com variações temporais (*timing jitter*) inferiores a $1,0 \mu\text{s}$, de modo que a superposição deles na antena do dispositivo final se assemelhe à chegada de um único quadro de *beacon* sofrendo de degradação de sinal por multicaminhos e possam, assim, ser demodulados [27].

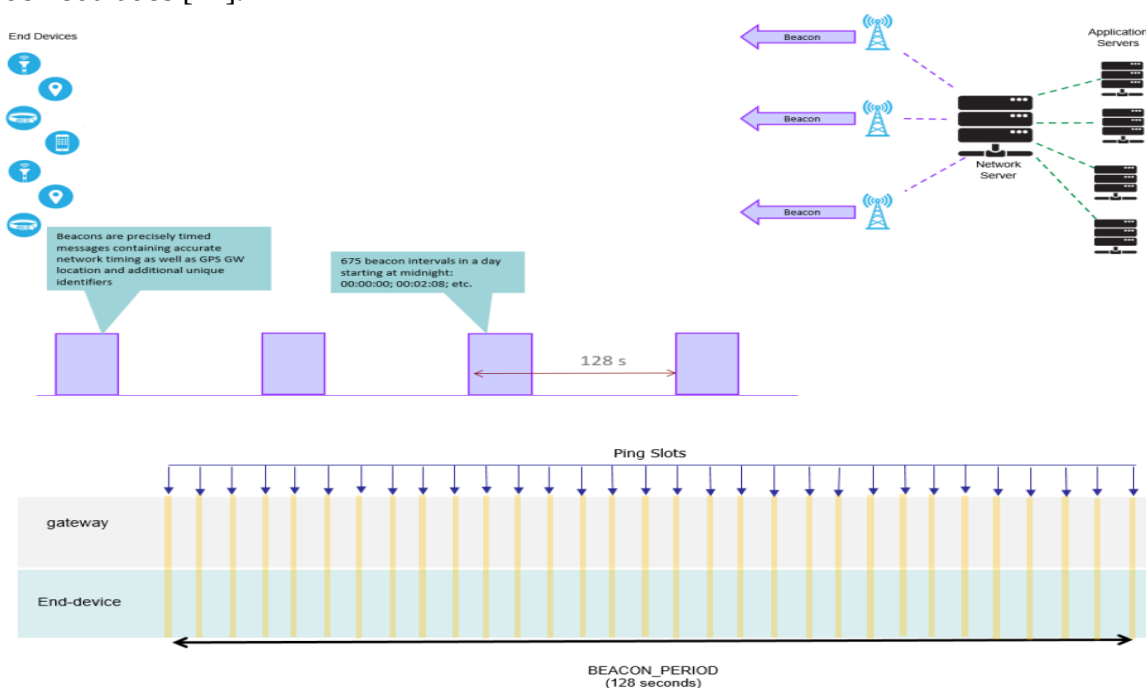


Figura 47. Envio periódico de quadros de *beacon* para a sincronização de dispositivos finais *Classe B*.

Fonte SEMTECH Corporation [10].

Portanto, tomando os quadros de *beacon* como referência de tempo, os dispositivos finais *Classe B* têm condições de abrir, periodicamente, janelas de recepção (*ping slots*), as quais podem ser usadas pela rede para transmissões *Downlink*, como esboçado na Figura 48.

Deve ser destacado que um dispositivo final *Classe B* deve ser capaz de operar, também, na *Classe A* pois, ao entrar em uma rede LoRaWAN, começa a atuar como um dispositivo *Classe A*. Para mudar o seu modo de operação da *Classe A* para a *B*, ele deve, antes, receber um quadro de *beacon*, para sincronizar o seu relógio interno com o da rede. Depois disso, ao mudar para a *Classe B* e já operando nela, ele deve permanecer com o seu relógio alinhado ao da rede [35].

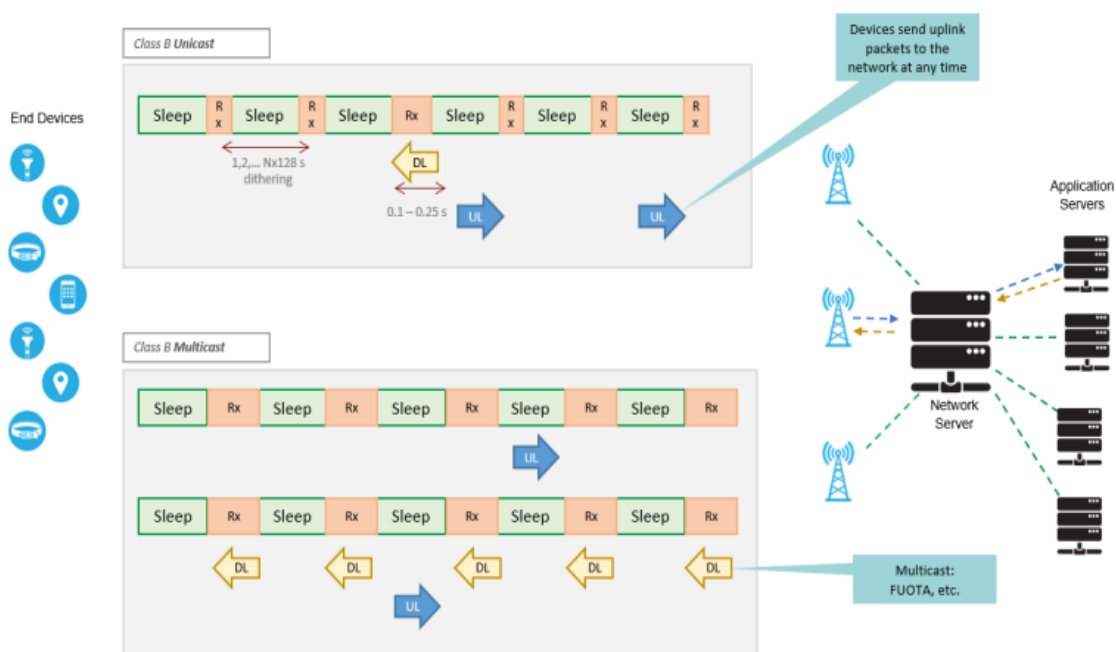


Figura 48. Janelas de recepção (*ping slots*) para dispositivos finais *Classe B*.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

A Figura 49 ilustra a recepção de quadros de *beacon* por um dispositivo final, encaminhados por *gateways* próximos, bem como mensagens de *Downlink* enviadas pela rede e recebidas durante as respectivas janelas de recepção (*ping slots*).

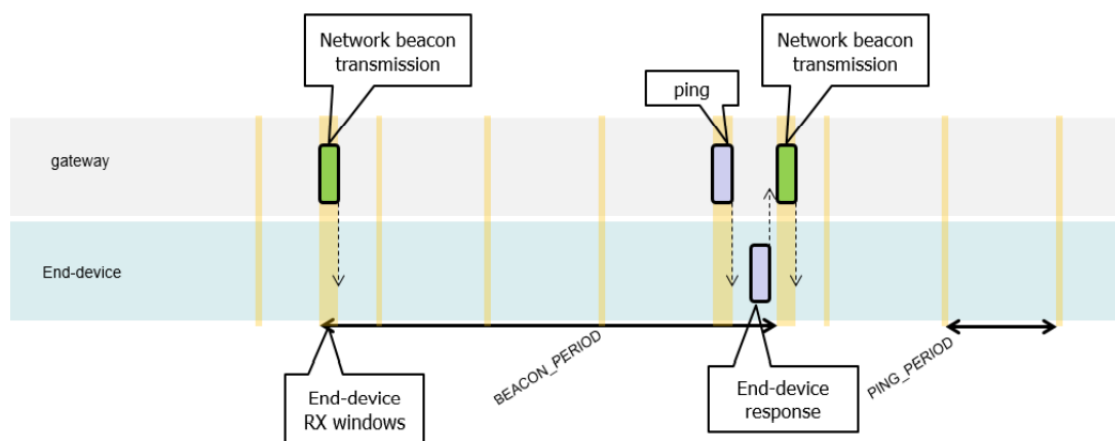


Figura 49. Janelas de recepção de quadros de *beacon* e mensagens de *Downlink* (*ping slots*) por dispositivos finais *Classe B*.

Fonte: SEMTECH Corporation [35].

Entretanto, um dispositivo final operando na *Classe B* pode ficar, temporariamente, sem receber quadros de *beacon* por diversos motivos, como interferências, ou devido ao fato de o dispositivo mover-se para fora da área de cobertura da rede, retornando a ela posteriormente etc. Quando o dispositivo deixa de receber, por alguns instantes, quadros de *beacon*, ele passa a tomar como referência apenas o seu relógio interno para continuar abrindo sincronizadamente as janelas de recepção (*ping slots*). A especificação LoRaWAN requer que os dispositivos finais que operam na *Classe B* sejam capazes de atuar neste modo sem a presença de quadros de *beacon* por até 2 horas. Este processo é chamado de *operação sem beacon* (*beaconless operation*). Durante este período, se chegar ao dispositivo um quadro de *beacon*, ele estenderá a *operação sem beacon* por outras duas horas [35].

Ao deixar de receber, temporariamente, quadros de *beacon*, o dispositivo final *Classe B* gradativamente aumenta a duração das janelas de recepção de *beacons* e de mensagens de *Downlink* (*ping slots*) a fim de compensar possíveis desvios em sua referência de tempo, fornecida pelo seu relógio interno em relação à da rede. Assim, quanto maior for a precisão do relógio do dispositivo final, menor será a ampliação destas janelas de tempo, minimizando o consumo de energia elétrica. Portanto, a acurácia dos relógios internos dos dispositivos finais que operam em *Classe B* é um requisito muito importante [35].

Se um dispositivo final que opera em *Classe B* ficar sem receber quadros de *beacon* por um período contínuo de 2 horas, no instante seguinte ele voltará, automaticamente, a atuar como dispositivo *Classe A* [35].

- Dispositivos Finais *Classe C*

Os dispositivos finais *Classe C* são aqueles que permanecem “acordados” durante todo o tempo, sempre “ouvindo” o meio, à espera de mensagens de *Downlink* da rede, exceto nos momentos em que estão transmitindo mensagens de *Uplink* para esta. Consequentemente, possuem um considerável consumo de energia e, portanto, não costumam ser alimentados por baterias. Por outro lado, apresentam a menor latência (intervalo de tempo entre uma requisição e a sua resposta) em suas comunicações com os servidores de rede ou de aplicações. Geralmente são utilizados em iluminação de ruas, medidores elétricos, sinais de trânsito etc. [37].

Os dispositivos finais *Classe C* implementam as mesmas duas janelas de recepção, *Rx1* e *Rx2*, que os dispositivos *Classe A*, mas com a particularidade de manterem a janela *Rx2* aberta indefinidamente, só a encerrando quando forem fazer uma transmissão de *Uplink* para a rede. Logo, os dispositivos *Classe C* podem receber mensagens de *Downlink* da rede na janela *Rx2* quase em qualquer momento. A Figura 50 mostra um esboço de um dispositivo operando em *Classe C*. Como pode ser observado, após o termino da transmissão de uma mensagem de *Uplink* para a rede, o dispositivo *Classe C* abre uma pequena janela de recepção entre o término desta transmissão e o início da janela *Rx1*, durante a qual opera com a mesma frequência de rádio e taxa de dados utilizados na janela *Rx2*.

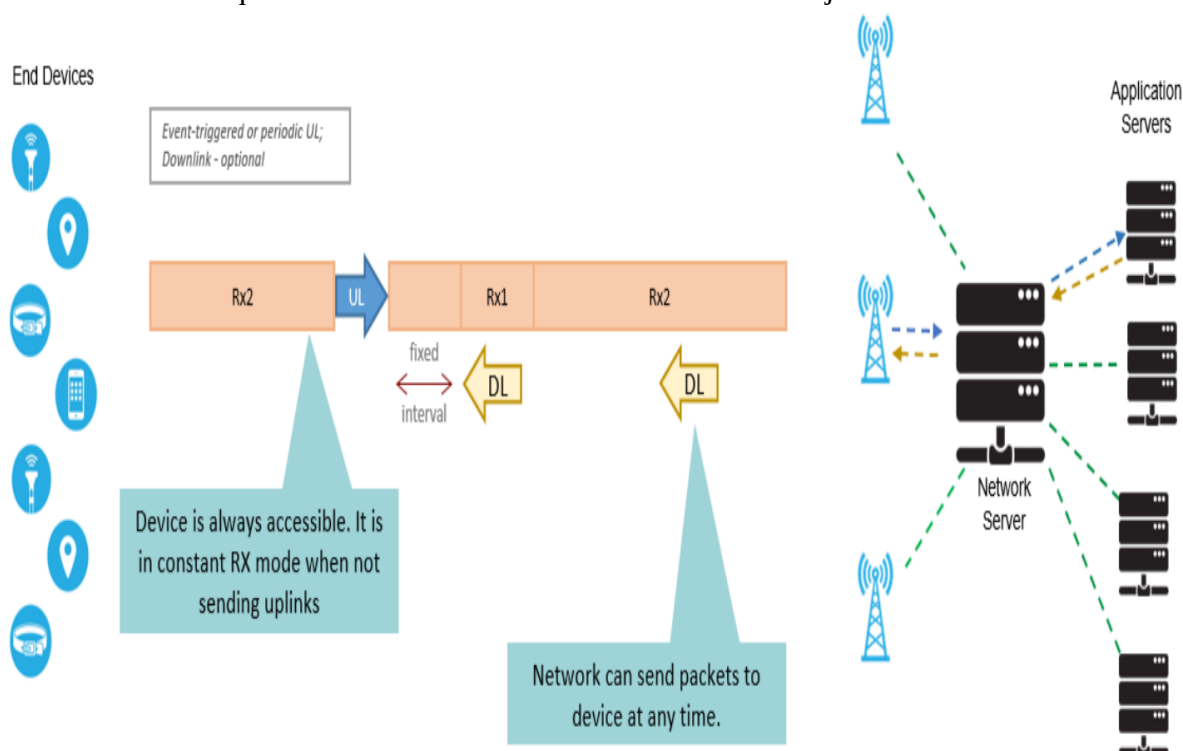


Figura 50. Um dispositivo operando em *Classe C*.

Fonte: SEMTECH Corporation [10].

Portanto, os dispositivos finais *Classe C* são usados nas situações em que não é necessário haver um consumo de energia muito baixo, mas a latência (intervalo de tempo entre uma requisição e a sua resposta) deve ser minimizada. O servidor de aplicação determina que estará lidando com um dispositivo final *Classe C* durante o processo de entrada deste na rede (*join procedure*) [41].

Algumas das principais características dos dispositivos finais *Classe C* são:

- possuem um consumo de energia muito maior do que o dos dispositivos *Classe B*, os quais, por sua vez, apresentam um consumo mais elevado do que os da *Classe A*.
- apresentam a menor latência das três Classes.
- devem ser capazes de operar, também, em *Classe B* e *Classe A*, mas não de modo simultâneo.

Um dispositivo final *Classe A* ou *Classe B* pode ser alterado para atuar, temporariamente, por alguns minutos, na *Classe C*. Este procedimento pode ser utilizado para atualizações de *firmware* à distância, em dispositivos alimentados por bateria, através do processo *FUOTA* (*Firmware Updating Over-The-Air*). A Figura 51 mostra um outro esboço das janelas de recepção em um dispositivo final *Classe C*, na qual as constantes *RECEIVE_DELAY1* e *RECEIVE_DELAY2* especificam, respectivamente, os intervalos de tempo decorridos entre o término de uma transmissão de *Uplink*, do dispositivo para a rede, e os inícios das janelas de recepção *Rx1* e *Rx2*. Seus valores são configurados por meio de comandos MAC.

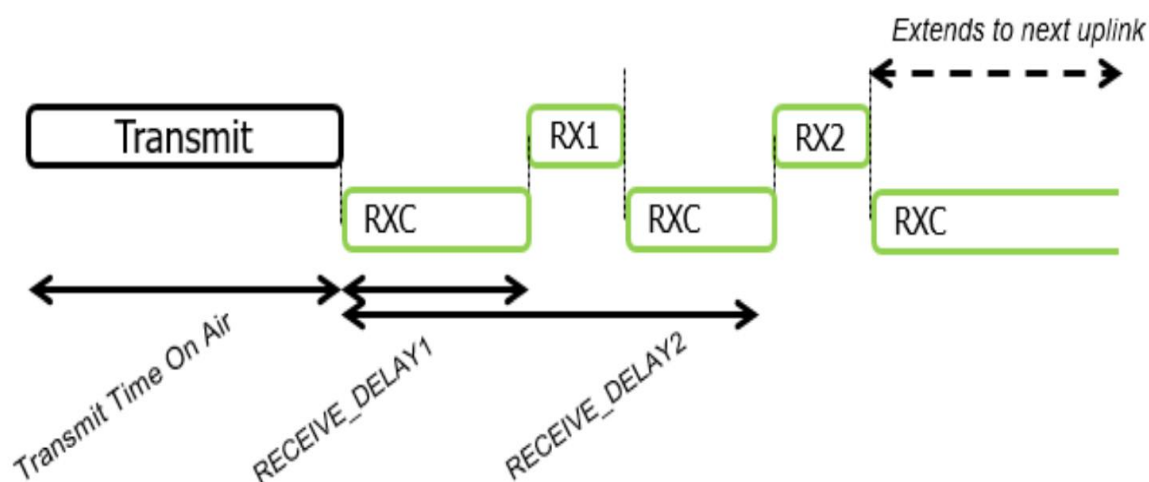


Figura 51. Janelas de recepção em um dispositivo operando em *Classe C*.

Fonte: SEMTECH Corporation [41].

2.7.9 Estrutura básica dos quadros LoRa

As mensagens LoRa utilizam o chamado *modo explícito de cabeçalho do pacote* pelo qual são incluídos um cabeçalho físico LoRa (PHDR) e um campo de checagem de erros do cabeçalho (PHDR_CRC). No modo explícito de cabeçalho, o campo PHDR armazena o comprimento da carga útil (*payload*) em *bytes*, havendo um campo para a taxa de correção de erro progressiva (*forward error correction rate*) e, também, a presença de um campo CRC (*Cyclic Redundancy Check*) opcional para a carga útil [29]. Então, a integridade desta (carga útil) é protegida por um campo CRC em mensagens de *Uplink*. Os campos PHDR, PHDR_CRC e CRC da carga útil são inseridos pelo transceptor. A Figura 52 mostra um esboço da estrutura LoRa PHY.

Size	8 Symbols	4.25 Symbols	8 Symbols		L bytes (from PHDR)	2 Bytes
Packet Structure	Preamble	Synchronization Word	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload	CRC (uplink only)

Figura 52. Estrutura de um quadro LoRa (LoRa PHY).

Fonte: LoRa Alliance RP002-1.0.2 [51].

Beacons LoRaWAN, por sua vez, são transmitidos através de modulação LoRa em modo implícito de cabeçalho, com um comprimento fixo. No modo implícito de cabeçalho, os campos PHDR e PHDR_CRC não estão presentes.

No *Apêndice A – Detalhamento dos Quadros LoRa e Beacon* é feita uma análise dos campos que os compõem.

Capítulo 3 - Trabalhos Relacionados

Dentre os diversos trabalhos relacionados a redes *LoRa Mesh*, pode ser, inicialmente, citado o desenvolvido por Ebi *et al.* [59], que propuseram uma rede *LoRa Mesh* para uma localidade de Zurique, Suíça, constituída por 62 sensores distribuídos acima e abaixo da superfície da área controlada, os quais monitoravam chuvas, níveis d'água de rios e esgotos, condutividade elétrica em transbordamento de açudes, temperatura do ar e do esgoto, e o nível dos lençóis freáticos. Os dados gerados eram coletados por três *gateways* LoRaWAN.

O que motivou a criação desta rede em malha foi o fato de que tentou-se, antes, instalar uma rede LoRaWAN comum, mas a taxa de erros de pacotes obtida era de até 10% para os sensores posicionados acima da superfície, e de até 30% para aqueles situados em instalações subterrâneas.

Então, os pesquisadores planejaram uma nova arquitetura e conceito de rede em malha para controle de acesso ao meio, mostrada na Figura 53, chamada de *rede em malha síncrona*. Esta rede era composta por nós repetidores intermediários (*Repeater Nodes, RN*), que permitiam a formação de subredes individuais, atuando como *gateways*/concentradores dos agrupamentos (*clusters*) de nós sensores (SN). Nesta figura, as linhas tracejadas entre nós sensores (SN) indicam possíveis caminhos alternativos para o tráfego de pacotes.

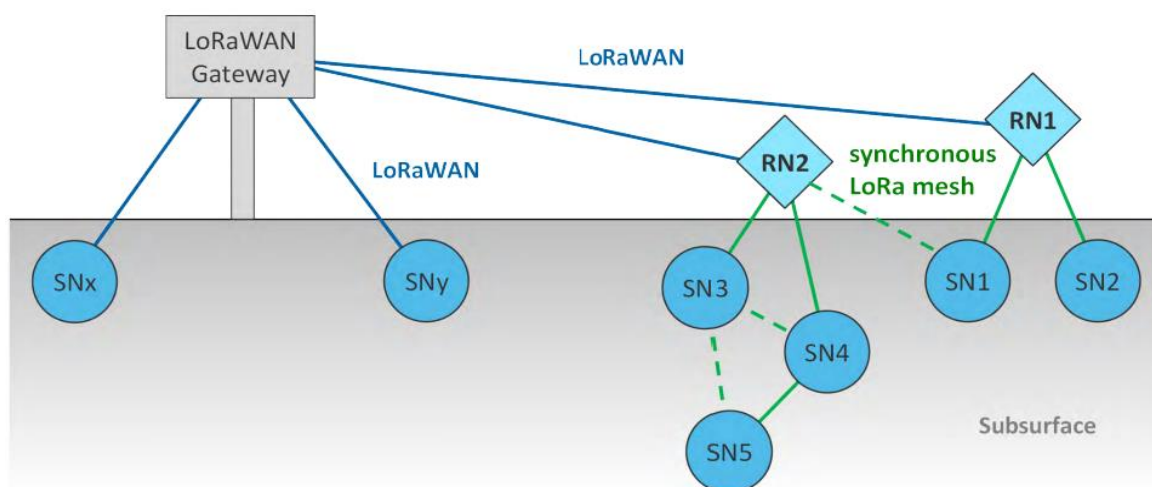


Figura 53. Rede *LoRa MESH* Síncrona, proposta para uma região de Zurique, Suíça.

Fonte: Ebi *et al.* [59].

Os repetidores de rede (RN) ficavam localizados acima da superfície e tinham conectividade com o *gateway* mais próximo. Além disso, atuavam como nós raízes dos respectivos nós sensores filhos, remotamente posicionados além da cobertura de uma rede LoRaWAN comum. Assim, os pesquisadores estenderam a arquitetura original de uma rede LPWAN em estrela para uma topologia hierárquica em malha, permitindo a ocorrência de transmissões multissalto, maior flexibilidade de roteamento e ampliando a cobertura. Ao invés dos *gateways* comuns, que normalmente são alimentados por corrente alternada, os nós repetidores (RN) operavam com baterias e não necessitavam de acesso à Internet.

A Figura 54 ilustra o diagrama do *hardware* utilizado em cada nó, composto, basicamente, por quatro partes principais: (1) sistema de suprimento de energia, (2) microcontrolador e periféricos, incluindo as interfaces de sensor, (3) a parte de rádio e (4) o *firmware*.

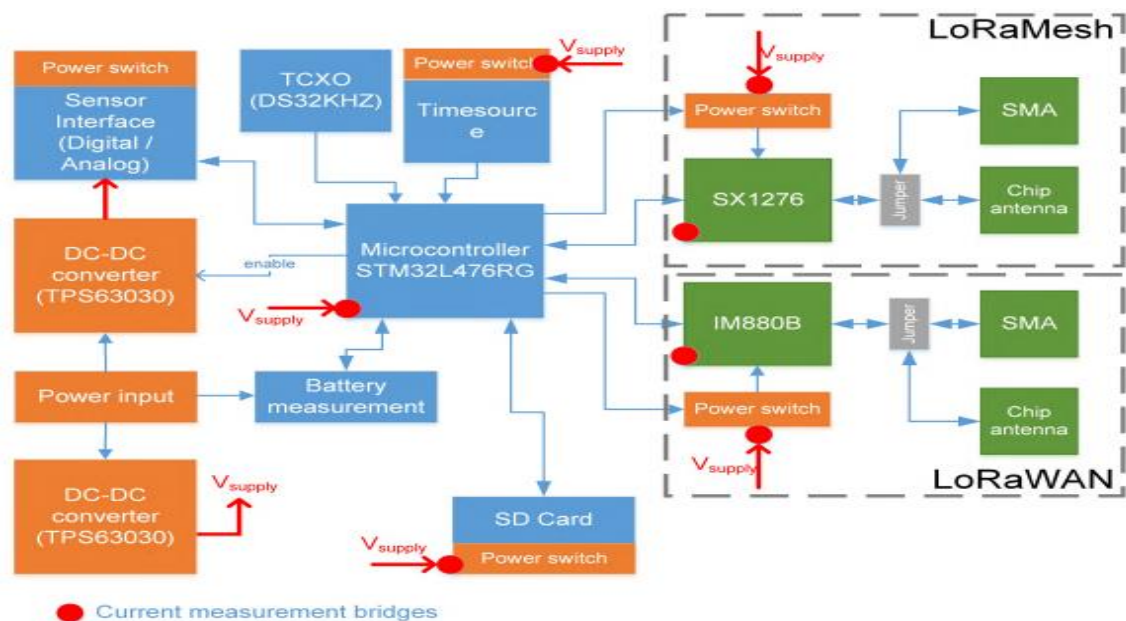


Figura 54. Diagrama em blocos de um nó da rede *LoRa MESH* projetada.

Fonte: Ebi et al. [59].

Em relação ao suprimento de energia, dois conversores DC-DC proporcionavam dois caminhos separados de fornecimento de energia. Enquanto um dos conversores fornecia energia para a interface de sensor, o outro alimentava o microcontrolador e todos os demais componentes. Esta configuração permitia uma grande flexibilidade para desligamentos de energia, além de oferecer a infraestrutura para a medição individual de energia de cada componente. Cada periférico podia ser separado do fornecimento de energia através de

interruptores de energia (*power switches*), evitando-se que consumisse energia quando não estivesse em uso. A minimização do consumo de energia foi um dos requisitos mais observados no projeto, a fim de permitir a operação do dispositivo por um longo tempo, de pelo menos um ano, com o mínimo possível de manutenção. Quanto à unidade microcontroladora, a parte principal da seção de controle era uma *CPU ST Microelectronics STM32L476RG CPU*, com um núcleo *ARM Cortex-M4*, otimizada para aplicações de baixo consumo de energia. Um oscilador a cristal compensado por temperatura (TCXO) fornecia um sinal digital de relógio preciso na frequência de 32,768 kHz, com uma acurácia de $\pm 7,5$ ppm. Na parte de radiofrequência, havia dois transceptores separados, um para as comunicações da chamada subrede *LoRa Mesh* síncrona, e outro para as referentes à subrede LoRaWAN. Embora um único transceptor pudesse se encarregar de ambas as comunicações, disponibilizar dois deles foi uma decisão prática de projeto e não por necessidade técnica. Por último, o *firmware* utilizado foi baseado no sistema operacional livre em tempo real *FreeRTOS*, responsável por controlar a temporização dos diversos processos. Atualmente duas tarefas diferentes foram implementadas. Uma *tarefa de execução* controla a operação durante a fase ativa dos ciclos, enquanto que uma *tarefa de ociosidade* é ativada durante as fases de inatividade deles. Esta última controla as características de baixa energia do microcontrolador (MCU).

Adnan *et al.* [60] apresentaram uma rede *LoRa Mesh* para a detecção de incêndios em uma floresta sazonal da Indonésia. Cada nó da rede era composto por um sensor DHT11, para medição de temperatura e umidade, um sensor MQ2, para detecção de fumaça, ambos conectados a um Arduino Uno, e uma placa para ligação de um módulo LoRa ao Arduino. O rádio operava na frequência ISM de 915 MHz, com uma antena com ganho de 3 dBi. A Figura 55 mostra a configuração.

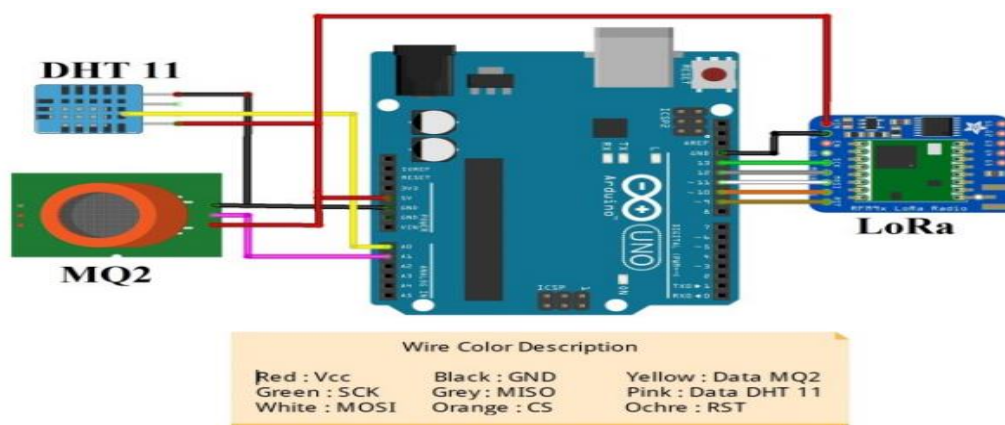


Figura 55. Configuração de cada nó da rede *LoRa MESH* para detecção de incêndios florestais na Indonésia.
Fonte: Adnan *et al.* [60].

Para o envio dos dados para a Internet, foi usado um *gateway* de baixo custo composto por uma placa *Raspberry Pi* e um *Dragino LoRa GPS Hat v1.4*. Foram instalados os *softwares Raspbian Stretch*, como sistema operacional, e *LowCostLoRaGw*, para as funções de *gateway*, que possuía uma antena com ganho de 5 dBi. A Figura 56 apresenta a arquitetura básica de conexão de cada nó sensor à Internet.

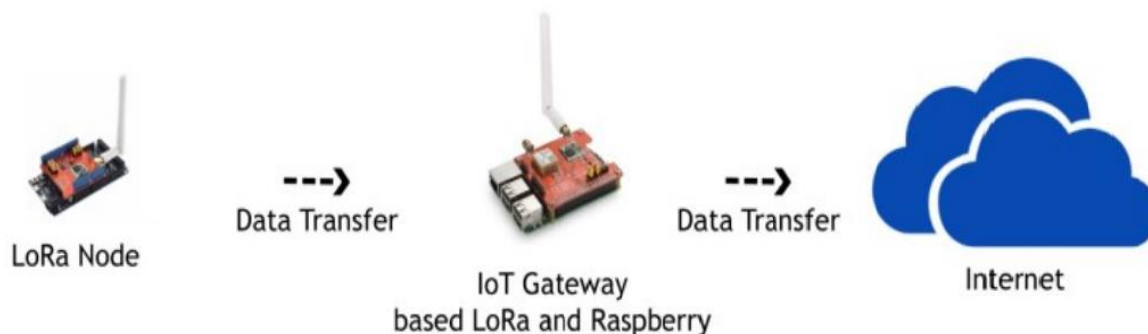


Figura 56. Arquitetura básica da rede *LoRa Mesh* utilizada para o envio de dados.

Fonte: Adnan *et al.* [60].

A Figura 57 ilustra o cenário da rede *LoRa Mesh* configurada, na qual pode ser observado que foram delineadas duas áreas, uma sem acesso à Internet, no interior da floresta, e outra onde era possível fazer contato com a nuvem.

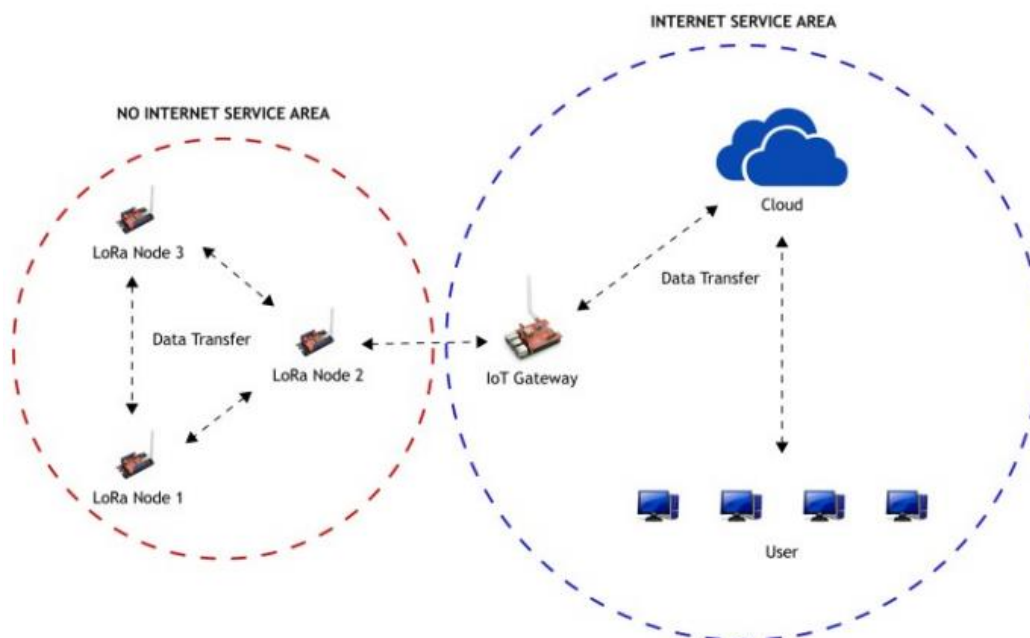


Figura 57. Cenário da rede *LoRa Mesh* configurada.

Fonte: Adnan *et al.* [60].

Os autores espalharam quatro nós no interior da floresta e, através das medições realizadas a cada 100 m, verificaram que a melhor configuração da rede *LoRa Mesh* ocorreu quando usaram uma largura de banda (BW) de 250 kHz, taxa de codificação (CR) igual a

4/5, fator de espalhamento (SF) igual a 10 e potência de transmissão igual a +10 dBm. Com estes valores, conseguiram enviar dados, com boa confiabilidade, dos nós sensores para o *gateway*, que estava situado a 500 m de cada sensor. Os sinais chegavam a ele com um nível RSSI em torno de (-) 136 dBm. A Figura 58 mostra uma vista aérea na qual estão assinaladas as posições de um *gateway* LoRa e de um nó sensor, ambos distantes 500 m entre si.

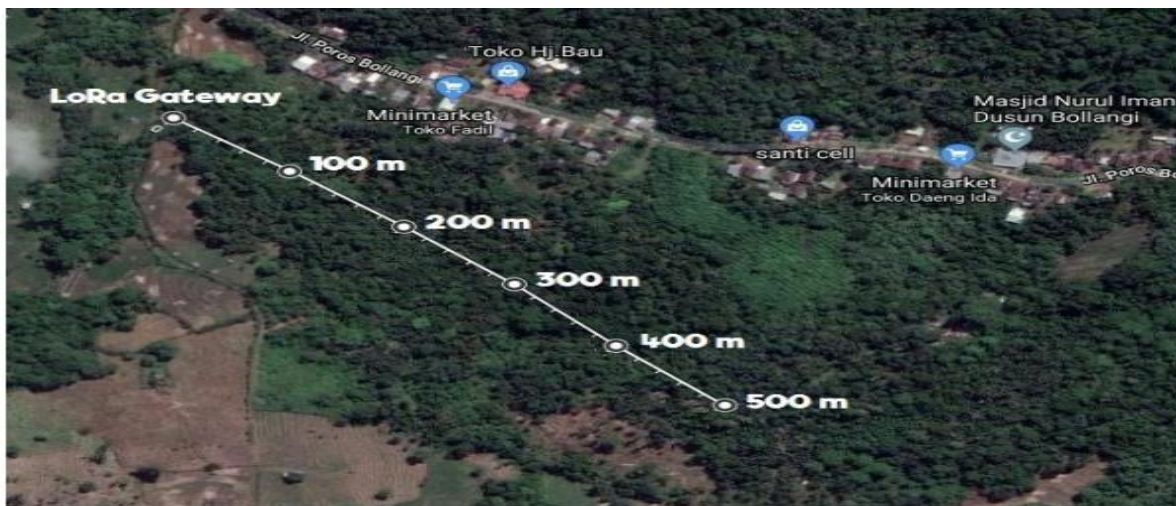


Figura 58. Localização do *gateway* e de um dos nós sensores da rede *LoRa Mesh*.

Fonte: Adnan *et al.* [60].

Berto *et al.* [61] propuseram uma rede *LoRa Mesh* que, sem se basear na tecnologia LoRaWAN, implementava uma comunicação ponto-a-ponto entre os nós, na qual não havia a utilização de *gateways*, estendendo o alcance daqueles (nós) através de comunicações multissalto. Em seu projeto, os autores decidiram eliminar a presença de *gateways* por entenderem, entre outras razões, que, em virtude de apresentarem um papel central nas redes LoRaWAN comuns, em caso de mal funcionamento ou falha, esses dispositivos poderiam comprometer a operação de toda a rede LPWAN.

A Figura 59 apresenta as camadas de rede do sistema, compostas, basicamente, por três estratos: (1) uma camada física, baseada no protocolo de comunicação padrão LoRa, (2) uma camada que englobava os serviços de enlace, rede e transporte, para endereçamento, roteamento e encaminhamento através da malha, e (3) uma camada de aplicação que oferecia uma interface para aplicações reais (acessadas, possivelmente, por redes externas), a qual incluía um *middleware* para tarefas de enfileiramento e definição de prioridades para as mensagens a serem transmitidas. As duas primeiras camadas faziam uso de uma biblioteca pública projetada para microprocessadores embarcados, chamada *RadioHead*.

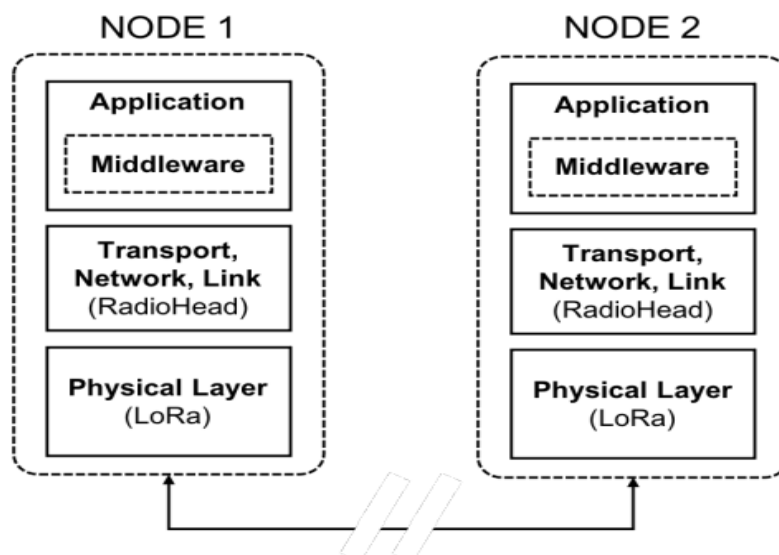


Figura 59. Camadas de rede propostas para comunicação ponto-a-ponto.
Fonte: Berto *et al.* [61].

A rede proposta considerava uma topologia totalmente conectada que permitia uma comunicação ponto-a-ponto entre os nós somente se a distância entre eles fosse menor do que D , raio da área circular de alcance do sinal de cada nó, como mostrado na Figura 60. Os nós situados a uma distância maior do que D poderiam ser alcançados através de comunicação multissalto se eles estivessem conectados a outros nós que pudessem retransmitir a mensagem (nós de cor violeta e preto na Figura 60), ampliando, assim, o alcance da rede como um todo.

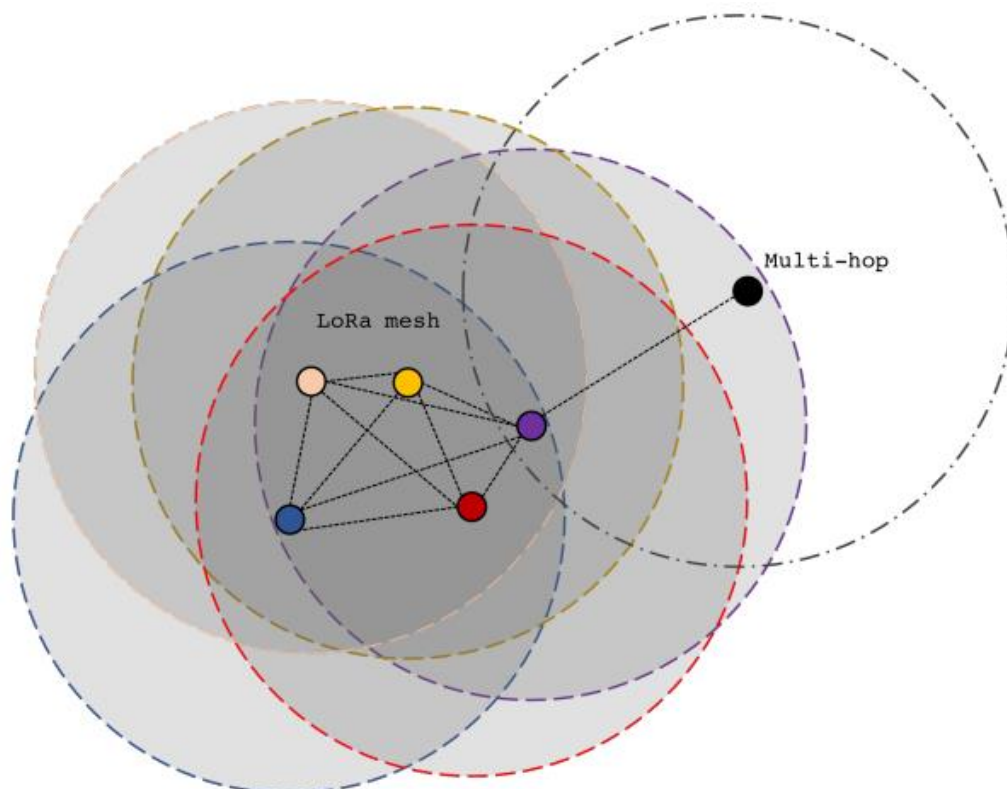


Figura 60. Rede ponto-a-ponto baseada na tecnologia LoRa em malha com capacidades multissalto.
Fonte: Berto *et al.* [61].

Os nós eram constituídos de dispositivos que apresentavam custo e consumo de energia baixos, baseados em uma placa microcontroladora que possuía embarcado um chip LoRa. Para a implementação, foi utilizado em cada nó uma placa ESP32 Heltec LoRa V2, que continha um transceptor Semtech SX1276 e uma antena externa com ganho de 3 dBi.

Andersen *et al.* [62] apresentaram o protótipo de uma rede *LoRa Mesh* para operações de um sistema de busca e resgate nas montanhas da Noruega, com foco em uma rede distribuída constituída por equipamentos de baixo custo, para monitoramento geográfico. Para isso, foi utilizado um protocolo proprietário de rede em malha, monitoramento pelo *Sistema de Posicionamento Global (GPS)*, um *gateway* para comunicação com a Internet, um servidor para armazenamento de dados e realização de análises, e uma aplicação Web para a visualização dos dados das posições monitoradas. Os dispositivos possuíam pequenas dimensões, permitindo que fossem carregados pelo pessoal da equipe a pé ou em veículos.

Como o protótipo previa a infraestrutura de *back-end* na nuvem, pelo menos um dos dispositivos da rede *LoRa Mesh* deveria ter acesso à Internet, atuando como um roteador de borda, que receberia coordenadamente os dados de toda a rede em malha e os encaminharia para uma base de dados, através de uma interface programável de aplicação (API), executada em um servidor web, o qual era responsável pelo armazenamento dos dados na base de dados, de forma persistente.

Uma aplicação *web front-end* disponibilizava os dados locais para consulta, assim como indicava as funções dos nós dentro da rede (para tarefas de depuração), histórico das posições ocupadas por eles (poder ativar / desativar um nó é uma importante recurso em uma aplicação de procura e resgate), bem como outros importantes metadados coletados pelo sistema, para uso pelo protótipo ou pelo protocolo.

A Figura 61 ilustra a arquitetura do sistema. Os círculos na cor verde representam roteadores na rede em malha. O círculo na cor laranja é um roteador de borda, tendo a função de encaminhar os dados da rede em malha para o servidor web que hospedava a interface API e a base de dados. Deve ser observado que, embora a figura mostre apenas um roteador de borda, poderia haver vários deles por questões de redundância. Na implementação realizada pelos autores, um roteador que estivesse dentro da área de ação de uma rede Wi-Fi com acesso à Internet, e conseguisse se conectar a ela, automaticamente se tornava um

roteador de borda, já que a rede proposta precisava ter em operação pelo menos um roteador desta classe para que o fluxo de dados coletados fosse transmitido para a base de dados. A rede em malha operava com dispositivos de baixo custo, enquanto que o restante do sistema foi desenvolvido para utilizar a Internet, através da API sendo executada no servidor web.

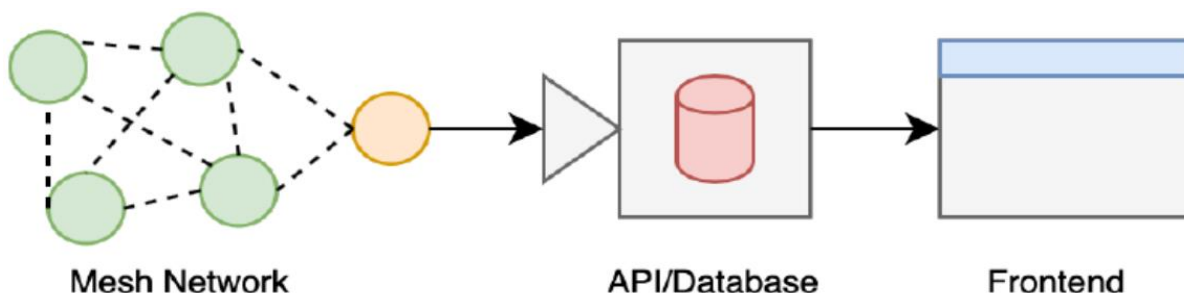


Figura 61. Arquitetura em alto nível do sistema que integrou o protótipo.

Fonte: Andersen *et al.* [62].

Abrardo *et al.* [63] propuseram um sistema de monitoramento pervasivo, para ser implantado em aquedutos medievais subterrâneos, chamados de sistema “Bottini”, que passam embaixo do centro de Siena, na região da Toscana, Itália. A área contém galerias subterrâneas com cerca de 25 km de extensão, no total, 170 cm de altura média e 90 cm de largura média. No chão, há um fluxo de água que corre em dutos abertos. As galerias não são perfeitamente retas, havendo diversas curvas suaves que bloqueiam linhas de visada direta em diversos trechos. A Figura 62 mostra, no lado (a), uma vista de uma das galerias do complexo de aquedutos “Bottini” e, no lado (b), uma das inscrições históricas presentes no local.



Figura 62. Vistas do interior de algumas das galerias do complexo de aquedutos subterrâneos “Bottini”.

Fonte: Abrardo *et al.* [63].

Ambientes subterrâneos são cenários dos mais desafiadores para o desenvolvimento de infraestruturas pervasivas de monitoramento. Além das dificuldades intrínsecas de posicionamento de itens em lugares remotos, dois dos mais críticos fatores a serem considerados são fornecimento de energia e comunicação de dados [63].

Inicialmente utilizando a tecnologia LoRa padrão, com rede em topologia estrela clássica, as medições iniciais feitas mostraram que o alcance dos sinais ficava limitado a 200 metros, tornando inviável, portanto, a sua adoção devido às grandes dimensões da área envolvida. A Figura 63 apresenta, na parte (a) a rede de galerias embaixo do centro da cidade de Siena, Itália, e, na parte (b), a seção escolhida para a realização de ensaios de transmissão de sinais LoRa, com comprimento aproximado de 500 m, a qual era parte integrante da galeria “Bottino Maestro di Fonte Gaia”, que tinha um comprimento total de 15 km e cuja função seria a de trazer água para a fonte localizada na praça principal (“Piazza del Campo”) da cidade de Siena, Itália.

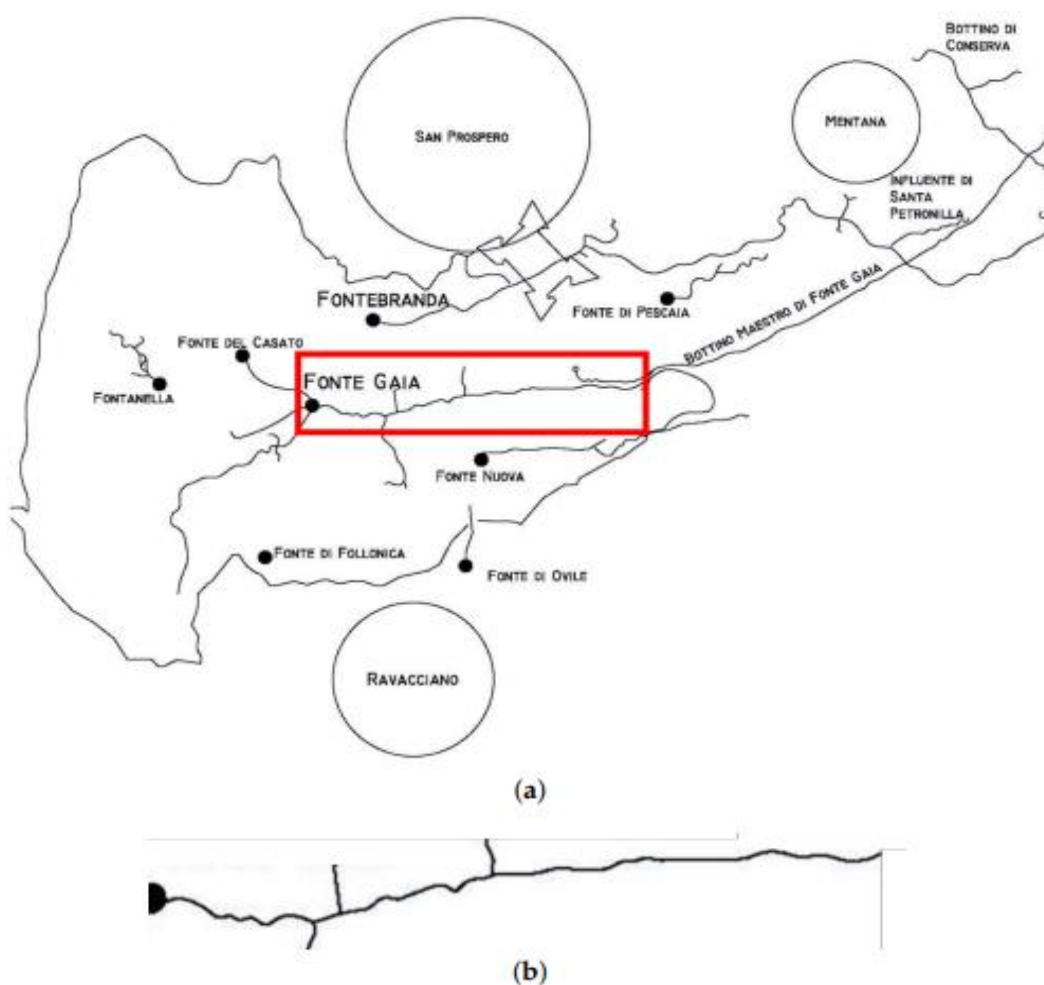


Figura 63. Mapa das galerias “Bottini”, embaixo do centro da cidade de Siena, Itália. Na parte (a), aparece, dentro do retângulo em vermelho, a seção onde foram realizados alguns testes. Em (b) esta seção está ampliada.

Fonte: Abrardo *et al.* [63].

A infraestrutura de testes LoRa era constituída pelos seguintes dispositivos:

- uma placa Arduino Uno com um módulo LoRa SX1272, conectada através de uma interface multiprotocolos para redes *ad hoc*, alimentada através de quatro pilhas alcalinas de lítio AA de 1,5 V, tendo a função de obter dados de um sensor de teste (um sensor de temperatura LM335, da empresa Texas Instruments); e
- Um *Wasp mote USB Gateway*, equipado com um módulo SX1272 e conectado a um laptop para a verificação em tempo real da transmissão de dados.

Para que se obtivesse o maior alcance de transmissão possível, foram configurados os seguintes valores para os parâmetros LoRa:

- Frequência central: 868,10 MHz;
- Largura de banda (BW): 125 kHz;
- Taxa de Codificação (CR): 4/5;
- Fator de Espalhamento (SF): 12; e
- Potência de saída: 14 dBm.

A Figura 64 ilustra, no lado (a), um módulo LoRa disposto no chão de uma das galerias e, no lado (b), a realização de medições de sinal pela equipe de pesquisadores.



Figura 64. Galerias “Bottini”, embaixo do centro da cidade de Siena, Itália. No lado (a), um módulo LoRa colocado no chão de uma das galerias. Em (b), medições de sinal pela equipe.

Fonte: Abrardo *et al.* [63].

As condições de propagação em ambientes subterrâneos estruturados em galerias são tipicamente caracterizadas por fortes perdas na intensidade dos sinais, as quais diminuem consideravelmente a cobertura do sinal de rádio. Então, os autores sugeriram a utilização de uma topologia linear de rede de nós, baseada em comunicações LoRa multissalto. Neste cenário, um esquema de transmissão *ad-hoc* foi apresentado, o qual procurava calcular o tempo de despertar de todos os nós da rede, de forma a ser minimizado o gasto médio de energia devido às diferenças de relógio existentes entre eles. Os resultados numéricos obtidos mostraram que a otimização desse tempo resultou, no melhor caso, em uma redução da ordem de 50% no gasto de energia em relação ao esquema em que este tempo era obtido de uma forma não-otimizada.

Na arquitetura de rede proposta pelos pesquisadores, em que era possível a ocorrência de multissaltos, cada nó foi implantado a uma distância de aproximadamente 150 m do anterior, numa topologia linear. Devido às limitações na transmissão de sinais, cada nó podia comunicar-se apenas com os dois vizinhos adjacentes, um de cada lado. Neste sistema, cada nó agia, simultaneamente, como um dispositivo final, que transmitia os seus próprios dados, e como um roteador, encaminhando os pacotes enviados por outros nós, formando, assim, uma cadeia, do nó mais afastado ao *gateway* e vice-versa, através de diversos saltos.

A Figura 65 apresenta os dois tipos de nós presentes na rede proposta. O lado (a) mostra um *gateway*, cuja função era receber os pacotes enviados pelos nós sensores e enviá-los para o centro de coleta de dados através de um módulo rádio GSM. Além disso, ele (*gateway*) era alimentado por fonte de energia de corrente alternada, possuía, ainda, um módulo rádio LoRa, para comunicação com os nós da rede em malha, e uma unidade microcontroladora. O lado (b) ilustra um nó sensor, alimentado por bateria, e equipado com unidades sensora e microcontroladora, e um módulo LoRa, para comunicação com os nós adjacentes.

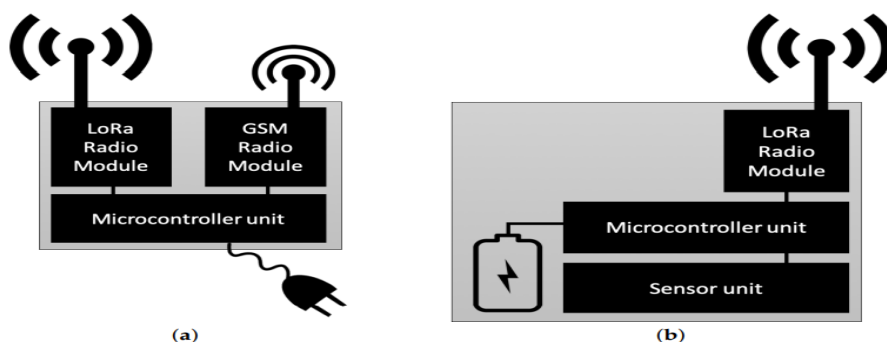


Figura 65. Nós componentes da rede em malha proposta. No lado (a), aparece um *gateway* e, no (b), um nó sensor.

Fonte: Abrardo *et al.* [63].

Cunha [64], ex-aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense (PPGEET-UFF), sob a orientação do Professor Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos, desenvolveu a dissertação de Mestrado intitulada “Análise e Caracterização da Cobertura LoRa para Ambiente Indoor na Frequência de 915 MHz”, utilizando dois microcontroladores Heltec ESP 32 LoRa, um para transmissão de sinais (Tx) e outro para a recepção (Rx).

Embora não se tratasse, propriamente, de uma rede LoRa em malha (*LoRa Mesh*), o sistema montado pelo pesquisador Michel Pessoa da Cunha consistiu, inicialmente, na configuração e calibração de um módulo Heltec ESP 32 LoRa transmissor, fixado próximo a uma das entradas do Bloco E, da Escola de Engenharia da UFF, em Niterói, RJ, e de um módulo receptor idêntico, que se movimentava livremente no interior dos cinco andares do Bloco D, localizado próximo ao Bloco E. As atividades consistiram, então, em se fazer um detalhado levantamento da intensidade do sinal captado pelo receptor em diversos pontos dentro do referido Bloco D, da sua comparação com os valores típicos esperados e do cálculo das perdas envolvidas. A Figura 66 ilustra detalhes dos Blocos D e E.

Os parâmetros LoRa utilizados durante as medições realizadas foram: (1) Frequência da Portadora: 915 MHz; (2) Modulação: CSS; (3) Larguras de Banda (BW): 125 kHz e 250 kHz; (4) Fatores de Espalhamento (SF): 7, 9, 10, 12; e (5) Potência de Transmissão: 14 dBm.

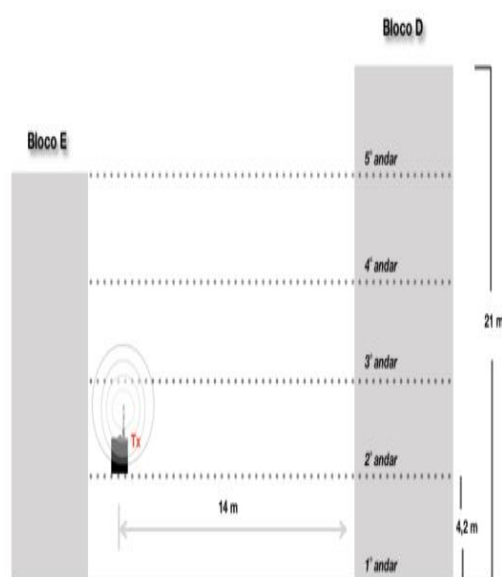


Figura 66. Vistas externas dos locais onde foram feitas as medições de sinais LoRa no interior dos cinco andares do Bloco D, da Escola de Engenharia da UFF, em Niterói, RJ, transmitidos de um módulo ESP 32 fixado próximo à entrada principal.

Fonte: Michel Pessoa da Cunha [64].

Hingrid Domingues [69], também ex-aluna do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense (PPGEET-UFF), sob a orientação do Professor Ricardo Campanha Carrano, produziu a dissertação de Mestrado intitulada “Tecnologia IoT LoRa na Automação do Abastecimento de Água”, para a medição do fluxo de água que trafegava no interior de dutos mantidos sob monitoramento.

A autora montou, então, uma pequena rede LoRa constituída por dois sensores de vazão de água modelo YF-S201, dois microcontroladores Heltec ESP 32 LoRa, um para transmissão de sinais (Tx) e outro para a recepção (Rx), e um *gateway* LoRa, responsável por receber e processar todos os dados oriundos dos microcontroladores e os enviar, via protocolo MQTT, para a nuvem, de forma que tais dados pudessem ser acessados através de uma aplicação, conforme mostrado na Figura 67.

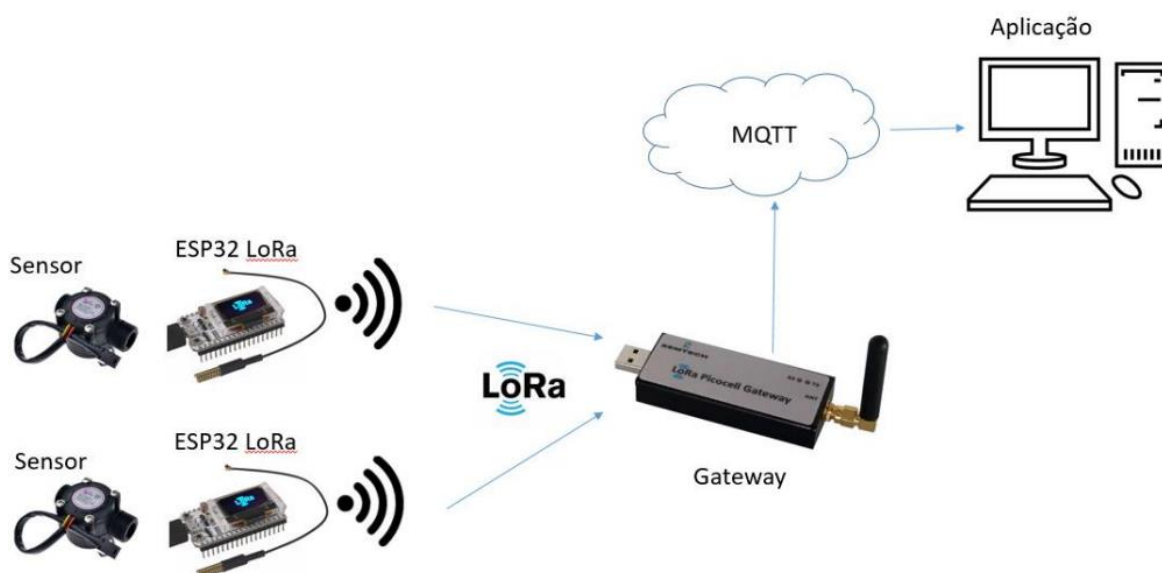


Figura 67. Componentes da rede IoT Lora para a medição do fluxo de água que trafegava no interior de dutos mantidos sob monitoramento.

Fonte: Hingrid Tavares Guimarães [69].

Capítulo 4 - Proposta do Trabalho

Dentre as várias tecnologias de redes LPWAN disponíveis, três das que mais se destacam são Sigfox, NB-IoT e LoRaWAN. Enquanto as duas primeiras apresentam ao cliente soluções que envolvem o uso de redes comerciais, a última, LoRaWAN, permite a ele adquirir e montar, por conta própria, a sua rede personalizada, privativa, sem ter que pagar mensalidades pelo uso do serviço.

Entretanto, uma limitação encontrada nas atuais redes LoRaWAN reside no fato de que oferecem apenas topologia de rede em estrela e salto único. Isto poderia causar dificuldades em áreas com problemas de acesso à Internet, como em regiões rurais remotas, ou em cenários cuja cobertura de rádio se mostre desafiadora, como, por exemplo, em estruturas subterrâneas, ou em regiões metropolitanas em que o *gateway* deve ficar posicionado em um local com infraestrutura de rede que permita a sua ligação ao servidor de rede, mas que, simultaneamente, possibilite o acesso a ele (*gateway*) de todos os dispositivos finais sob a sua área de atuação. Nem sempre é fácil encontrar disponível tal local. Para estender e melhorar a cobertura em situações como essas, poder-se-ia pensar na instalação de nós retransmissores, mas a retransmissão multissalto de dados não é suportada pela tecnologia LoRa existente [57].

Uma outra abordagem a considerar consiste no uso de uma *rede LoRaWAN em malha* (LoRa mesh), na qual cada nó seria capaz de receber e processar os dados endereçados para si, gerar dados e transmiti-los para outro nó e, também, reencaminhar os dados recebidos cujo endereço de destinatário seja diferente do seu, atuando, então, como um nó roteador. Uma rede LoRaWAN com tais características poderia ter a sua área de cobertura significativamente ampliada, permitindo, potencialmente, a resolução dos problemas citados no parágrafo anterior.

Então, pela característica de reunir as qualidades encontradas nas redes LoRaWAN, com a possibilidade de oferecer multissaltos, estendendo o alcance da cobertura em regiões desafiadoras, a tecnologia *LoRa Mesh* foi a escolhida para a realização do presente trabalho. Assim, esta dissertação tem o objetivo de se avaliar o desempenho de uma rede *LoRa Mesh* constituída por três dispositivos finais (nós) que se comunicam entre si, havendo a

possibilidade de ocorrer saltos na comunicação entre os dispositivos, que operam por meio da frequência ISM LoRa de 915 MHz. As medições foram realizadas no meio urbano, em dois ambientes, interno e externo, na Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense (UFF), localizada na cidade de Niterói, Rio de Janeiro.

Inicialmente, na escolha dos equipamentos que constituiriam a rede LoRa em malha, avaliou-se a possibilidade do uso de módulos ESP-32, e seus pacotes SDK-IDE, produzidos pela empresa chinesa Espressif Systems, especializada no desenvolvimento de soluções Wi-Fi, Bluetooth e de IoT de baixo custo e reduzido consumo energético. Entretanto, à época, a opção oferecida pela empresa destinava-se à configuração de uma rede em malha em um ambiente Wi-Fi, de pequeno alcance e taxa de transmissão de dados de 15 Mbps e, portanto, foi logo descartada.

A seguir, considerou-se a possibilidade de se configurar uma rede LoRa em malha por conta própria, também com o uso de módulos ESP-32, mas os obstáculos encontrados, na ocasião, foram a dificuldade de se obter pacotes de *software* de biblioteca e protocolos de roteamento de nós adequados para este tipo de *hardware*, a fim de que os rádios pudessem se comunicar.

Continuando a busca, foi, então, encontrada uma solução disponibilizada por uma empresa de engenharia com tecnologia nacional, chamada *Radioenge Soluções em Segurança, Smart City e IoT*, fundada em 2007 e sediada na cidade de Curitiba, Paraná. Esta empresa apresenta-se como especialista no uso de radiofrequência para o monitoramento de centrais de alarme, telemedição de energia, redes em malha para aplicação em *smart grid* e segurança, além de módulos, antenas, alarmes e sensores sem fio.

Na época em que este trabalho foi iniciado, a empresa Radioenge oferecia o módulo de desenvolvimento *RF LoRa Mesh RD-42C*, de baixo custo e reduzido consumo de energia, a ser detalhado mais adiante, destinado ao desenvolvimento de pequenas aplicações sem fio. Este dispositivo une a modulação LoRa, de longo alcance e baixo consumo, à chamada rede em malha, na qual cada rádio atua, não somente como receptor de sinal, mas, também, como roteador, possibilitando a criação de uma rede escalável, que suporta, até 1.024 nós por rede, segundo os fabricantes, por meio do uso do protocolo de roteamento *Modbus*, e permitindo

a transmissão de mensagens de forma transparente entre diferentes pontos da rede, sem o uso de *gateways* LoRaWAN [53]. A Figura 68 mostra um módulo Radioenge *LoRa Mesh RD-42C*, que opera na frequência ISM de 915 MHz. À direita da figura, este rádio aparece acoplado a uma antena de 2,15 dBi de ganho.

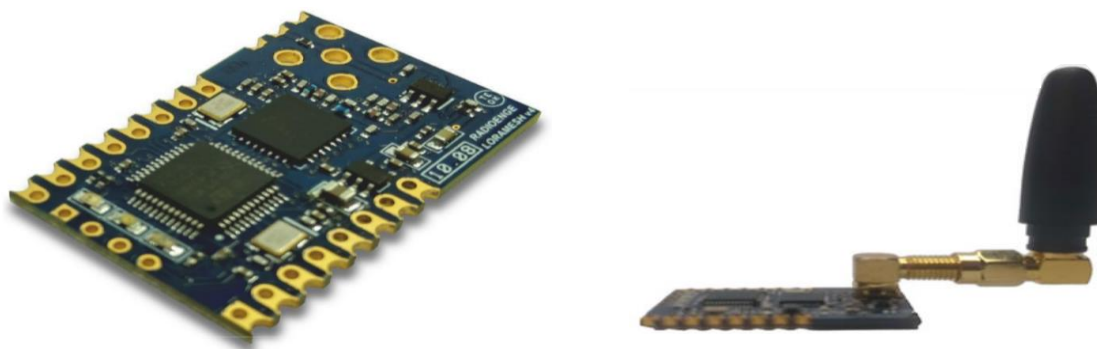


Figura 68. Módulo rádio *LoRa Mesh RD-42C*, da empresa Radioenge.

Fonte: Radioenge [53].

Entretanto, para utilização nas medições a serem realizadas, este módulo rádio teve que ser acoplado a uma placa Radioenge *USB-IoT*, a qual possuía uma interface USB tipo B para alimentação de energia ou conexão a um computador, através de um cabo USB A/B. A Figura 69 mostra, no lado esquerdo, uma placa Radioenge *USB-IoT* e, no lado direito, um módulo Radioenge *LoRa Mesh RD-42C* montado sobre ela, junto de um cabo USB A/B.

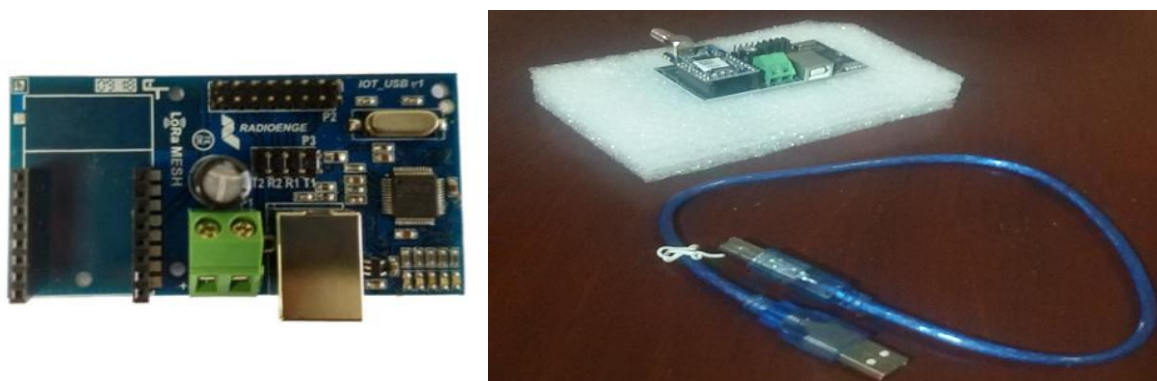


Figura 69. Uma placa Radioenge *USB-IoT* junto de um cabo USB A/B.

Fontes: Radioenge [53] e o autor.

Para a execução deste trabalho, inicialmente, foi analisada a possibilidade da instalação de um sensor de temperatura e umidade DHT22, através de uma placa *proto board*,

ao conjunto placa USB e rádio *LoRa Mesh* Radioenge RD42C. Assim, conforme mostrado no esboço da Figura 70, foi montado o seguinte protótipo de rede *LoRa Mesh*:

- ✓ um sensor de temperatura e umidade DHT22;
- ✓ um protoboard com 830 furos, marca Minipa, modelo MP-830A;
- ✓ seis cabos jumper macho-macho;
- ✓ três rádios *LoRa Mesh* Radioenge RD42C, operando na frequência LoRa ISM de 915 MHz, cada um ligado a uma antena com ganho de 2,15 dBi;
- ✓ três placas- Radioenge *USB-IoT*, cada uma delas conectada a um dos rádios mencionados acima;
- ✓ duas baterias Samsung Íon-Lítio, com capacidade de 10.000 mAh, tensão de alimentação normal de 5 V e potência de 15 W, para o fornecimento de energia a duas das três placas *USB-IoT*. A terceira placa *USB-IoT* seria alimentada por uma das portas USB do notebook utilizado;
- ✓ três cabos USB A/B, para a ligação das placas *USB-IoT* às respectivas baterias ou ao notebook;
- ✓ um *notebook*, para o monitoramento da execução dos comandos, e das respostas a estes, entre os rádios da rede *mesh*, através do aplicativo de comunicação instalado;

O objetivo desse teste seria se atestar a viabilidade de coleta e retransmissão dos dados sensoriais (temperatura e umidade, no caso) até o nó *gateway*, através de dois saltos de transmissão.



Figura 70. Esboço do protótipo da rede *LoRa Mesh* utilizada neste trabalho.

Fontes: Radioenge [53] e o autor.

4.1 Tecnologia *LoRa Mesh*

O termo *LoRa Mesh* está associado a uma rede de nós que se comunicam entre si caracterizada por possuir um sistema de roteamento de mensagens em malha (*mesh*) e comunicação sem fio dotado de autorregeneração, pelo qual eventuais problemas surgidos são detetados e corrigidos pela própria rede, sem intervenção humana.

Cada nó da rede, além de receber e processar as mensagens que contêm o seu endereço, de poder gerar mensagens e transmiti-las, é capaz, também, de fazer a retransmissão de mensagens que a ele chegam mas que são destinadas a outro nó da rede (roteamento).

O módulo rádio *LoRa Mesh* RD42C, desenvolvido pela empresa Radioenge, trabalha segundo uma arquitetura mestre / escravo. Assim, um dos nós da rede é configurado como mestre e recebe o identificador ID0, sendo, normalmente, o nó que ficará ligado a um computador, para o controle e monitoramento da rede. Os demais nós receberão os identificadores ID1, ID2, ID3 etc. até o total de 1.024 nós por rede, segundo a empresa fabricante.

As comunicações fluem entre os nós escravos e o nó mestre da rede através de N saltos, ou seja, passando através de vários escravos de forma automática, por meio de roteamentos em cada nó.

O módulo *LoRa Mesh* RD42C implementa a camada física LoRa ou FSK e a comunicação entre os nós mestre e escravos é feita de forma transparente para a aplicação que está sendo executada. A Figura 71 apresenta um esboço de uma rede *LoRa Mesh*.

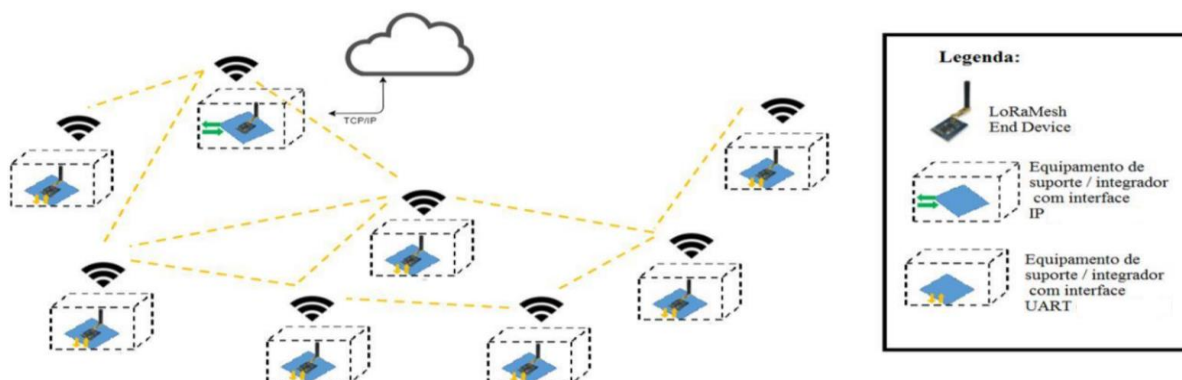


Figura 71. Esboço de uma rede *LoRa Mesh*.

Fonte: Manual de utilização do módulo *LoRa Mesh* da empresa Radioenge [53].

4.2 Sensor de Temperatura e Umidade DHT22

Por ocasião da realização do presente trabalho, um dos sensores de Temperatura e Umidade mais utilizados em projetos particulares é o DTH11, fabricado pela empresa norte-americana *Adafruit Industries*, entre outras [54]. Um outro sensor da mesma família é o DTH22, que apresenta um grau de precisão um pouco maior do que o anterior e, portanto, foi escolhido para integrar o protótipo. A Figura 72 mostra este sensor.

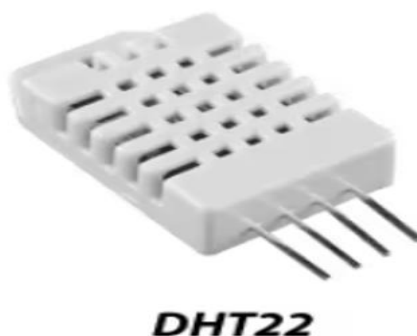


Figura 72. Sensor DTH22.

Fonte: Adafruit Industries [54].

O sensor de Temperatura e Umidade DHT22 é um dispositivo eletrônico de baixo custo (US\$ 9,95 ou R\$ 56,71, aproximadamente, na época da realização do presente trabalho), admite uma tensão de alimentação entre 3,0 V e 5,0 V e uma corrente elétrica máxima, durante a captura de dados, de 2,5 mA. Ele é capaz de medir temperaturas preferencialmente entre $(-)$ 40° C e 80° C, com uma acurácia de $\pm 0,5^{\circ}$ C, e umidade preferencialmente na faixa de 0 a 100%, com acurácia de 2 a 5%, e uma taxa de captação de dados (amostragem) maior ou igual a 2,0 segundos.

O Anexo B apresenta o detalhamento das características técnicas do sensor DHT22, mostra uma comparação entre ele e o sensor DHT11, e a identificação da pinagem de ambos os dispositivos.

4.3 Módulo rádio *LoRa Mesh* RD42C

O módulo *LoRa Mesh* RD42C, da empresa Radioenge, é um transceptor que alia a tecnologia de modulação LoRa, de baixo consumo e longo alcance, com uma topologia de

rede em malha (*LoRa Mesh*), escalável, de pequeno custo, de modo a permitir a cobertura de uma área geográfica ampla [56].

Entre os principais atributos do módulo rádio *LoRa Mesh* RD42C, destacam-se os seguintes [56]:

- Recursos:
 - Configuração do módulo como mestre ou escravo;
 - Possui duas interfaces UART (comandos e transparente);
 - Permite a configuração via interface UART ou por rádio;
 - Dispõe de oito GPIOs, sendo duas configuráveis como entradas analógicas;
 - Apresenta três LEDs, nas cores verde, amarela e vermelha, para sinalização de operação;
 - Permite o diagnóstico remoto do dispositivo.
- Características gerais:
 - Tensão de alimentação entre 1,8 V e 12 VCC (+3,3 V sem regulador);
 - Possui baixo consumo de energia;
 - Apresenta as seguintes dimensões: 33 mm X 22 mm X 3 mm;
 - Admite uma temperatura de operação na faixa de (-) 5° C a (+) 55° C;
 - É equipado com um microprocessador ARM Cortex-M0+, de 32 bits;
 - Apresenta as seguintes taxas máximas de transmissão de dados: 21,9 kbps (LoRa) e 250 Kbps (FSK);
 - Trabalha com topologia de rede em malha (*mesh*);
- Características de RF:
 - Opera na banda ISM, com a frequência de 915 MHz;
 - Possui as seguintes sensibilidades de recepção: (-) 137 dBm (Lora) e (-) 92 dBm (FSK);
 - Permite a operação com uma potência máxima de transmissão de 20 dBm;
 - Pode operar por modulação LoRa ou FSK;
 - Possui a homologação ANATEL nº 02021-18-07215;
- Aplicações:

- Internet das Coisas (IoT);
- Possui baixo consumo de energia;
- Automação doméstica e comercial;
- Sistema de segurança e monitoramento;
- Aquisição e envio de dados;
- Leitura remota de sensores.

A Figura 73 apresenta um esboço do módulo rádio *LoRa Mesh* RD42C, no qual todos os seus pinos aparecem numerados e definidos na Tabela 7.

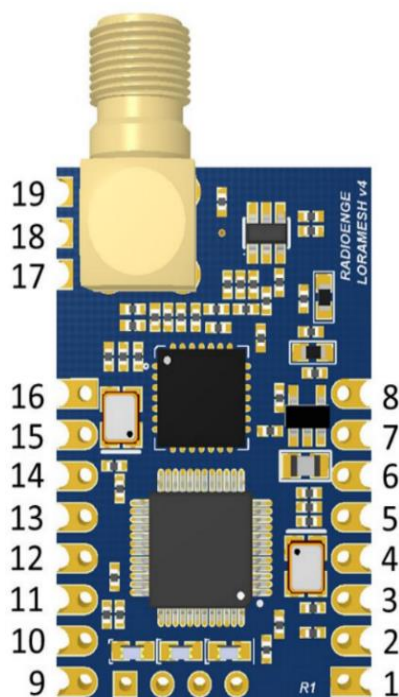


Figura 73. Módulo rádio *LoRa Mesh* RD42C, da empresa Radioenge.

Fonte: Manual de utilização do módulo *LoRa Mesh* da empresa Radioenge [56].

Tabela 7. Identificação dos pinos do módulo rádio *LoRa Mesh* RD42C.

Pino	Nome	Tipo	Descrição
1	GND	Alimentação	Conectado à terra (<i>ground</i>)
2	RX_1	Entrada	RX da interface UART de comando
3	TX_1	Saída	TX da interface UART de comando
4	VCC	Alimentação	Conectado à alimentação
5	VCC	Alimentação	Conectado à alimentação
6	TX_2	Saída	TX da interface UART transparente
7	RX_2	Entrada	RX da interface UART transparente
8	GND	Alimentação	Conectado à terra (<i>ground</i>)
9	GPIO0	I/O	Pino de uso geral
10	GPIO1	I/O	Pino de uso geral
11	GPIO2	I/O	Pino de uso geral
12	GPIO3	I/O	Pino de uso geral
13	GPIO4	I/O	Pino de uso geral
14	GPIO5	I/O ou Analógico	Pino de uso geral ou entrada analógica
15	GPIO6	I/O ou Analógico	Pino de uso geral ou entrada analógica
16	GPIO7	I/O	Pino de uso geral
17	GND	Alimentação	Conectado à terra (<i>ground</i>)
18	ANT	Saída RF	Saída de RF para antena externa
19	GND	Alimentação	Conectado à terra (<i>ground</i>)

Fonte: Manual de utilização do módulo *LoRa Mesh* da empresa Radioenge [56].

Há oito GPIOs (entradas/saídas de uso geral, numeradas como 9 a 16), sendo que dois deles (numerados como 14 e 15) também lidam com sinais analógicos. O módulo também possui quatro pinos terra (*ground*, numerados como 1, 8, 17 e 19), um pino para

antena (18), dois pinos para alimentação de tensão elétrica (4 e 5), um par de pinos de recepção e transmissão de sinais referentes à interface UART de comandos (pinos 2 e 3, respectivamente) e um par de pinos de recepção e transmissão de sinais referentes à interface UART transparente (pinos 6 e 7, respectivamente).

A Tabela 8 mostra algumas das especificações básicas de operação do módulo rádio *LoRa Mesh* RD42C. Como pode ser observado, ele opera por modulações LoRa ou FSK, nas faixas de frequências de 902,5 MHz a 907 MHz ou 915 MHz a 928 MHz. No Brasil, o intervalo de frequências acima de 907 MHz e abaixo de 915 MHz não pode ser utilizado para transmissões LoRa por estar reservado a telefonia celular. As larguras de banda possíveis são 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz, os Fatores de Espalhamento disponíveis são 7, 8, 9, 10, 11 ou 12 e as Taxas de Codificação permitidas são 4/5, 4/6, 4/7 e 4/8.

Tabela 8. Especificações básicas de operação do módulo rádio *LoRa Mesh* RD42C.

Especificação	Descrição
Modulação	LoRa® ou FSK
Faixas de frequência	902,5 – 907 MHz e 915 – 928 MHz
Largura de banda	125 kHz / 250 kHz / 500 kHz (LoRa); 250 kHz (FSK)
Fator de Espalhamento (LoRa)	7, 8, 9, 10, 11 e 12
Taxa de Codificação (LoRa)	4/5, 4/6, 4/7 e 4/8
Estabilidade de frequência	±5,0 ppm (partes por milhão)
Protocolo	LoRa/MESH Radioenge
Sensibilidade	(-) 137 dBm (LoRa); (-) 92 dBm (FSK)
Potência de transmissão	Máx. (+) 20 dBm / 100 mW
Conexão com antena	Pad acastelado (pino 18) ou conector SMA-M
Interface de comunicação	UART

Fonte: Manual de utilização do módulo *LoRa MESH* da empresa Radioenge [56].

A Tabela 9 apresenta as taxas de transmissão de dados LoRa para uma taxa de codificação (*Coding Rate*) igual a 4/5 ($CR = 4/5$). Nota-se que as maiores taxas correspondem aos menores valores do Fator de Espalhamento, enquanto que as menores taxas relacionam-se aos maiores valores deste Fator.

Tabela 9. Taxas de transmissão de dados LoRa para uma *Taxa de Codificação (CR)* igual a 4/5.

Taxa de Codificação (CR) = 4/5		Fator de Espalhamento (SP)					
		7	8	9	10	11	12
Largura de Banda	125 kHz	5.469 bps	3.125 bps	1.758 bps	977 bps	537 bps	293 bps
	250 kHz	10.938 bps	6.250 bps	3.516 bps	1.953 bps	1.074 bps	586 bps
	500 kHz	21.875 bps	12.500 bps	7.031 bps	3.906 bps	2.148 bps	1.172 bps

Fonte: Manual de utilização do módulo *LoRa MESH* da empresa Radioenge [56].

O Anexo C apresenta estes e outros dados adicionais a respeito do módulo rádio *LoRa Mesh* RD42C.

4.4 Protótipo simplificado da rede *LoRa Mesh*

Na rede *LoRa Mesh* utilizada neste projeto, constituída por três módulos rádio *LoRa Mesh* RD42C, um deles foi selecionado para ser o nó *mestre*, recebendo o identificador *ID0*, enquanto que os outros dois, nomeados como *ID2* e *ID3*, tornaram-se, então, nós *escravos*. Havia, ainda, um quarto módulo de reserva, que ficou guardado para ser posto em uso caso algum dos três módulos apresentasse problemas de funcionamento, o que não chegou a ocorrer.

Consultada quanto à possibilidade de se usar um *gateway* LoRa para conexão da rede *LoRa Mesh* à Internet, à época da realização deste trabalho, a empresa Radioenge, fabricante dos módulos RD42C, informou que ainda não havia desenvolvido um dispositivo que permitisse tal finalidade.

Como o objetivo deste trabalho seria a análise do desempenho de uma rede LoRa em malha constituída por três dispositivos finais (nós) que se comunicavam entre si, havendo a possibilidade de ocorrer saltos do sinal entre eles, e, levando-se em conta que, após a configuração da rede, os nós permitiam a troca de mensagens entre si, de forma autônoma, ponto a ponto, sem a necessidade da presença de um sensor gerando dados de medições, o protótipo inicial, esboçado na Figura 70, foi simplificado, facilitando, na prática, a movimentação física dos módulos durante a realização dos ensaios de campo. A Figura 74

mostra, então, um esboço do protótipo simplificado da rede *LoRa Mesh* utilizada neste projeto.

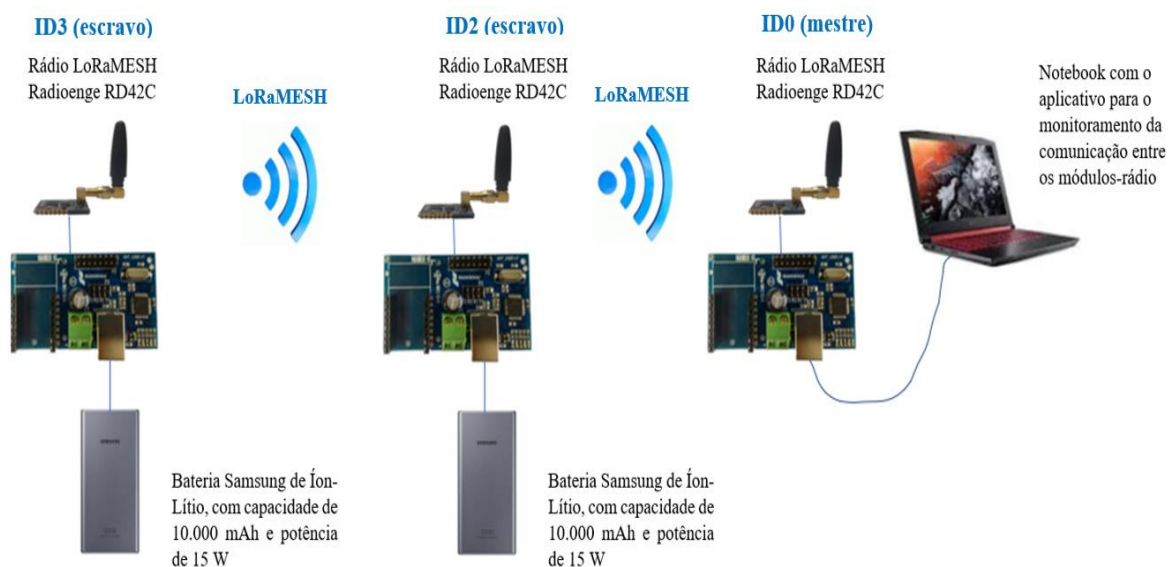


Figura 74. Esboço do protótipo simplificado da rede *LoRa Mesh* utilizada neste trabalho.

Fonte: o autor.

Como pode ser observado nesta figura, o módulo rádio *LoRa Mesh* conectado ao notebook foi configurado como mestre e recebeu o identificador *ID0*. Através do computador foi possível instalar o aplicativo de comandos e monitoramento do tráfego da rede. Os outros dois módulos foram ajustados para atuarem como escravos e obtiveram os identificadores *ID2* e *ID3*.

Através do notebook conectado ao nó mestre *ID0*, era possível enviar, via rádio, comandos LoRa para os nós escravos *ID2* ou *ID3*, que, quando os recebiam, respondiam em seguida. Foram, então, realizadas diversas medidas.

4.5 Estrutura básica dos quadros do módulo RD42C

Os comandos seriais reconhecidos pelos módulos *LoRa Mesh* RD42C seguem o modelo padrão de quadro mostrado na Figura 75.

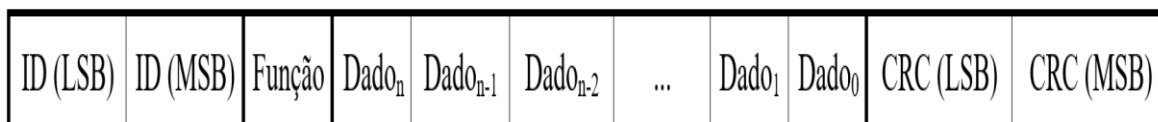


Figura 75. Esboço de um quadro de comando serial reconhecido pelos módulos *LoRa Mesh* RD42C.

Fonte: Manual de utilização do módulo *LoRa Mesh* da empresa Radioenge [56].

Nesta figura, destacam-se:

ID (LSB): campo que contém o *byte* menos significativo do identificador único do dispositivo dentro da rede para o qual o comando é endereçado (destinatário);

ID (MSB): campo que contém o *byte* mais significativo do identificador único do dispositivo dentro da rede para o qual o comando é endereçado (destinatário);

Função: campo que armazena o *byte* que especifica o comando a ser encaminhado ao módulo rádio destinatário;

Dado_{*i*}, com $i = 0, 1, 2, \dots, n-1, n$: campos que contêm os *bytes* dos parâmetros ou dados da aplicação a serem encaminhados;

CRC (LSB): campo que contém o *byte* menos significativo do código CRC;

CRC (MSB): campo que contém o *byte* mais significativo do código CRC.

Os dois *bytes* do campo *CRC* são calculados sobre todos os demais *bytes* do quadro.

Capítulo 5 – Resultados Obtidos

Para se analisar o desempenho da tecnologia LoRa em malha do protótipo montado, foram realizados ensaios com o objetivo de se verificar a sua capacidade de envio e recebimento de mensagens de forma confiável.

A rede formada pelos três nós foi configurada segundo uma topologia em malha (*mesh*), em uma arquitetura mestre / escravo. Então, um dos nós foi selecionado para atuar como *mestre* e recebeu o identificador *ID0*, enquanto que os dois nós restantes assumiram o papel de *escravos* e obtiveram os identificadores *ID2* e *ID3*.

O nó *ID0* (*mestre*) foi ligado a uma das portas USB de um *notebook*, no qual foi instalado o aplicativo de envio e recebimento de comandos, e monitoramento do tráfego da rede. A alimentação de energia desse nó era fornecida pela própria porta USB usada. Os nós *ID2* e *ID3* (*escravos*), por sua vez, recebiam energia através de baterias de Íon-Lítio, com capacidade de 10.000 mAh, tensão de alimentação normal de 5 V e potência de 15 W.

Assim, conforme mostrado na Figura 76, para a montagem do protótipo da rede *LoRa Mesh* utilizada, foram reunidos os seguintes dispositivos:

- Material utilizado:
 - ✓ três rádios *LoRa Mesh* Radioenge RD42C, operando na frequência LoRa ISM de 915 MHz, cada um ligado a uma antena com ganho de 2,15 dBi;
 - ✓ três placas Radioenge USB-IoT, cada uma delas conectada a um dos rádios mencionados acima;
 - ✓ duas baterias Íon-Lítio, com capacidade de 10.000 mAh, tensão de alimentação normal de 5 V e potência de 15 W, para o fornecimento de energia a duas das três placas USB-IoT. A terceira placa USB-IoT seria alimentada por uma das portas USB do notebook utilizado;
 - ✓ três cabos USB A/B, para a ligação das placas USB-IoT às respectivas baterias ou ao notebook;

- ✓ um *notebook*, para o monitoramento da execução dos comandos, e das respostas a estes, entre os rádios da rede *mesh*, através do aplicativo de comunicação instalado.

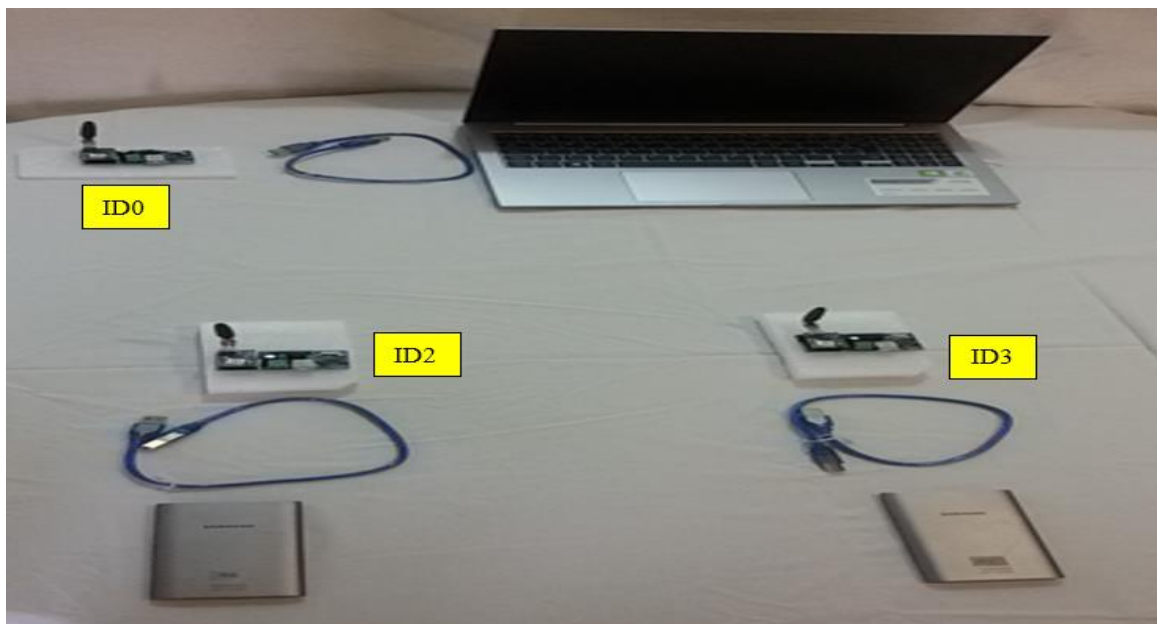


Figura 76. Material utilizado na configuração do protótipo da rede *LoRa Mesh* deste trabalho.

Fonte: o autor.

5.1 Metodologia utilizada nos Ensaios

Após a resolução das dificuldades iniciais de configuração, foi realizado um ensaio de bancada a fim de se analisar a comunicabilidade, em ambiente controlado, entre cada par de rádios, ligados diretamente através de uma régua de atenuadores de RF. Por meio deste teste seria possível verificar se os transceptores estavam em perfeitas condições de funcionamento, bem como simular as atenuações de sinal normalmente encontradas em ambiente externo. O ensaio consistiu, então, em se desconectar as antenas de ambos, colocar cada um deles dentro de recipientes fechados e cobertos por fora com duas camadas de papel alumínio, para se evitar o escape de sinais de RF, e ligá-los diretamente através da régua de atenuadores de sinais de RF, o que é detalhado no item 5.2.

Por fim, procedeu-se a ensaios de campo, em que se fixava a posição de um ou dois módulos e o outro era movimentado, para se analisar o envio e recebimento de dados, a intensidade do sinal recebido e a ocorrência ou não de perda de quadros, o que é explorado no item 5.3.

5.2 Ensaio de bancada: régua de atenuadores de sinais de RF

Para verificar-se a perfeita operacionalidade dos três módulos rádio da rede *LoRa Mesh* configurada para os ensaios de campo, foram adquiridos dois pares de caixas de plástico de tamanhos diferentes, de modo que as menores coubessem dentro das maiores. Todas elas foram cobertas com duas camadas de papel alumínio, do tipo empregado na forração da parte superior de fogões. A intenção era criar uma blindagem eletrostática para se reduzir, o quanto possível, o escape de sinais de RF provenientes dos rádios colocados em seu interior. A Figura 77 mostra dois rádios *LoRa Mesh*, colocados, cada um, no interior de um par de caixas cobertas de papel alumínio.

A seguir, os rádios ID0 e ID2 tiveram as suas antenas retiradas e foram conectados entre si através das extremidades de uma régua de atenuadores de sinais de RF do Laboratório Midiacom da Universidade Federal Fluminense (UFF).



Figura 77. Rádios no interior de caixas cobertas com duas camadas de papel alumínio cada.

Fonte: o autor.

A régua de atenuadores utilizada para simular as condições naturais de atenuação de sinais de RF era composta por componentes *JC2045-XX ATTENUATOR DC 4 GHz – 200 mW – XX dB – 50 Ω* , fabricados pela empresa *JBM Instrumentos*, de Minas Gerais, em que XX era o valor da atenuação em dB. A Figura 78 mostra um Atenuador com valor de 20 dB.

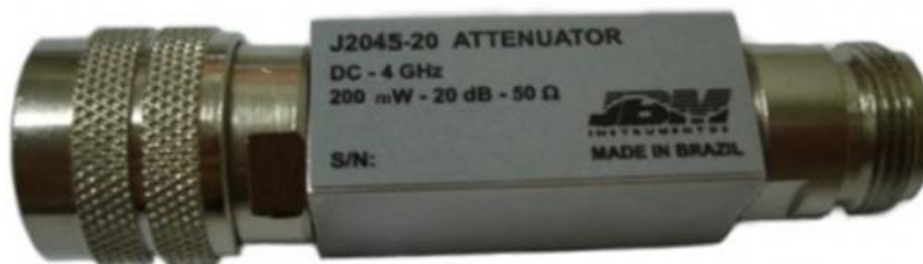


Figura 78. Atenuador J2045-20 de 20 dB e 50 Ω de impedância.

Fonte: JBM Instrumentos [58].

Tais componentes são fabricados pela empresa mineira *JBM Instrumentos* e possuem as seguintes especificações:

- Atenuador Coaxial, para sinais com frequência de até 4 GHz
- Potência máxima: 200 mW
- Impedância: 50 Ohms
- Atenuações Disponíveis (XX): 0,5; 1; 2; 3; 6; 10; 20 e 30 dB
- Faixa de frequência: DC - 4 GHz
- Peso: 75 g

O ensaio de bancada consistiu, então, em colocar-se o rádio ID2 e, depois, o ID3 dentro de um par de caixas junto de uma bateria de Íon-Lítio. Tal módulo foi conectado a uma extremidade da régua de atenuadores. O rádio ID0, por sua vez, foi disposto dentro do outro par de caixas e ligado ao notebook. Todas as caixas possuíam pequenos orifícios por onde passavam os cabos coaxiais de ligação. A Figura 79 mostra a régua de Atenuadores usada no ensaio.



Figura 79. Régua de Atenuadores utilizada no ensaio (cortesia do Lab. Midiacom, da UFF).

Fonte: o autor.

A Figura 80 ilustra diversas imagens dos componentes do ensaio realizado, destacando-se os dois conjuntos de caixas cobertas com duas folhas de papel de alumínio, os rádios colocados no interior delas e a régua de atenuadores.



Figura 80. Rádios no interior de caixas cobertas com duas camadas de papel alumínio cada.

Fonte: o autor.

Então, o rádio ID2 (ou ID3) foi ligado à bateria e, do aplicativo executado no notebook, foram enviados quadros de comandos de ID0 para ID2 (ou ID3), a fim de se medir a intensidade do sinal. Os valores da atenuação total da régua variaram de 50 dB até 150 dB, por meio da recombinação dos Atenuadores, na régua, cada um apresentando um determinado valor de atenuação em dB. Os resultados obtidos estão sumarizados nas Tabelas 10 e 11.

Na Tabela 10, o valor mostrado em cada célula representa o valor médio de 30 (trinta) medições da intensidade do sinal transmitido por ID0 que foi captado por ID2, em dBm, depois de sofrer atenuações causadas pela régua de atenuadores.

Tabela 10. Valores de atenuação da intensidade do sinal transmitido por ID0 para ID2 através da régua de Atenuadores.

Parâmetros LoRa: BW = 125 kHz ; SF=7 ; CR=4/5		Atenuação total da régua						
		50 dB	100 dB	110 dB	120 dB	130 dB	140 dB	150 dB
Potência transmitida por ID0 para ID2 (dBm)	0	-53	-103	-112,1	-126	bloqueado	bloqueado	bloqueado
	5	-50	-100	-110,2	-122,2	bloqueado	bloqueado	bloqueado
	10	-45	-95	-106	-116,4	-122,2	-123,1	bloqueado
	15	-40	-91	-100,4	-112,1	-115,8	-116,7	bloqueado
	20	-37	-88	-97,2	-110,2	-113	-114	bloqueado

Fonte: o autor.

Na Tabela 11, cada célula apresenta o valor médio de 30 (trinta) medições da intensidade do sinal transmitido por ID0 que foi captado por ID3, em dBm, depois de sofrer atenuações causadas pela régua de atenuadores, em dBm.

Tabela 11. Valores de atenuação da intensidade do sinal transmitido por ID0 para ID3 através da régua de Atenuadores.

Parâmetros LoRa: BW=125 kHz ; SF=7 ; CR=4/5		Atenuação total da régua						
		50 dB	100 dB	110 dB	120 dB	130 dB	140 dB	150 dB
Potência transmitida por ID0 para ID3 (dBm)	0	-54	-104	-113	-123,8	bloqueado	bloqueado	bloqueado
	5	-50	-100,4	-110,7	-120,7	-126	bloqueado	bloqueado
	10	-45,5	-95,6	-106,5	-114,5	-122	-122,9	bloqueado
	15	-40	-91,4	-101,1	-111,3	-116,3	-117,3	bloqueado
	20	-37	-88	-98	-108,6	-113,2	-113,8	bloqueado

Fonte: o autor.

Em ambas as tabelas, as células contendo a expressão (sinal) “bloqueado” se referem às situações em que o sinal transmitido por ID0 sofreu uma atenuação total, devido à régua de atenuadores, que implicou na perda de todos os quadros encaminhados de ID0 para ID2, no caso da Tabela 10, ou de ID0 para ID3, no caso da Tabela 11.

Foi observado, ainda, que, para uma atenuação da régua no valor total de 130 dB e potência de transmissão de ID0 de 5 dBm, todos os quadros enviados de ID0 para ID2 foram perdidos. Entretanto, quando este último (ID2) foi substituído por ID3, os quadros foram recebidos com uma intensidade de (-) 126 dBm, mas com perdas de vários deles (da ordem de 40,4%).

5.3 Ensaio de campo: análise em ambientes urbanos interno e externo

Para as medições, foram escolhidos dois ambientes em área urbana, um interno e outro externo, ambos localizados no campus da Praia Vermelha da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense (UFF), na cidade de Niterói, Rio de Janeiro. O primeiro ambiente considerado (interno) consistiu no interior do prédio do Bloco D, da Escola de Engenharia, composto por cinco andares. Já o segundo ambiente (externo) consistiu na área externa do campus da Praia Vermelha (no qual estão localizados os prédios da Escola de Engenharia da UFF) e na orla da Praia da Boa Viagem, ao longo da Avenida Milton Tavares de Souza, também situada em Niterói. Ao todo, foram feitas medições em quatro cenários, um pertencente ao ambiente interno e três ao externo.

A realização das medições, tanto em ambiente interno (*indoor*) quanto externo (*outdoor*), ocorreu ao longo de vários dias, e logo mostrou ser uma tarefa desafiadora pois o conjunto de variáveis externas que possivelmente influenciavam os valores obtidos, e sobre as quais não se tinha qualquer influência direta, variava a todo momento. Por exemplo, nos ensaios executados nos cinco andares do edifício principal da Escola de Engenharia (bloco D), houve vários locais nos quais o sinal de rádio era captado com ótima potência em determinados dias e completamente anulado em outros, exatamente nos mesmos pontos. No andar térreo deste bloco há diversos laboratórios que dão suporte ao curso de graduação em Engenharia Civil da UFF. Em determinados dias, nos momentos em que foram feitas as medidas de sinal deste trabalho em locais próximos a eles, algumas máquinas dos laboratórios permaneciam ligadas e em outros dias, não. Quando em funcionamento, possivelmente elas geravam interferências eletromagnéticas que poderiam causar, talvez, alterações nas medições obtidas. Além disso, a circulação de pessoas pelos corredores do prédio também gerava alterações no sinal captado. Um terceiro fator que também certamente provocou interferências foi o fato de que, em uma sala do segundo andar do bloco D, havia uma outra rede LoRa operando de modo permanente (durante as vinte e quatro horas por dia, ao longo dos sete dias da semana) na mesma frequência utilizada pelos módulos do presente trabalho (915 MHz). Logo, todos estes fatores somados muito provavelmente provocaram alterações aleatórias nos dados coletados.

5.3.1 Primeiro Cenário: ambiente urbano interno - Bloco D da Escola de Engenharia da UFF, em Niterói, RJ.

Os ensaios em ambiente urbano interno foram realizados no interior do chamado Bloco D, da Escola de Engenharia da UFF, em Niterói, Rio de Janeiro. Esse prédio é composto por cinco andares, conforme pode ser visto na Figura 81.



Figura 81. Bloco D, da Escola de Engenharia da UFF, em Niterói, Rio de Janeiro.

Fonte: o autor.

As medições de sinal realizadas nas dependências internas deste prédio foram obtidas percorrendo-se os corredores principais dos seus cinco andares. O sinal sofreu atenuações devido principalmente aos obstáculos internos encontrados, como móveis, divisórias de madeira e paredes de alvenaria, entre outros.

Inicialmente, fixou-se o módulo escravo ID3 no quinto andar do Bloco D e ligou-se o mesmo à bateria de Íon-Lítio, conforme mostrado na Figura 82.



Figura 82. Rádio ID3 fixado no quinto andar do Bloco D da Escola de Engenharia da UFF, Niterói, RJ.

Fonte: o autor.

A seguir, com o rádio ID0 conectado a um notebook, foram feitas medições da potência do sinal (RSSI) recebido por ID0 em vários pontos, ao longo dos corredores principais dos cinco andares do Bloco D da Escola de Engenharia da UFF, em Niterói, RJ, afastados por 20 metros de distância, aproximadamente, conforme mostrado na Figura 83. Excetuando-se o primeiro andar, os demais têm uma distribuição de espaço muito semelhante. Em cada andar do edifício, foram feitas medições nos pontos A, B, C, D e E.

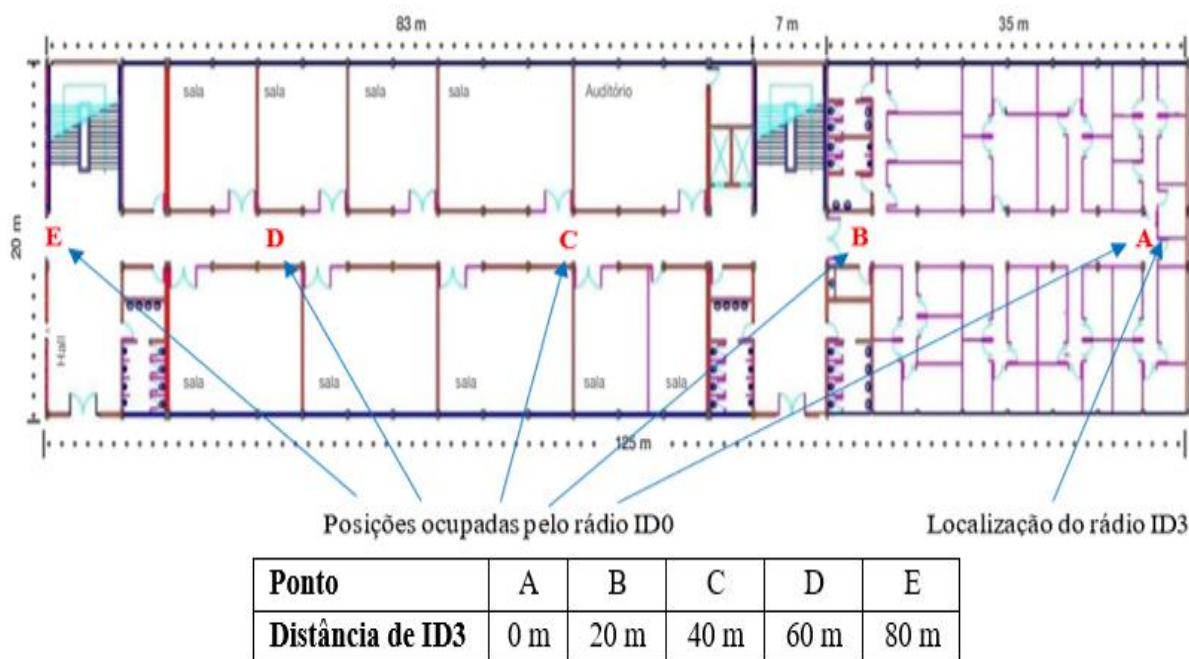


Figura 83. Posições onde foram feitas medições da potência do sinal captado por ID0 nos cinco andares do Bloco D da Escola de Engenharia da UFF, em Niterói, RJ.

Fonte: Escola de Engenharia da UFF.

As Figuras 84 a 89 apresentam, para vários valores do Fator de Espalhamento (SF) e Taxas de Codificação (CR), os gráficos da intensidade do sinal (RSSI) transmitido pelo rádio ID3 - fixado no ponto A, no fundo do corredor do quinto andar do Bloco D - que foi medida pelo rádio ID0, enquanto este se afastava ao longo dos corredores dos cinco andares deste edifício. Procurou-se verificar se a variação nos valores de SF e CR influenciaria nos níveis de RSSI a serem medidos. Em cada andar, a potência do sinal foi medida nos pontos A, B, C, D e E. Em todos os locais foram encaminhado 30 (trinta) pacotes, separados por grupos de 10 (dez). A potência do sinal permaneceu a mesma em todas as medições, adotando-se o valor máximo. Os valores foram obtidos com intervalo de confiança de 95%.

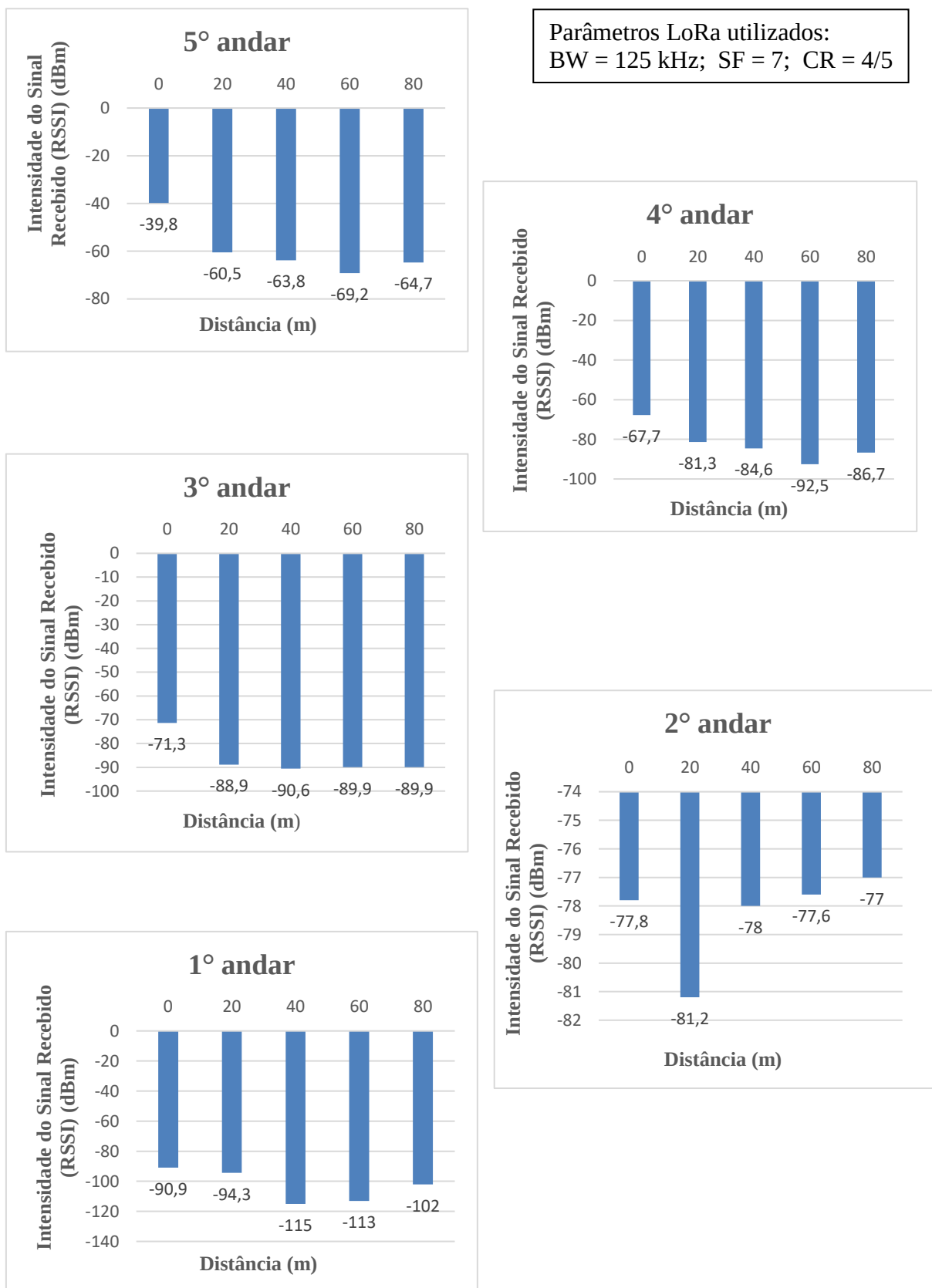


Figura 84. Intensidade do sinal de rádio (RSSI), em dBm, transmitido por ID3 para o rádio ID0, em relação à distância (m), nos cinco andares do Bloco D, para **BW=125 kHz, SF=7 e CR=4/5**.

Fonte: o autor.

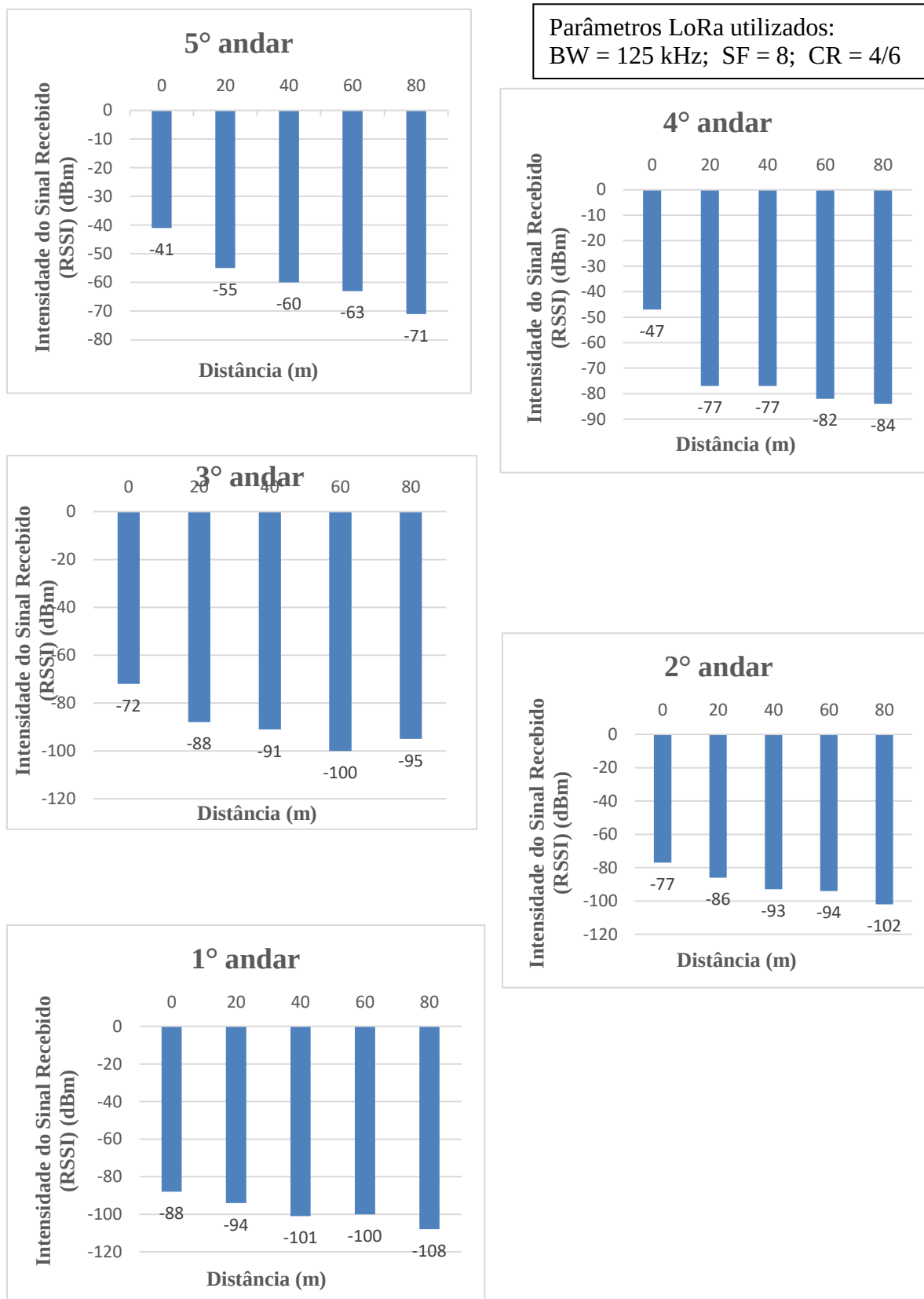
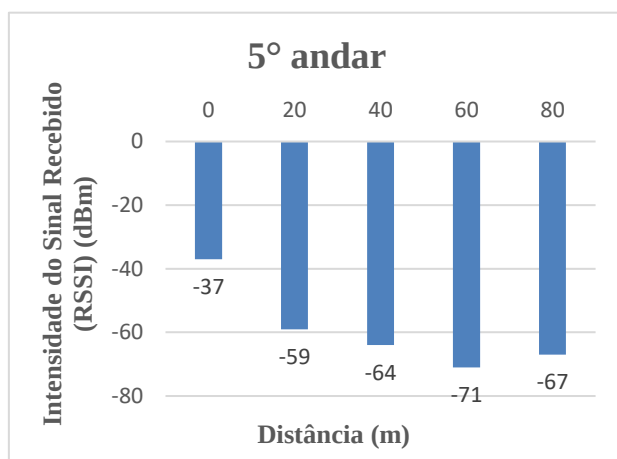


Figura 85. Intensidade do sinal de rádio (RSSI) transmitido por ID3 medida pelo rádio ID0, nos cinco andares do Bloco D, para BW=125 kHz, SF=8 e CR=4/6.

Fonte: o autor.



Parâmetros LoRa utilizados:
 BW = 125 kHz; SF = 9; CR = 4/7

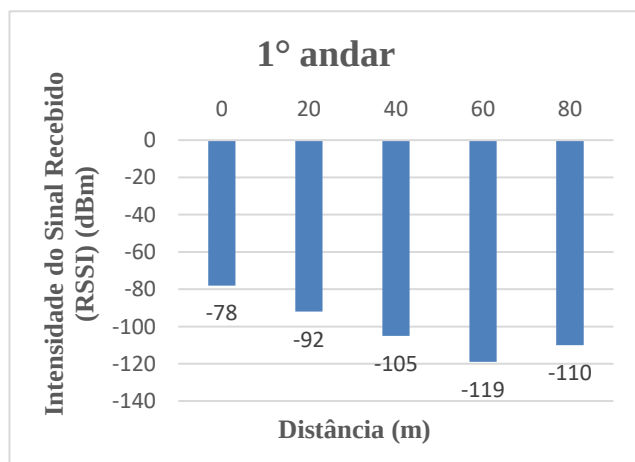
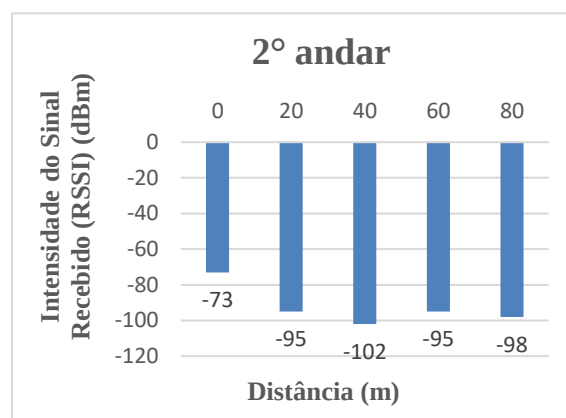
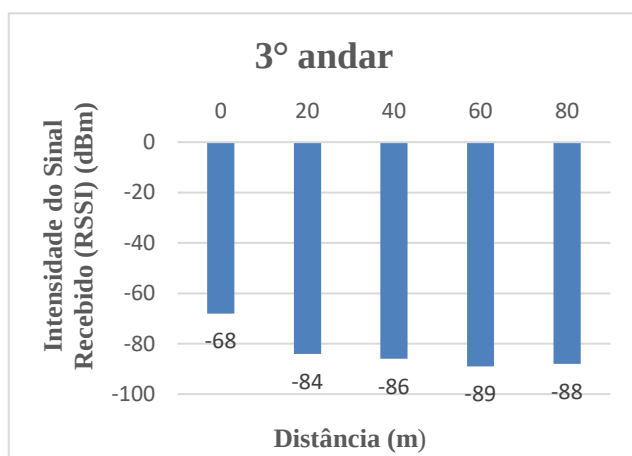
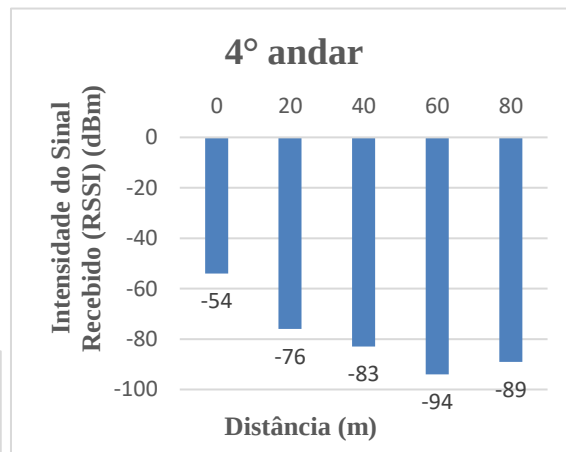
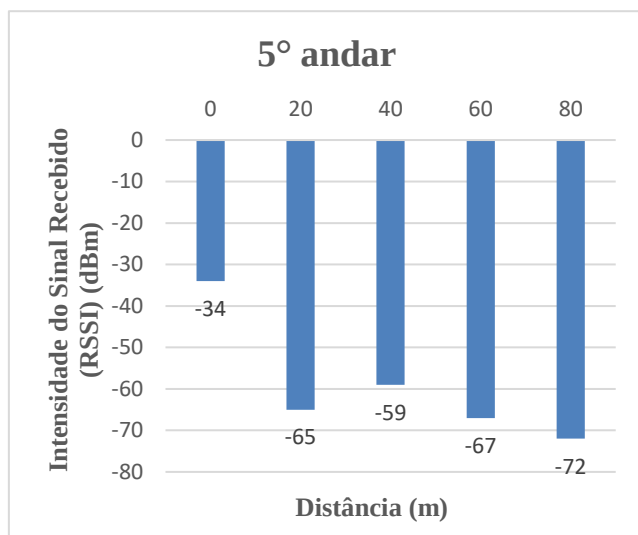


Figura 86. Intensidade do sinal de rádio (RSSI) transmitido por ID3 medida pelo rádio ID0, nos cinco andares do Bloco D, para BW=125 kHz, SF=9 e CR=4/7.

Fonte: o autor.



Parâmetros LoRa utilizados:
BW = 125 kHz; SF = 10; CR = 4/7

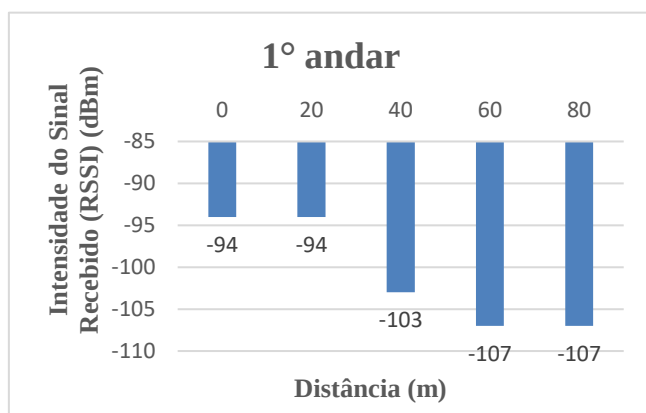
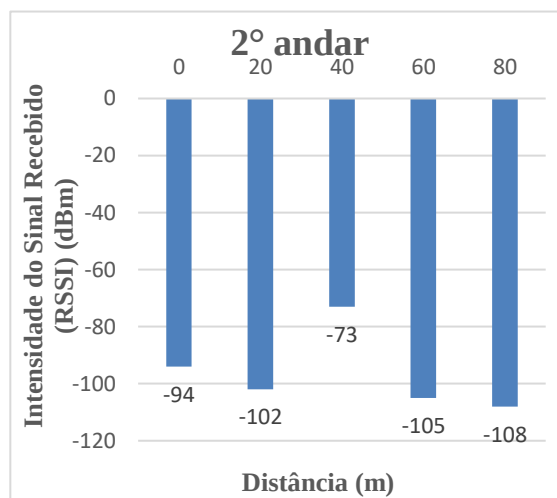
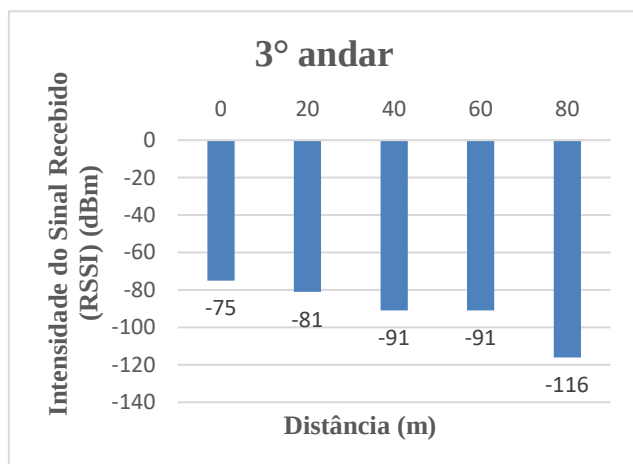
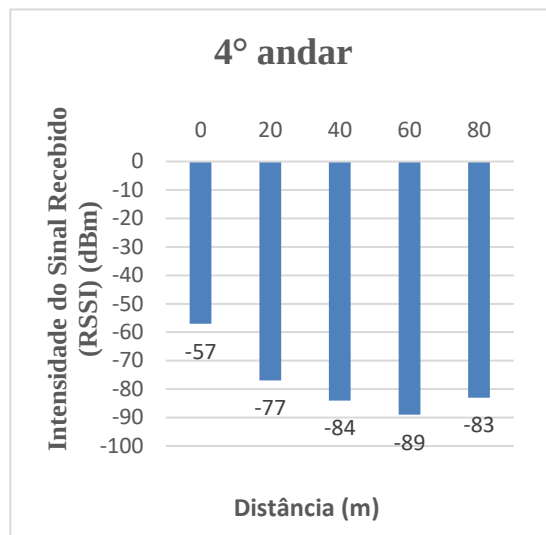
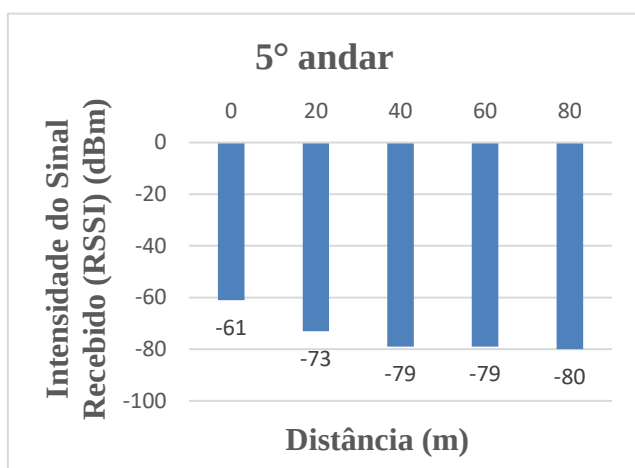


Figura 87. Intensidade do sinal de rádio (RSSI) transmitido por ID3 medida pelo rádio ID0, nos cinco andares do Bloco D, para BW=125 kHz, SF=10 e CR=4/7.

Fonte: o autor.



Parâmetros LoRa utilizados:
BW = 125 kHz; SF = 11; CR = 4/8

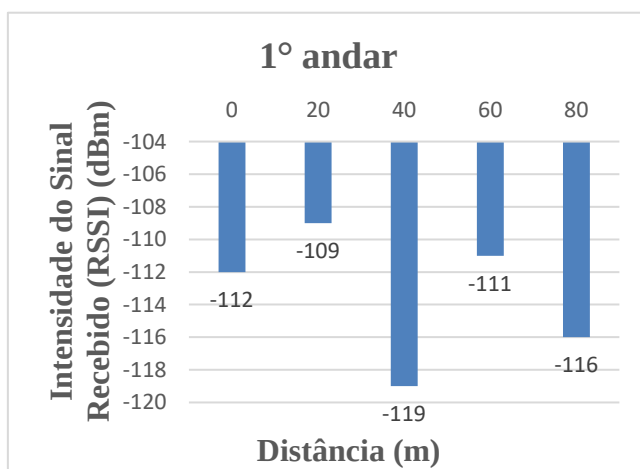
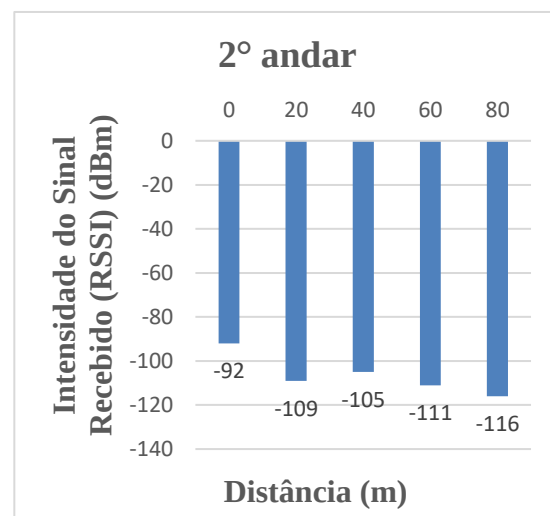
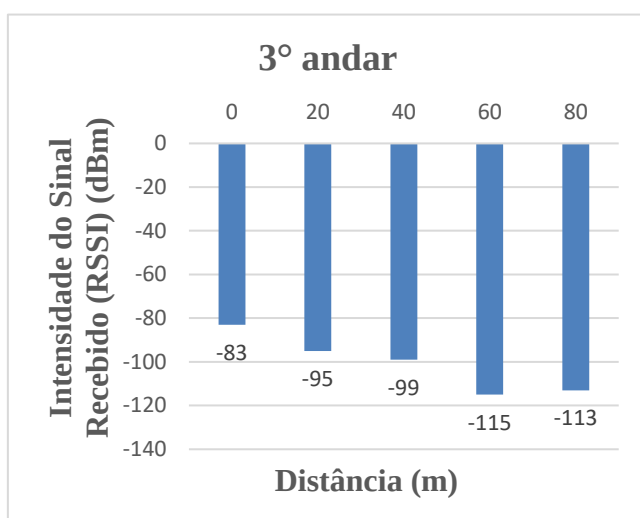
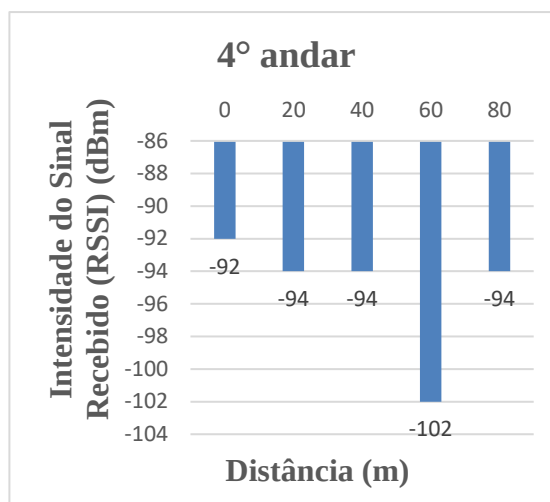
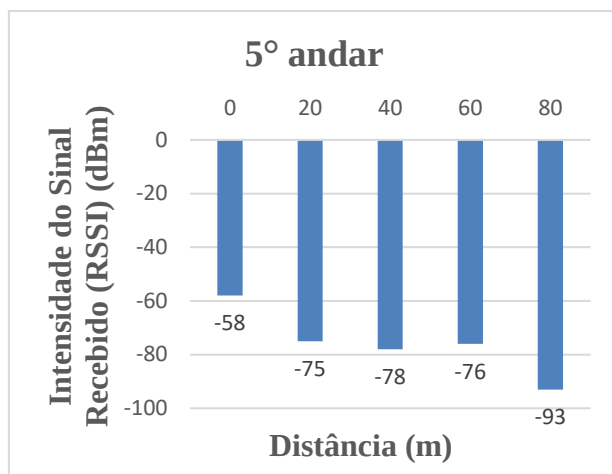


Figura 88. Intensidade do sinal de rádio (RSSI) transmitido por ID3 medida pelo rádio ID0, nos cinco andares do Bloco D, para BW=125 kHz, SF=11 e CR=4/8.

Fonte: o autor.



Parâmetros LoRa utilizados:
 BW = 125 kHz; SF = 12; CR = 4/8

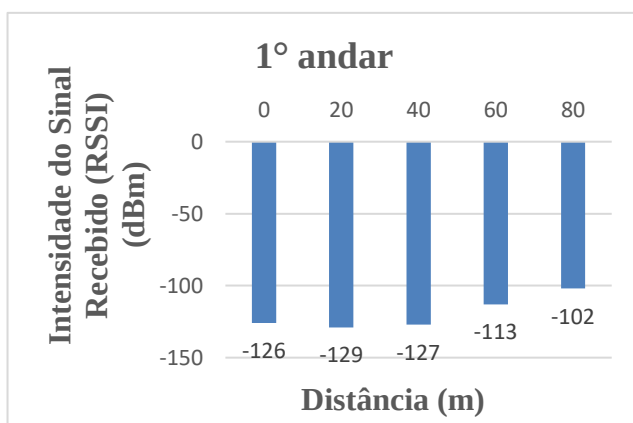
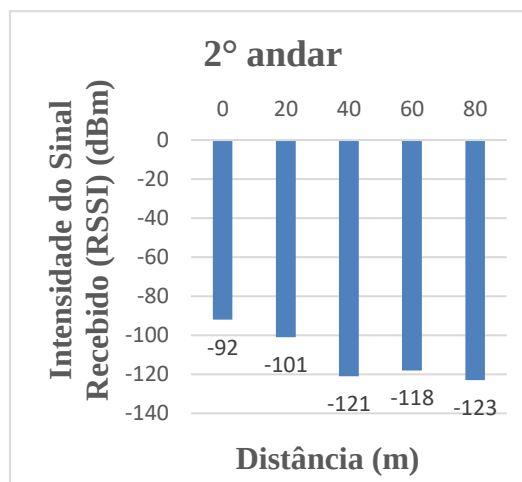
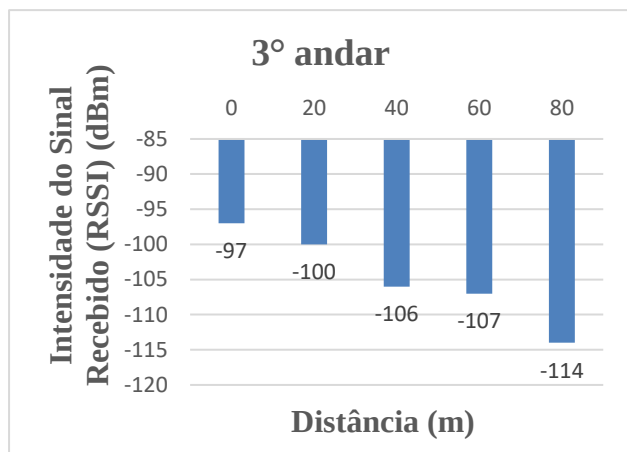
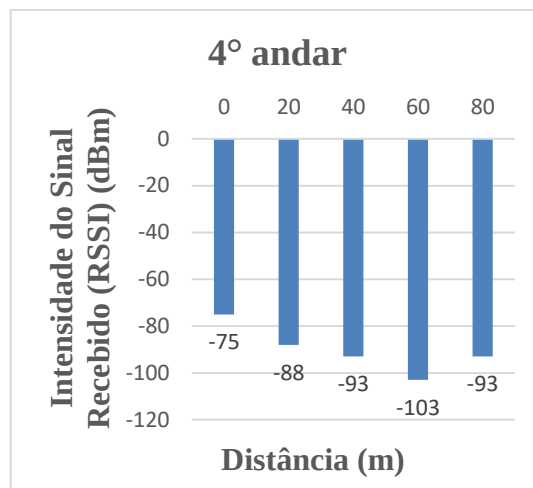


Figura 89. Intensidade do sinal de rádio (RSSI) transmitido por ID3 medida pelo rádio ID0, nos cinco andares do Bloco D, para BW=125 kHz, SF=12 e CR=4/8.

Fonte: o autor.

Conforme pode ser observado nas Figuras 84 a 89, nas medições de sinal feitas em alguns pontos mais distantes de ID3, em vez de a intensidade do sinal diminuir com a distância, ela aumentou. Uma provável hipótese para esse fenômeno consistiria no fato de que as medidas foram obtidas ao longo dos corredores principais dos cinco andares do Bloco D, como mostrado na Figura 90, os quais se comportariam, então, como verdadeiros guias de onda, em cujas paredes, piso e teto, o sinal eletromagnético se refletia, proporcionando interferências construtivas em alguns pontos e destrutivas em outros.

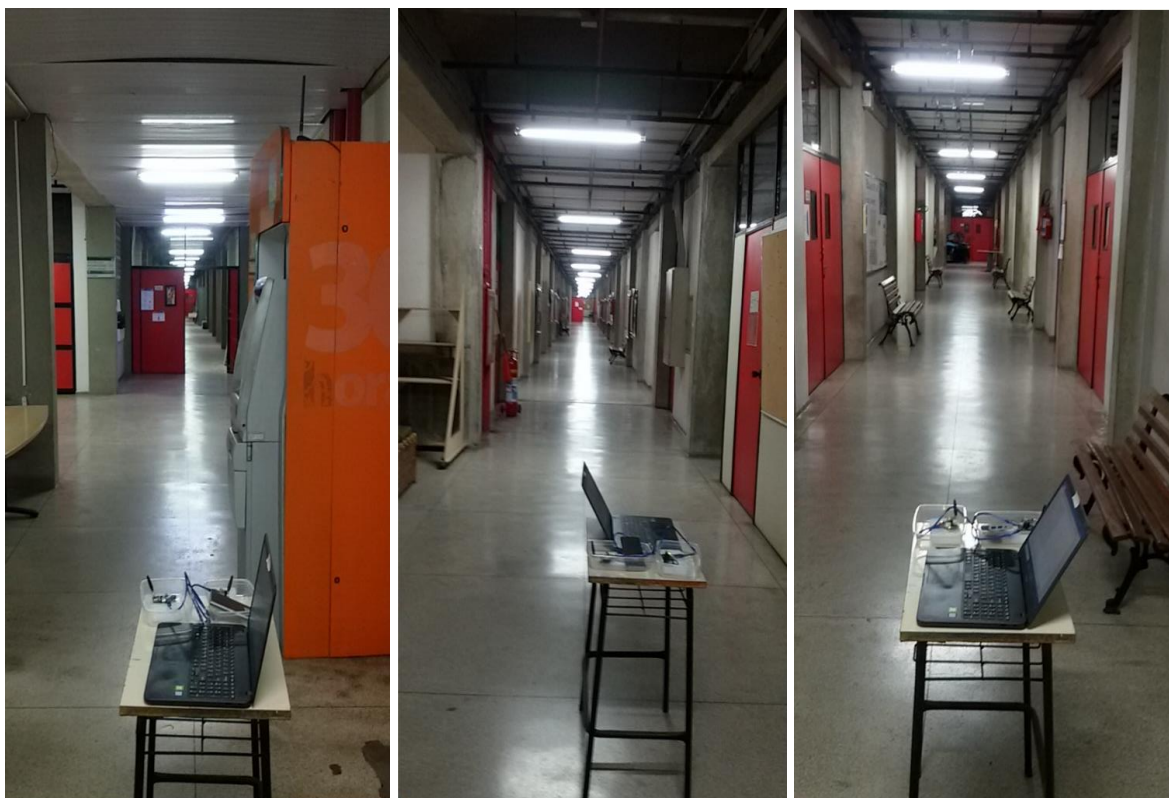


Figura 90. Medições da intensidade do sinal feitas ao longo dos corredores principais dos cinco andares do Bloco D, da Escola de Engenharia da UFF, em Niterói, RJ.

Fonte: o autor.

A Figura 91 mostra os tempos médios de atraso nas respostas, com intervalo de confiança de 95%, às requisições feitas pelo rádio ID0, que era movimentado pelos corredores dos cinco andares do Bloco D da Escola de Engenharia da UFF, ao rádio ID3, fixado no fundo do corredor do quinto andar do edifício, de acordo com o Fator de Espalhamento (SF) usado. Nota-se que os tempos médios de atraso da resposta para $SF = 1$ e $SF = 2$ apresentam-se com o mesmo valor. Isto se deve a possíveis imprecisões ocorridas nas medições dos intervalos de tempo, em virtude do fato de que estes foram obtidos através de um cronômetro pois o *software* de monitoramento de tráfego de quadros do sinal de rádio não oferecia o recurso de medição de tempo.

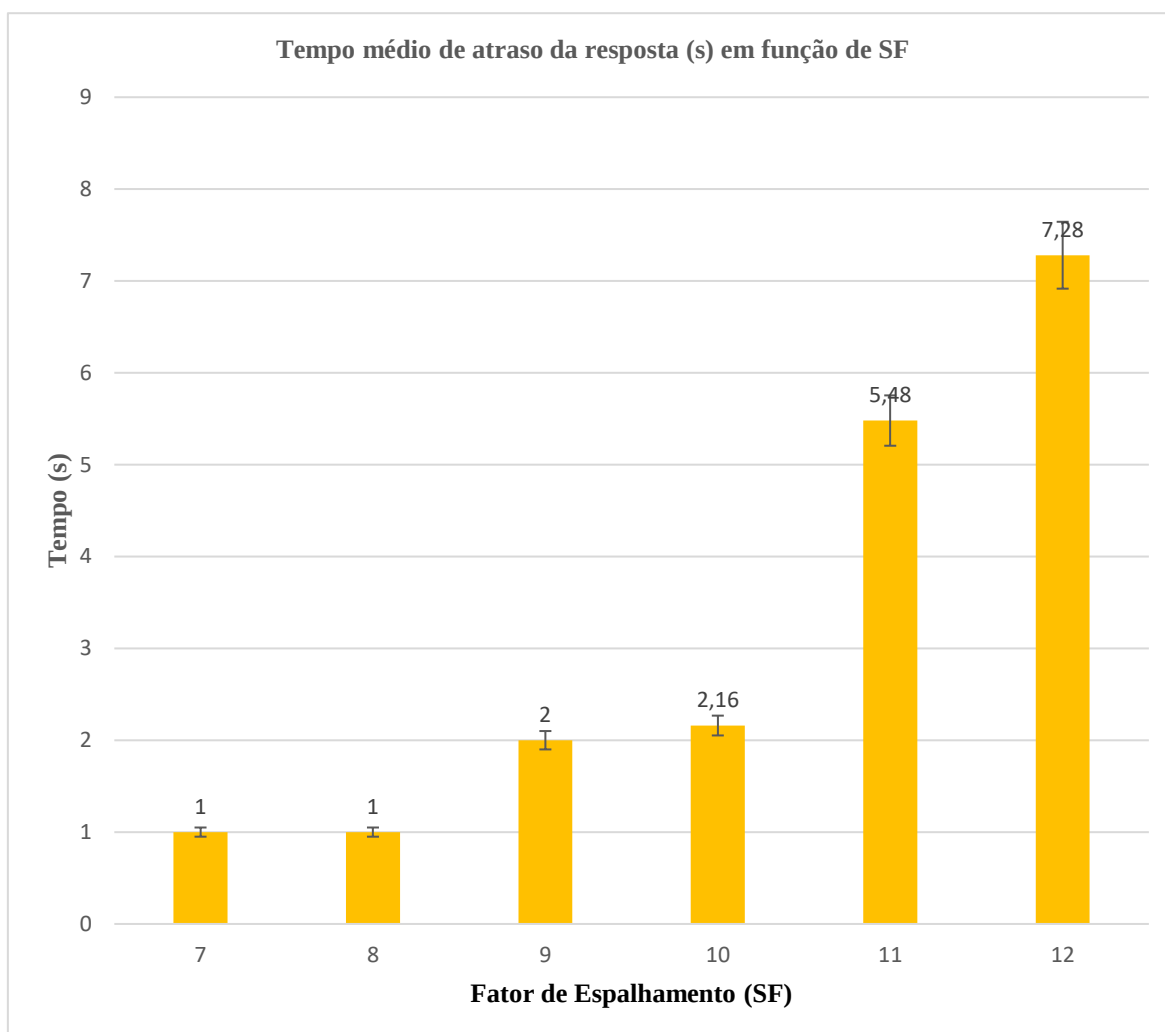


Figura 91. Tempos médios de atraso, em segundos, da resposta do rádio ID3 a ID0, em relação ao Fator de Espalhamento (SF).

Fonte: o autor.

Nos ensaios efetuados nos cinco andares do Bloco D, não foi possível verificar, na maioria das vezes, a existência de saltos de sinal entre os três rádios, devido às pequenas distâncias envolvidas. Embora os ensaios que deram origem ao gráfico da Figura 90 tenham sido obtidos através das comunicações realizadas entre os módulos ID0 e ID3, frequentemente o rádio ID2 era ativado para se verificar a possibilidade da ocorrência de saltos. Isto foi constatado através do envio frequente de comandos *Traceroute* do rádio ID0 para ID3, a fim de se examinar se o sinal estaria passando pelo rádio ID2, o que não foi constatado, exceto em uma única situação na qual o rádio ID0 estava posicionado no primeiro andar, ponto D, conforme mostrado na Figura 83, e não havia comunicação com o módulo ID3, fixado no ponto A, no quinto andar. Então, afastando-se o módulo ID2 de ID0, ainda no primeiro andar, e posicionando-o (ID2) no ponto B (Figura 83), foi possível a ID0 comunicar-se, então, com ID3 através de ID2. Em todas as demais medições efetuadas no Bloco D, a comunicação entre ID0 e ID3 ocorreu de modo direto.

5.3.2 Segundo Cenário: ambiente urbano externo – Campus da Praia Vermelha, em Niterói, RJ

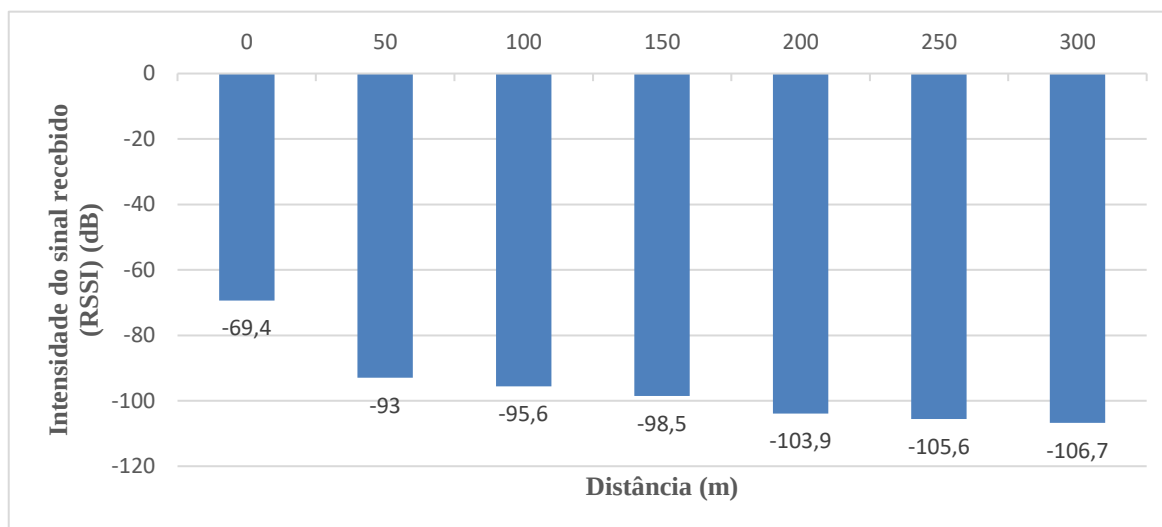
Este segundo cenário consistiu em fixar-se o rádio ID3 na varanda do quinto andar do Bloco D, da Escola de Engenharia da UFF, em Niterói, RJ, e, afastar-se o módulo ID0 de ID3, no andar térreo, segundo uma linha reta, em direção à orla da Praia da Boa Viagem, situada próximo ao Campus da Praia Vermelha, conforme mostrado na Figura 92, medindo-se a intensidade do sinal (RSSI), em dBm, recebido por ID0 de ID3 a cada 50,0 metros, nos pontos A, B, C, D, E, F e G.



Figura 92. Medições da intensidade do sinal feitas nos pontos A a G, ao longo uma linha reta, no campus da Praia Vermelha, em Niterói, RJ.

Fontes: Google Maps e o autor.

Os valores medidos encontram-se na Figura 93. Os parâmetros LoRa usados foram: $BW = 125 \text{ kHz}$, $SF = 7$ e $CR = 4/5$.



Ponto	A	B	C	D	E	F	G
Distância (m)	0,00	50,00	100,00	150,00	200,00	250,00	300,00

Figura 93. Intensidade do sinal (RSSI), em dBm, recebido pelo rádio ID0 de ID3, nos pontos A a G, ao longo uma linha reta, no campus da Praia Vermelha, em Niterói, RJ.

Fonte: o autor.

5.3.3 Terceiro Cenário: ambiente urbano externo – Campus da Praia Vermelha, em Niterói, RJ

No terceiro cenário, o rádio ID3 foi novamente fixado na varanda do quinto andar do Bloco D, da Escola de Engenharia da UFF, em Niterói, RJ, no ponto A mostrado na Figura 94. A seguir, o rádio ID0 foi colocado no ponto B, em frente ao prédio do Instituto de Geociências, na UFF, localizado próximo ao Bloco D, distante da projeção vertical de A no térreo deste bloco por aproximadamente 200,0 metros. Verificou-se que ID0 mantinha comunicação com ID3. Depois, ID0 foi deslocado para ser posicionado no ponto C, afastado de B por cerca de 100,0 metros, em frente ao segundo edifício do Instituto da Computação da UFF, também localizado no Campus da Praia Vermelha. Entretanto, neste ponto, não foi possível estabelecer comunicação direta entre ID0 e ID3, pois o sinal era bloqueado por diversos edifícios residenciais existentes na área, cada um com mais de dez andares, em média. Então, o rádio ID2 foi ligado e disposto no ponto B. A partir deste momento, o módulo ID0, posicionado no ponto C, voltou a trocar dados com ID3, em A, através de um salto do sinal, por meio de ID2, que permanecia no ponto B.

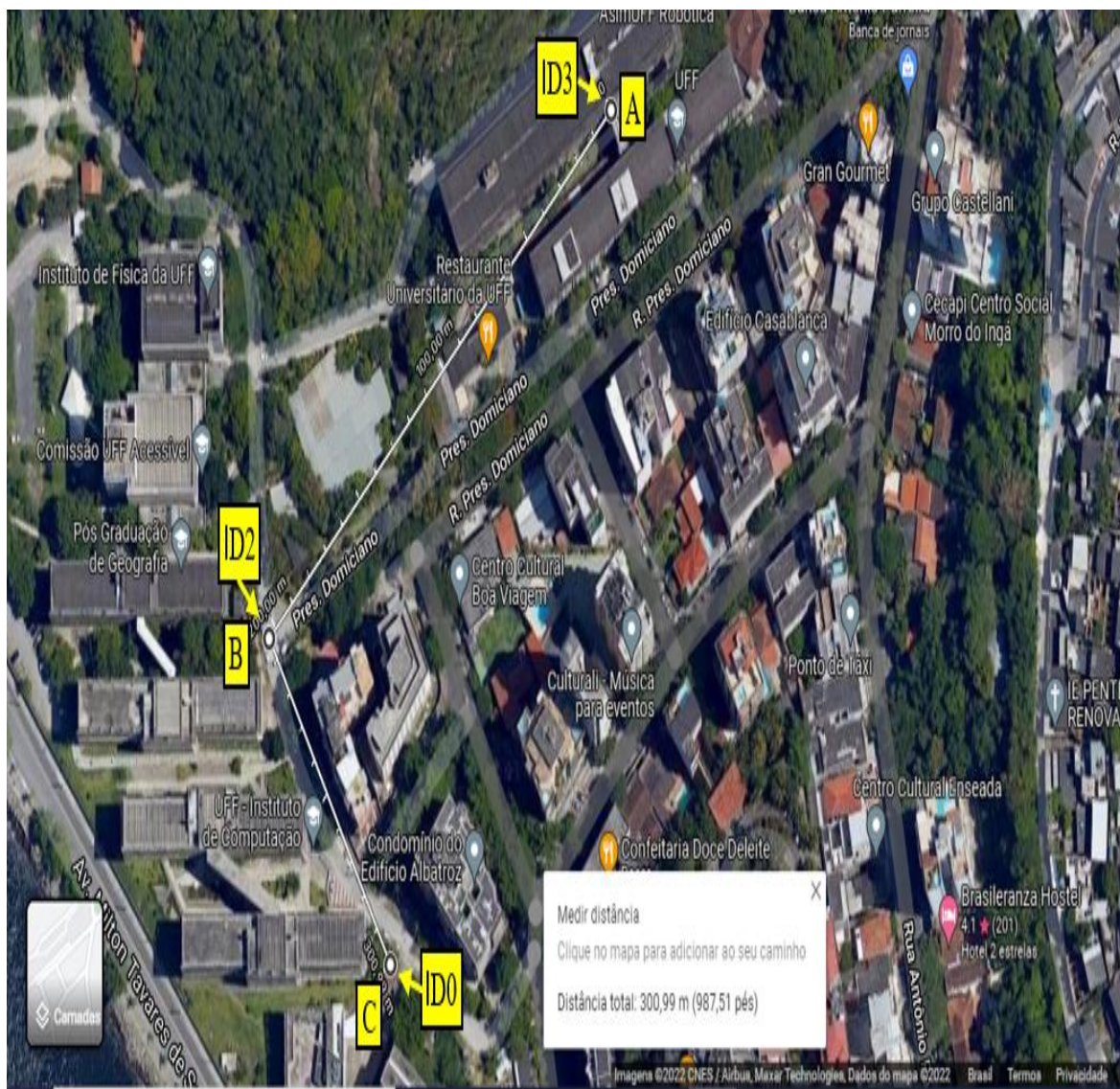


Figura 94. Localização dos rádios ID0, ID2 e ID3, no campus da Praia Vermelha.

Fontes: Google Maps e o autor.

A Figura 95 mostra, na parte de cima, que o rádio ID0, posicionado no ponto C, conseguiu estabelecer comunicação com o módulo ID2, localizado em B, de modo direto. Já a parte de baixo da figura informa que o nó ID0 manteve contato com o rádio ID3, situado no ponto A, através do nó ID2, em B, pois, ID0 não conseguia contactar ID3, em A, diretamente.

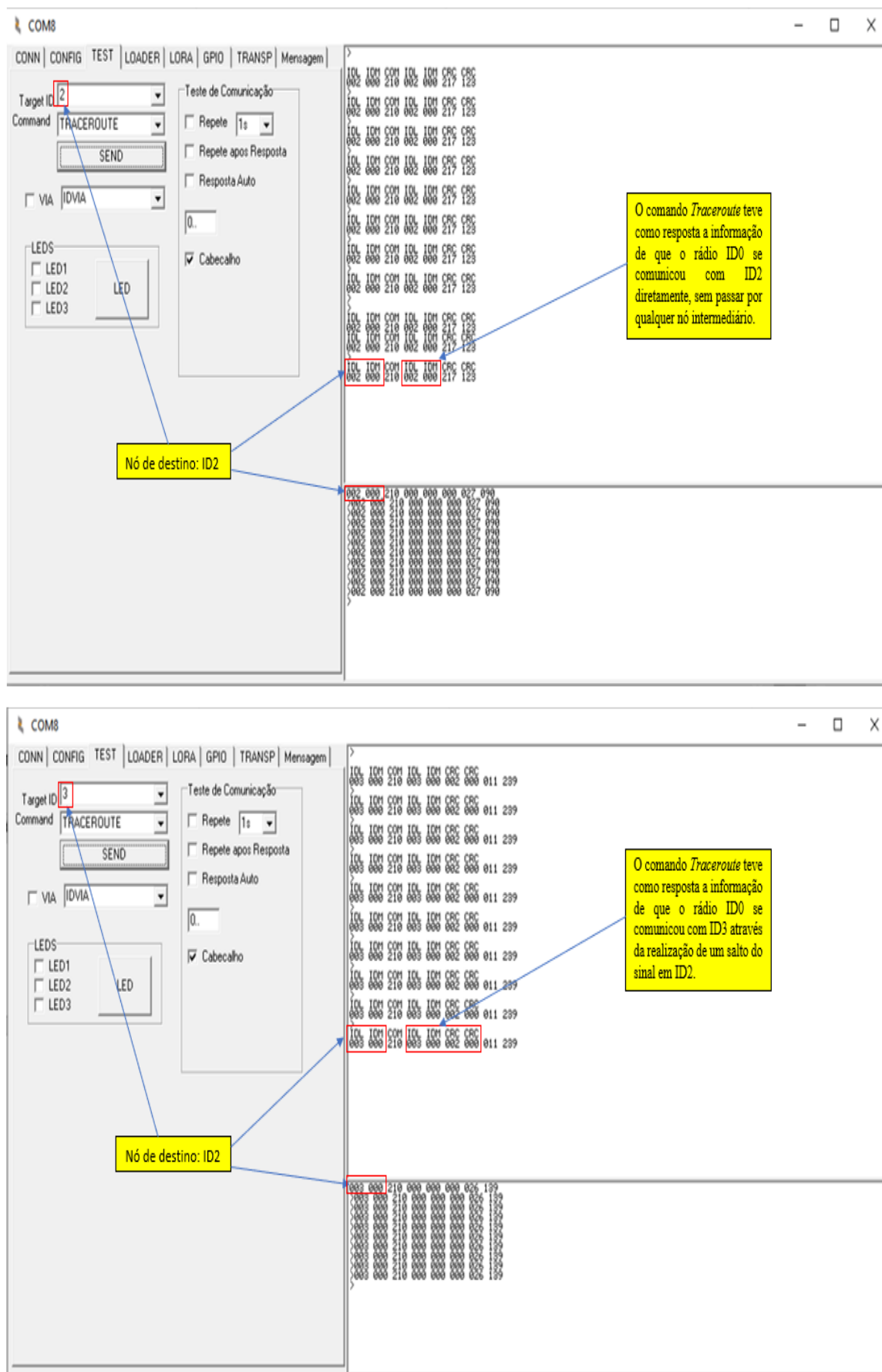


Figura 95. Comunicações de ID0 com ID2 diretamente, e de ID0 com ID3 através de um salto do sinal em ID2.

Fontes: aplicativo de comunicação e o autor.

5.3.4 Quarto Cenário: ambiente urbano externo – orla da Praia da Boa Viagem, em Niterói, RJ

Para a realização das medições de campo no quarto e último cenário deste trabalho, na Praia da Boa Viagem, Niterói, RJ, tinha-se como objetivo posicionar os três nós (ID0, ID2 e ID3) pela orla da praia, de forma que os nós ID0 e ID3 estivessem o mais possível afastados entre si, com o nó ID2 posicionado entre eles, e tentar estabelecer-se uma comunicação entre os nós ID0 e ID3 através do nó ID2. Os parâmetros LoRa adotados foram: BW = 125 kHz, Fator de Espalhamento (SF) = 7 e Taxa de Codificação (CR) = 4/5, e a metodologia adotada consistiu na fixação do nó ID0 (mestre) no início da praia, procura do ponto mais afastado possível para posicionamento do nó ID2 (escravo) que ainda preservasse a comunicação com ID0 e, por fim, determinação do local mais distante do rádio ID3 (escravo) que ainda permitisse a sua comunicação com ID0, via ID2.

A Figura 96 mostra uma visão geral da Praia da Boa Viagem, entre o Forte de São Domingos de Gragoatá e a Ilha da Boa Viagem, em Niterói, Rio de Janeiro. Como pode ser observado, esta praia possui uma curvatura natural convexa, o que impede uma extremidade de enxergar a outra.



Figura 96. Vista aérea da Praia da Boa Viagem, Niterói, RJ.

Fonte: Google Maps.

O nó ID0 (mestre) foi, inicialmente, fixado em uma árvore disposta no calçadão, perto do mar, no começo da Praia da Boa Viagem, como ilustrado na Figura 97.



Figura 97. Posição do nó ID0 (mestre) no começo da Praia da Boa Viagem, Niterói, RJ.

Fonte: Google Maps.

A Figura 98 mostra em maior detalhe a posição do nó ID0, fixado na árvore, no início da Praia da Boa Viagem, Niterói, RJ, como mencionado anteriormente.



Figura 98. Detalhe da posição do nó ID0 (mestre) no começo da Praia da Boa Viagem, Niterói, RJ.

Fonte: Google Maps.

A Figura 99 ilustra o nó ID0 (mestre) dentro de um recipiente, o qual foi fixado na árvore, no início da Praia da Boa Viagem, Niterói, RJ. Na figura pode ser observado um fio vertical, cuja função era efetuar a ligação do nó ID0 com um *notebook* para monitoramento do tráfego de dados e execução de comandos.



Figura 99. Nó ID0 (mestre) dentro de um recipiente fixado em uma árvore, no começo da Praia da Boa Viagem, Niterói, RJ.

Fonte: o autor.

Na Figura 100, é mostrado outro detalhamento do nó ID0 dentro do recipiente fixado na árvore e a sua conexão a um *notebook*, dentro de um veículo, através de um fio com conectores USB A/B em suas extremidades.



Figura 100. Nó ID0 (mestre) dentro de um recipiente fixado em uma árvore e a sua conexão a um *notebook* por um cabo USB A/B.

Fonte: Joacir de Oliveira Silva.

Uma vez fixado o nó ID0 (mestre) no começo da Praia da Boa Viagem, em Niterói, RJ, o próximo passo, neste cenário, seria escolher o ponto, ao longo da orla, onde deveria ser posicionado o nó ID2 (escravo), tendo-se como objetivo que este fosse fixado o mais longe possível de ID0 sem que houvessem perdas significativas de quadros de dados nas comunicações entre ambos, ID0 e ID2.

Para a determinação da posição ideal onde deveria ser colocado o nó ID2, procedeu-se da seguinte forma: enquanto eram encaminhados comandos de verificação de conexão (comandos *Ping*), do nó ID0 para o ID2, executados através do *notebook* ligado diretamente ao primeiro (ID0), o módulo ID2 foi deslocado ao longo da calçada justaposta ao campus da UFF da *Praia Vermelha*, como pode ser observado na Figura 101.

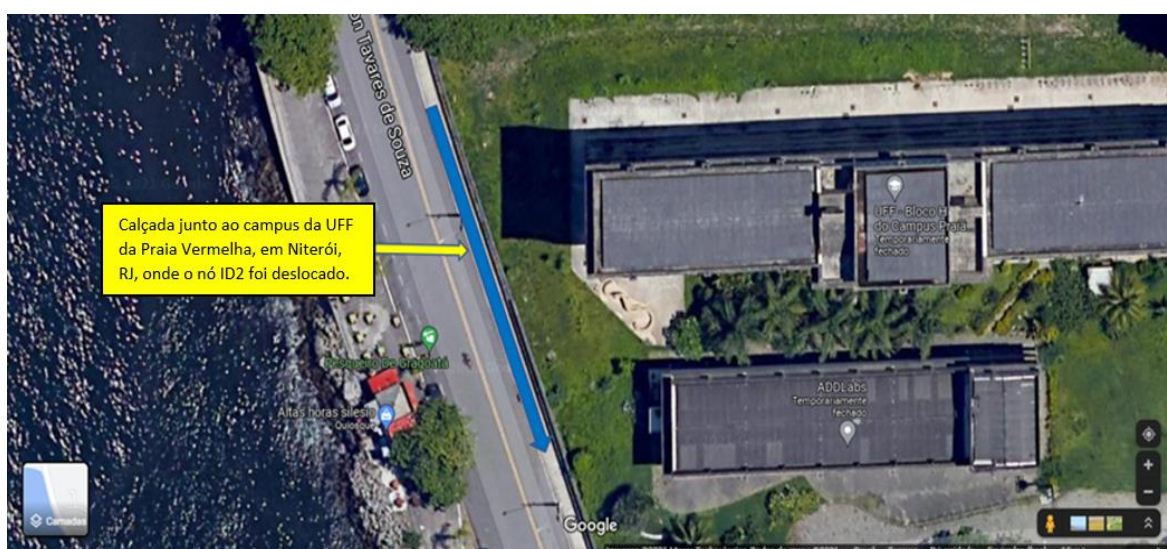


Figura 101. Calçada por onde o nó ID2 foi deslocado (flecha em azul), junto ao campus da UFF da *Praia Vermelha*, em Niterói, RJ.

Fontes: Google Maps e o autor.

Esta escolha foi feita devido ao fato de a calçada junto ao campus da UFF da *Praia Vermelha*, em Niterói, RJ, possuir diversos postes de iluminação, onde seria possível amarrar-se, em algum deles, a caixa que continha o rádio ID2. A Figura 102 mostra uma tela do aplicativo que estava sendo executado no *notebook* pelo qual era possível enviar quadros de dados do nó ID0 (mestre), parado no começo da Praia da Boa Viagem, para o nó ID2 (escravo), que estava sendo deslocado sobre esta calçada. Como pode ser visto na parte de baixo do lado direito da tela, foram enviados 10 (dez) quadros de dados, os quais foram integralmente recebidos e respondidos pelo nó ID2 (parte de cima do lado direito da tela) para o nó ID0.



Figura 102. Envio de comandos *Ping* do nó ID0 para o nó ID2.

Fontes: aplicativo de comunicação via rádio e o autor.

Prosseguindo com o deslocamento do nó ID2 sobre a calçada junto ao campus da UFF da *Praia Vermelha*, no sentido da Ilha da Boa Viagem, em uma análise qualitativa, verificou-se que, depois do prédio do *Núcleo de Estudos em Biomassa e Gerenciamento de Águas da UFF (NAB/UFF)*, à medida em que este nó se afastava do NAB, o número de quadros de dados perdidos começava a aumentar significativamente. Então, optou-se por parar de avançar, retrocedendo, sobre a calçada, e fixar o nó ID2 no poste de iluminação localizado pouco depois do *NAB/UFF*, como mostrado nas Figuras 103 e 104.



Figura 103. Vista aérea dos nós fixos ID0 e ID2.

Fontes: Google Maps e o autor.

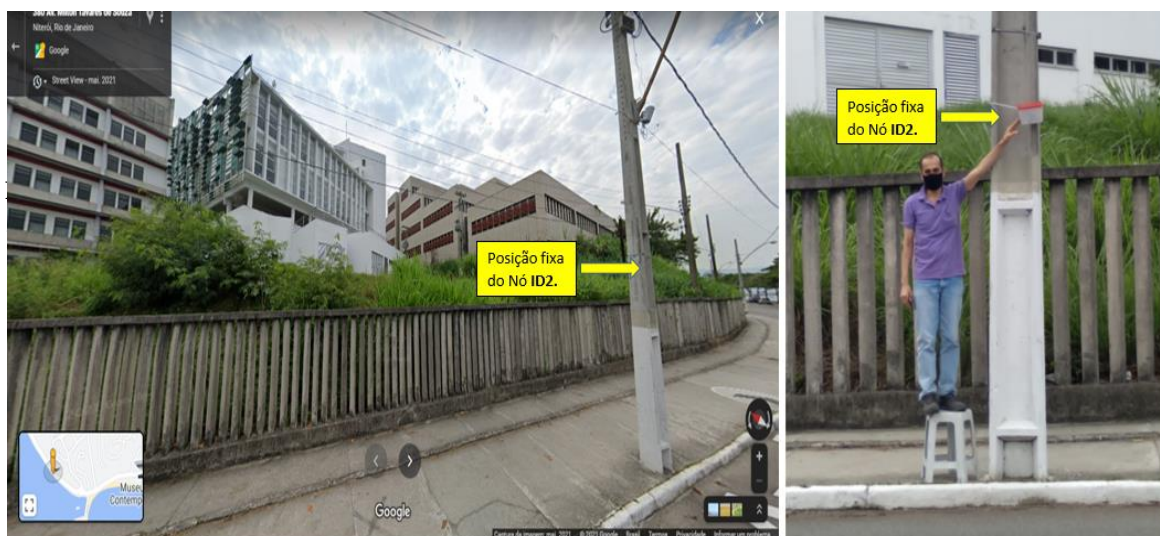


Figura 104. Detalhes da posição fixa do nó ID2.

Fonte: Joacir de Oliveira Silva.

Tendo-se fixado o nó ID2, foi verificada, mais uma vez, a comunicação entre os nós ID0 e ID2, através do envio de comandos *Ping* de ID0 para ID2. A Figura 105 mostra a tela do aplicativo de comunicação, pela qual pode ser observado que dez comandos *Ping* enviados de ID0 para ID2 (lado direito da tela, embaixo) chegaram com sucesso (lado direito da tela, em cima), comprovando a boa comunicação entre estes nós.

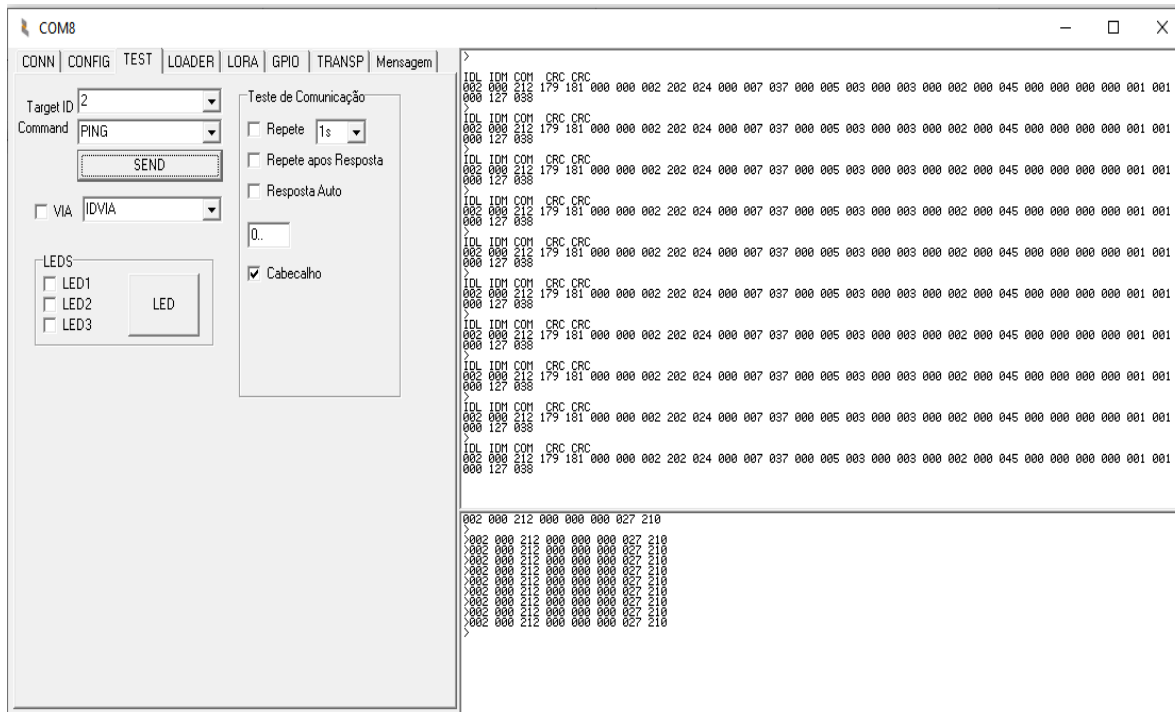


Figura 105. Tela do aplicativo de comunicação mostrando o envio e recebimento, com sucesso, de comandos *Ping*, de ID0 para ID2.

Fontes: aplicativo de comunicação via rádio e o o autor.

A Figura 106 apresenta a tela do aplicativo de comunicação na qual pode-se notar o envio, do nó ID0 para o nó ID2, de comandos *Traceroute*, cuja função é mostrar os nós da rede *mesh* percorridos pelos quadros de sinal desde o nó origem até o nó destino.

Como no momento considerado a rede *LoRa Mesh* só possuía dois nós, ID0 e ID2, os comandos *Traceroute* registrados na tela do aplicativo indicaram que os quadros de dados partiram do nó ID0 e atingiram o nó ID2 diretamente. Na figura, a sigla “IDL” significa “*ID less significant Byte*”, ou “*byte menos significativo*”, enquanto que a sigla “IDM” significa “*ID most significant Byte*”, ou “*byte mais significativo*”, pois nas redes *LoRa Mesh* da empresa Radioenge, cada nó é representado por um identificador (ID) composto por dois bytes.

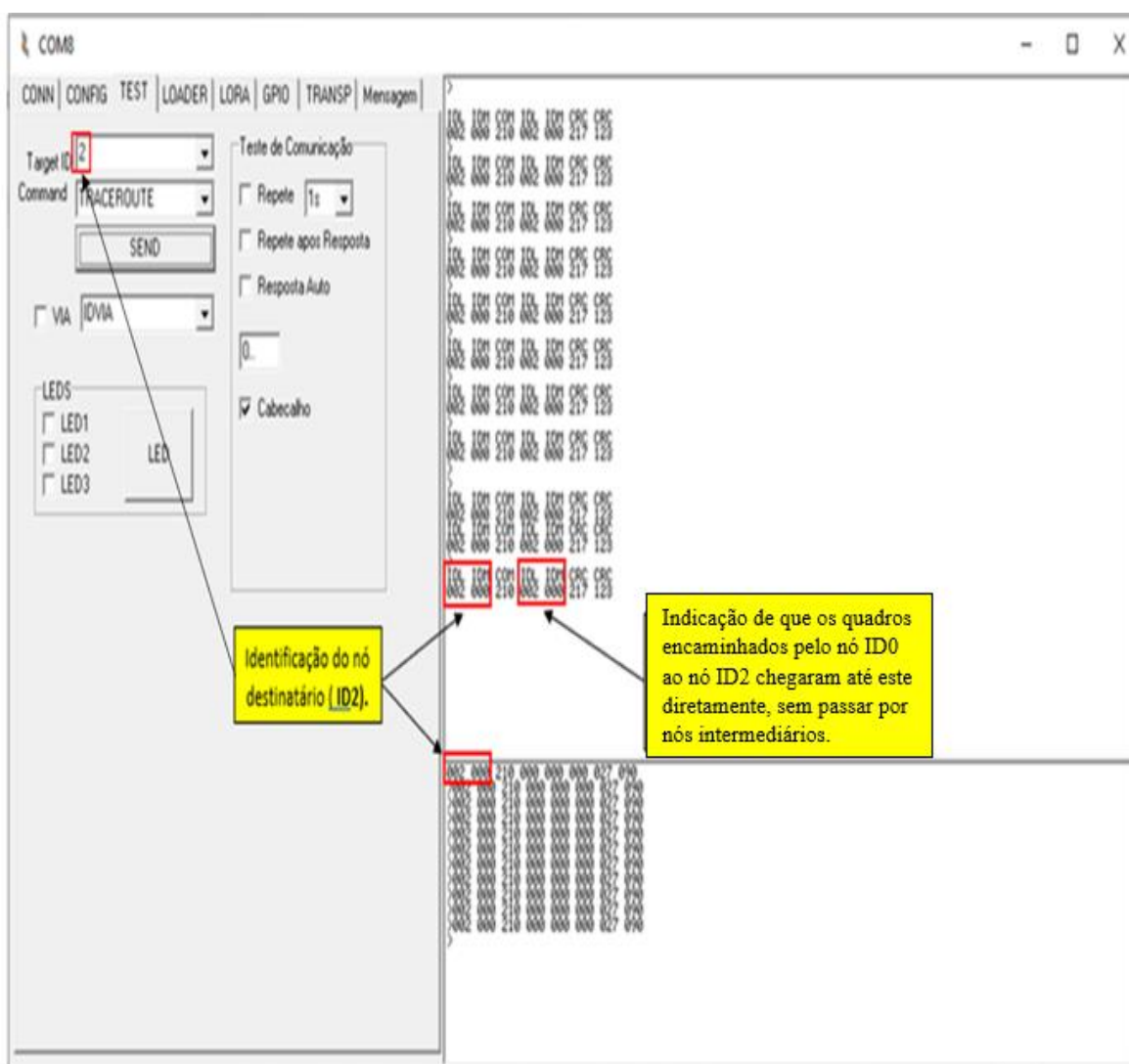


Figura 106. Tela do aplicativo de comunicação mostrando o envio e recebimento, com sucesso, de 11 quadros de dados de ID0 para ID2, ambos sem visada direta entre si, através de comandos *Traceroute*.

Fontes: aplicativo de comunicação via rádio e o autor.

A Figura 107 mostra que os nós ID0 e ID2 não possuíam visada direta entre si e a distância em linha reta entre as posições fixas deles era em torno de 466,53 metros.



Figura 107. Distância aproximada entre as posições fixas dos nós ID0 e ID2.

Fonte: Google Maps e o autor.

Uma vez fixadas as posições dos nós ID0 e ID2, restava, então, deslocar o nó ID3 adiante, no sentido da Ilha da Boa Viagem, a partir da posição fixa de ID2, para se verificar a possibilidade de uma comunicação do nó ID0 para o ID3 através de ID2. Os deslocamentos do nó ID3 ocorreram ao longo da área de estacionamento de carros, no lado da orla próximo ao mar, para evitar-se o fluxo constante de pedestres e ciclistas no calçadão junto ao mar.

Movimentando-se o nó ID3 ao longo da orla, no sentido da Ilha da Boa Viagem, desde o ponto na área de estacionamento de carros em frente ao nó fixo ID2, foram feitas tentativas de comunicação, entre os nós ID0 e ID3, em 12 (doze) pontos diferentes, conforme ilustrado na Figura 108, constituídos por aqueles nos quais foram fixados os nós ID0 (ponto P₁) e ID2 (ponto P₂), e os pontos pelos quais o nó ID3 foi objeto de tentativas de comunicação com o nó ID0 (pontos P₃ a P₁₄).

No Apêndice B estão detalhadas, ponto a ponto, as tentativas de comunicação feitas entre o nó ID0, fixado no começo da Praia de Boa Viagem, e o nó ID3, deslocado ao longo da orla desta praia, na área destinada ao estacionamento de carros, para se verificar se ambos os rádios conseguiam manter contato entre si com confiabilidade. Em cada ponto onde foram feitas as medições, eram encaminhados 10 (dez) comandos *Ping* do nó ID0, fixo no início da A, para o nó ID3, que era deslocado no sentido da Ilha de Boa Viagem.



Figura 108. Vista aérea dos pontos da orla da Praia da Boa Viagem nos quais foram fixados os nós ID0 (ponto P₁) e ID2 (ponto P₂), e aqueles por onde o nó ID3 foi deslocado (pontos P₃ a P₁₄).

Fontes: Google Maps e o autor.

Por fim, a Tabela 12 apresenta um resumo das medições realizadas no cenário sob análise, contemplando todos os pontos, na orla da Praia da Boa Viagem, em Niterói, RJ, em que houve medições do sinal de rádio, pelas quais o módulo ID0, localizado no início da orla (ponto P₁), fazia requisições ao nó ID3, que se deslocava ao longo da Avenida Milton Tavares de Souza, no sentido da Ilha da Boa Viagem, enquanto que o módulo ID2 permanecia fixo no meio da extensão da praia (no ponto P₂). Em cada posição em que se estabeleceu comunicação entre os nós ID0 e ID3, foram encaminhados 10 (dez) comandos *Ping* de ID0 para ID3 e verificados quantos quadros chegaram com sucesso e quantos foram perdidos.

Tabela 12. Resumo das medições de sinal realizadas no cenário externo caracterizado pela orla da Praia da Boa Viagem, em Niterói, RJ.

Posições do nó ID3	Referência	Taxa de quadros recebidos com sucesso por ID0	Taxa de quadros perdidos	Distância ID2-ID3 (m)	Distância Total (ID0-ID2) +(ID2-ID3) (m) Obs.: ID0→ID2 = 466,53 m
Nó móvel ID3 situado em P ₂	Poste em frente àquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	90%	10%	12,00	478,53
Nó móvel ID3 situado em P ₃	<i>Primeiro</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	100%	0%	44,71	511,24
Nó móvel ID3 situado em P ₄	<i>Segundo</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	100%	0%	79,75	546,28
Nó móvel ID3 situado em P ₅	<i>Terceiro</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	100%	0%	106,55	573,08
Nó móvel ID3 situado em P ₆	<i>Quarto</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	100%	0%	141,49	608,02
Nó móvel ID3 situado em P ₇	<i>Quinto</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	100%	0%	179,16	645,69
Nó móvel ID3 situado em P ₈	<i>Sexto</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	100%	0%	206,82	673,35
Nó móvel ID3 situado em P ₉	<i>Sétimo</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	100%	0%	253,57	720,10

Continua.

Posições do nó ID3	Referência	Número de quadros recebidos com sucesso por ID3	Número de quadros perdidos	Distância ID2-ID3 (m)	Distância Total (ID0-ID2) +(ID2-ID3) (m) Obs.: ID0→ID2 = 466,53 m
Nó móvel ID3 situado em P ₁₀	Oitavo poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	91,67%	8,33%	284,06	750,59
Nó móvel ID3 situado em P ₁₁	Nono poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	78,57	21,43%	318,22	784,75
Nó móvel ID3 situado em P ₁₂	Décimo poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	68,75%	31,25%	345,16	811,69
Nó móvel ID3 situado em P ₁₃	Décimo primeiro poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	0%	100%	365,56	832,09
Nó móvel ID3 situado em P ₁₄	Décimo segundo poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	0%	100%	395,32	861,85

Fonte: o autor.

Da observação da Tabela 12, nota-se que nos 13 (trezes) pontos em que foram feitas tentativas de comunicação entre os nós ID0 e ID3, em 7 (sete) deles (P₃ a P₉) houve recebimento de 100% dos quadros encaminhados, em 4 (quatro) ocorreu perda de alguns pacotes (P₂, P₁₀, P₁₁ e P₁₂) e, nos últimos dois, a perda foi total P₁₃ e P₁₄). Possivelmente as perdas parciais de pacotes tenham ocorrido devido às interferências provocadas pelo fluxo de pessoas, carros, ônibus e caminhões pela orla da Avenida Milton Tavares de Souza no dia em que foram realizadas as medições. Isto foi, provavelmente, o caso do nó ID3 posicionado no ponto P₃, já que, apesar de estar bem próximo do módulo ID0, sofreu a interferência do tráfego de pessoas e veículos no momento das medições de sinal. Já as perdas totais de quadros aconteceram nos dois últimos pontos (P₁₃ e P₁₄), por estarem mais afastados e sem linha de visada direta entre os nós ID0 e ID3.

Capítulo 6 – Conclusão

A Internet das Coisas (IoT), novo conceito surgido a partir das áreas de engenharia de telecomunicações e redes de computadores, foi associada, inicialmente, a objetos conectados e interoperáveis que apresentavam a propriedade de poder ser localizados de forma única através do uso de dispositivos de identificação por radiofrequência (RFID), mas, posteriormente, passou a ser relacionada a diversas outras tecnologias, como sensores, atuadores, aparelhos GPS, aparelhos móveis, máquinas de vários tipos e naturezas etc.

Nos dias atuais, a Internet das Coisas (IoT) pode ser vista como uma grande infraestrutura de rede global à qual estão conectados bilhões de dispositivos, número este em constante crescimento, que periodicamente, comunicam-se entre si, atendendo às mais diversas finalidades e serviços, e congregando a existência de diversas outras importantes tecnologias, como RFID, código de barras, QR-Code, redes WSN (*Wireless Sensor Networks*), redes sociais, GPS, computação em nuvem, NFC (*Near Field Communication*), Wi-Fi, telefonia celular 1G a 5G, *Smartphones*, ZigBee, WIMAX, SigFox, LoRa, NB-IoT etc.

Algumas aplicações já existentes na área de IoT que utilizam tecnologias de rádio de curto alcance, como *Bluetooth*, *Bluetooth Low Energy (BLE)*, ZigBee e outras afins, não se mostram apropriadas para o atendimento dos requisitos impostos pelas atividades que necessitam de longo alcance, baixas taxas de dados e pequeno consumo de energia. As soluções oferecidas pela tecnologia celular (nas suas várias gerações, de 1G a 4G), apesar de cobrirem grandes distâncias e oferecerem velocidades de conexão cada vez maiores, apresentam gastos elevados de energia, o que levou, então, ao surgimento de uma nova tecnologia de comunicação, através das redes de baixo consumo e longo alcance (LPWAN).

As redes LPWAN caracterizam-se por oferecer conectividade a dispositivos que consomem pouca energia e encontram-se distribuídos em áreas geográficas amplas. Atualmente, há várias opções de redes LPWAN disponíveis. Três das mais destacadas são as oferecidas pelas tecnologias Sigfox, NB-IoT e LoRa / LoRaWAN, com sua variação *LoRa Mesh*. Sigfox e Lora têm maior alcance e menor custo do que NB-IoT, mas esta apresenta menor latência e melhor qualidade de serviço. Além disso, a tecnologia LoRa, quando comparada à Sigfox, oferece comunicação bidirecional, maiores larguras de banda e número superior de mensagens.

Atualmente, a tecnologia LoRa / LoRaWAN é uma das mais estudadas e implementadas devido à facilidade de construção de redes privadas que utilizam um padrão aberto. As redes LoRaWAN típicas caracterizam-se por apresentar salto único do sinal, em uma topologia do tipo estrela. Recentemente, diversos estudos propuseram redes LoRaWAN com multissaltos, através das redes sem fio em malha (*LoRa Mesh*), que apresentam soluções para situações específicas em que a tecnologia LoRa / LoRaWAN mostra limitações, justamente por apresentar salto único em sinal e topologia estrela, como no monitoramento de infraestruturas subterrâneas ou internas (indoor) de drenagem urbana de águas, de esgotamento sanitário, de dutos para transporte de combustíveis etc. Assim, pelas características de alcance, custo, tipo de comunicação, custo e topologia de rede, a tecnologia *LoRa Mesh* foi a escolhida para o desenvolvimento deste trabalho.

Com o propósito de se estudar o desempenho da comunicação *LoRa Mesh*, foi montado um protótipo simples, formado por componentes de baixo custo e fácil aquisição no mercado, constituído por três rádios *LoRa Mesh* RD42C, três placas USB-IoT e cabos de ligação, fabricados com tecnologia nacional, pela empresa Radioenge, além de baterias de Íon-Lítio, para alimentação dos circuitos em campo, e de um *notebook*, no qual foi instalado um aplicativo para a configuração dos módulos da rede e para o monitoramento do tráfego de mensagens. Após a configuração inicial, os módulos passaram a trocar mensagens entre si, através da frequência ISM de 915 MHz, largura de banda de 125 kHz, do uso de fatores de espalhamento de 7 a 12, e do emprego de taxas de codificação de 4/5 a 4/8.

Como o objetivo era realizar ensaios em um ambiente urbano, foram escolhidos quatro cenários, sendo um deles interno e os demais externos. O cenário urbano interno consistiu na análise do desempenho do protótipo montado no interior do chamado Bloco D, da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense (UFF), em Niterói, Rio de Janeiro, caracterizado por ser um edifício de cinco andares, localizado no campus da Praia Vermelha da UFF. O segundo e terceiro cenários urbanos, de natureza externa, foram realizados em área aberta deste campus, próxima ao Bloco D. E o quarto e último cenário urbano, também externo, ocorreu na orla da Praia da Boa Viagem, situada perto do referido campus.

Os ensaios foram realizados com a intenção de se verificar a ocorrência de salto do sinal, o que ficou constatado durante as atividades desenvolvidas no terceiro e quarto cenários, em

que as mensagens encaminhadas por um módulo chegaram a outro mais afastado por intermédio do módulo situado a meio caminho de ambos.

Os experimentos mostraram que a tecnologia *LoRa Mesh* apresenta boa resistência a interferências e a ocorrência de salto em sinal se deu de forma natural em áreas espaçadas, sendo que em uma delas, os nós mais afastados distavam entre si 811,69 metros, aproximadamente. No entanto, os resultados de alcance máximo obtidos ficaram aquém do que normalmente é divulgado nos materiais publicitários.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que a tecnologia *LoRa Mesh* mostra-se viável para o uso em situações nas quais não é possível o emprego das soluções LoRa/LoRaWAN, devido às suas limitações já abordadas, como no monitoramento de sistemas dispostos em estruturas subterrâneas e internas, nas quais as outras opções disponíveis mostram-se onerosas ou apresentam obstáculos técnicos muito desafiadores.

6.1. Trabalhos Futuros

Dando continuidade a esta dissertação, poder-se-ia pensar, como trabalhos futuros, na implementação de novos ensaios nas seguintes condições:

- Emprego das larguras de banda de 250 kHz e 500 kHz;
- Uso de novas combinações dos parâmetros LoRa *Potência* do sinal (P), *Largura de Banda* (BW), *Fator de Espalhamento* (SF) e *Taxa de Codificação* (CR);
- Configuração de uma rede *LoRa Mesh* contendo um maior número de rádios e verificando-se o impacto disso no seu desempenho;
- Simulação de uma estrutura subterrânea para instalação dos nós da rede *LoRa Mesh* e verificação de como ela se comportaria;
- Análise da extensão máxima possível dos nós em área plana e aberta;
- Implementação de um *gateway* para envio de dados para a nuvem;
- Configuração e uso de uma segunda rede *LoRa Mesh* para analisar-se como ela teria o seu desempenho afetado pela primeira.
- Ensaios na orla da Praia da Boa Viagem com outras tecnologias como Wi-Fi HaLow, ZigBee, NB-IoT etc., comparando-se os desempenhos com a LoRa.

Bibliografia

- [1] ASHTON, K. "Internet of Things." RFID Journal, 2009.
- [2] XU, L. D.; HE, W.; LI, S. "Internet of Things in Industries: A Survey." IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014.
- [3] KRANENBURG, R. van. "The Internet of Things: A Critique of Ambient Technology and the All-Seeing Network of RFID." Amsterdam, The Netherlands: Institute of Networks Cultures, 2007.
- [4] RUANO, E. "LoRa protocol - Evaluations, limitations and practical test". Semantic Scholar., May 11, 2016.
- [5] MEKKI, K.; BAJIC, E.; CHAXEL, F.; MEYER, F. "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment." ScienceDirect Journals & Books. ICT Express, Vol: 5, Issue: 1, Page: 1-7, 2019.
- [6] RAZA U.; KULKAMI P.; SOORIYABANDARA, M. "Low Power Wide Area Networks: An Overview." IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 19, nº 2, pp. 855-873, Secondquarter, 2017.
- [7] SEMTECH CORPORATION. "What is LoRa?" 2021. [On-line] Disponível em: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.
- [8] SEMTECH CORPORATION. "A Brief History of LoRa: Three Inventors Share Their Personal Story at the Things Conference." January 2020, [On-line] Disponível em: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lorhttps://blog.semtech.com/a-brief-history-of-lora-three-inventors-share-their-personal-story-at-the-things-conference> .
- [9] LORA ALLIANCE. 2021. [On-line] Disponível em: <https://lora-alliance.org/>.
- [10] SEMTECH CORPORATION. "LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview." December 2019.
- [11] TZIMOTOUDIS, P.; KERANIDIS, S.; KAZDARIDIS, G.; SYMEONIDIS, P.; KPRAKIS, T. "Demo: *LoRa Mesh* network experimentation in a city-wide testbed." Researchgate, The 13th International Workshop Conference, 2019.
- [12] ORIEL SYSTEMS. "A Short History about Telemetry.", United Kingdom, 2021. Disponível em: <http://orielsystems.com/short-history-telemetry/>.
- [13] THALES-BUILDING A FUTURE WE CAN ALL TRUST. "5G Technologies and networks (speed, use cases, rollout)". [On-line] Disponível em: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/mobile/inspired/5G>

- [14] PETÄJÄJÄRVI, J. ; K. M. ; MIKHAYLOV, K. ; ROIVAINEN, A. ; HANNINEN, T.; PETTISSALO, M. "On the Coverage of LPWANs: Range Evaluation and Channel Model for LoRa Technology." 2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Copenhagen, pp. 55-59, 2015.
- [15] BLUETOOTH, 2021. [On-line] Disponível em: <https://www.bluetooth.com/blog/wireless-connectivity-options-for-iot-applications-technology-comparison/> .
- [16] ELECTRONIC SPECIFIER. "Managing power in IoT with cellular LPWAN Technology.", 2021. [On-line] Disponível em: <https://www.electronicspecifier.com/news/analysis/managing-power-in-the-iot-with-cellular-lpwan-technology>.
- [17] SIGFOX, 2021. [on-line] Disponível em: <https://www.sigfox.com/en> .
- [18] SIGFOX, 2021. [on-line] Disponível em: <https://build.sigfox.com/technical-quickstart> .
- [19] SINGH, R. K.; PULUCKUL, P. P.; BERKVEN, R.; WEYN, M. "Energy Consumption Analysis of LPWAN Technologies and Lifetime Estimation for IoT Application." Sensors, MDPI, 2020. DOI: [10.3390/s20174794](https://doi.org/10.3390/s20174794)
- [20] MEKKI, K.; BAJIC, E.; CHAXEL, F.; MEYER, F. "Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN and NB-IoT." 2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops). DOI:[10.1109/PERCOMW.2018.8480255](https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2018.8480255) ; Corpus ID: 52930218, 2018.
- [21] QUALCOMM. [On-line] Disponível em: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/08/02/understanding-3gpp-starting-basics> . Data da consulta: 16/04/2021.
- [22] WANG, Y. P. E.; LIN X.; ADHIKARY A.; GRÖVLEN, A.; SUI, Y.; BLANKENSHIP, Y.; BERGMAN, J.; RAZAGHI, H. S. "A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things." IEEE Communications Magazine, Volume 55, Issue 3, March 2017, pages 117-223. DOI: [10.1109/MCOM.2017.1600510CM](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600510CM) , 2017.
- [23] ADHIKARY A.; LIN X.; WANG, Y. P. E. "Performance evaluation of NB-IoT coverage." 2016 IEEE 84th Conference on Vehicular Technology (VTC).
- [24] KUROSE, J., F. ; WETHERAL, D. J. "Computer Networking A Top-Down Approach Featuring the Internet." Pearson, 6th. edition. 2011.
- [25] TANENBAUM, A. S.; ROSS, K. W. "Computer Networks." Pearson, 5th edition, 2013.
- [26] SEMTECH CORPORATION. "An In-deph Look at LoRaWAN Class A Devices." November 2019.

- [27] GSMA WHITE PAPER. "GSMA NB-IoT Deployment Guide to Basic Feature Set Requirements - v3.", June 2019.
- [28] SINHA, R. S.; WEI, Y.; HWng, S.-H. "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT." KICS - The Korean Institute of Communications and Information Sciences, ScienceDirect, ICT Express, ScienceDirect, ICT Express 3 (2017) 14-21, 2017.
- [29] LORA ALLIANCE. "LoRaWAN L2 1.0.4 Specification". October, 2020.
- [30] LATHI, B. P.; DING, Z. "Modern Digital and Analog Communication Systems." Oxford University Press, 4th edition, USA, 2009.
- [31] ZHANG, C.; DANG, H.; XIONG, Y.; YAN, T. "Spread spectrum algorithm resistance to wideband non-stationary interference." IET Journals - The Institute of Engineering and Technology. IET Radar Conference (IRC 2018).
- [32] SEMTECH CORPORATION. "LoRa Modulation Basics AN1200.22." May, 2015.
- [33] ROBYNS, P.; LAMOTTE, W.; THENAERS, W. "A Multi-Channel Software Decoder for the LoRa Modulation Scheme." Research Gate. Conference Paper. January, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324049995_A_Multi-Channel_Software_Decoder_for_the_LoRa_Modulation_Scheme. DOI: 10.5220/0006668400410051
- [34] BAPATHU, H. R.; BORKOTOKY, S. S. "The LoRa Modulation over Rapidly-Varying Channels: Are the Higher Spreading Factors Necessarily more Robust?". IEEE Xplore. 2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Las Vegas, NV, USA. March 11, 2021.
- [35] SEMTECH CORPORATION. "An In-deph Look at LoRaWAN Class B Devices." November 2019.
- [36] LIE, R. MOBILEFISH Webpage. Zaandam, The Netherlands, 2018. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=0FCrN-u-Vpw>. Data da consulta: 11/05/2021.
- [37] SEMTECH CORPORATION. "Understanding the LoRa Adaptive Data Rate". December 2019.
- [38] COUTAUD, U.; HEUSSE, M.; TOURANCHEAU, B. "LoRa Channel Characterization for Flexible and High Reliability Adaptive Data Rate in Multiple Gateways Networks." MDPI, Grenoble, France, April 2, 2021.
- [39] SCIENCEDIRECT JOURNALS & BOOKS. "Spreading Spectrum", from Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/spreading-factor>.
- [40] MOKO SMART Webpage #1 Smart Device Private-Label Solution in China, 2020. Disponível em: <https://www.mokosmart.com/nl/lora-frequency/>.

- [41] SEMTECH CORPORATION. "An In-deph Look at LoRaWAN Class C Devices." November 2019.
- [42] AVSYSTEM. Posted on August 27, 2019, updated on November 04, 2020.[On-line] Disponível em: <https://www.avsystem.com/blog/iot-sensors-iot-actuators/> .
- [43] ARROW ELECTRONICS INC. September 11, 2018.[On-line] Disponível em: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/understanding-active-and-passive-infrared-sensors> .
- [44] DETECTIVE STORE, 2021.[On-line] Disponível em: <https://www.detective-store.com/electrochemical-breathalyzers-243> .
- [45] THE THINGS NETWORK. [On-line] Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/> .
- [46] CISCO INC. [On-line] Disponível em: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/routers/wireless-gateway-lorawan/index.html> .
- [47] MULTITECH DEVELOPERS RESEARCH, 2021. [On-line] Disponível em: <http://www.multitech.net/developer/products/multiconnect-conduit-platform/> .
- [48] POLYCASE. WHAT ARE IP RATINGS? 2021.[On-line] Disponível em: <https://www.polycase.com/techtalk/learningcenter/ip-ratings>.
- [49] IOT GLOBAL NETWORK, 2021. [On-line] Disponível em: <https://www.iotglobalnetwork.com/products/single/id/3146/ug87-outdoor-lorawan-gateway-smart-grid> .
- [50] CENTENNIAL SOFTWARE SOLUTIONS, December 10, 2018. [On-line] Disponível em: <https://www.centennialsoftwaresolutions.com/post/deveui-appuei-joinuei-and-appkey#:~:text=procedure%20is%20executed,-,From%20the%20LoRaWAN%20Spec%20v1.,and%20the%20session%20keys%20derivation>.
- [51] LORA ALLIANCE. "RP002-1.0.2 LoRaWAN Regional Parameters", 2020.
- [52] THE THINGS NETWORK. [On-line]. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/security/>.
- [53] RADIOENGE. [On-line] Disponível em: <https://www.radioenge.com.br/produto/modulo-loramesh/>.
- [54] ADAFRUIT INDUSTRIES - A Minority and Woman-owned Business Enterprise (M/WBE). [On-line] Disponível em: <https://www.adafruit.com/> .
- [55] PROJECT HUB. [On-line] Disponível em: <https://create.arduino.cc/projecthub/MinukaThesathYapa/dht11-dht22-sensors-temperature-using-arduino-b7a8d6> .

- [56] RADIOENGE - Manual de Utilização (2021). Disponível para download em: <https://www.radioenge.com.br/produto/modulo-loramesh/> .
- [57] LUNDELL, D.; HEDBERG, A.; NYBERG, A.; FITZGERALD, E. "A Routing Protocol for *LoRa Mesh Networks*". IEEE 19th International Symposium on 'A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks', 2018.
- [58] JBM INSTRUMENTOS. 2022. Disponível em: <https://www.jbminstrumentos.com.br/produto/atenuador-coaxial-4-ghz-200-mw/> .
- [59] EBI, C.; SCHALTEGGER, F.; RÜST, A.; BLUMENSAAT, F. "Synchronous *LoRa Mesh* Network to Monitor Processes in Underground Infrastructure". *IEEE Access*, vol. 7, pp. 57663-57677, **2019**, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913985.
- [60] Adnan, A.; Salam, A. E. U.; Arifin, A.; Rizai, M. "Forest Fire Detection using LoRa Wireless Mesh Topology". 2018 2nd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology (EIConCIT), **2018**.
- [61] Berto, R.; Napoletano, P.; Savi, M. "A LoRa-Based Mesh Network for Peer-to-Peer Long-Range Communication". *Sensors* **2021**, 21, 4314. <https://doi.org/10.3390/s21134314>
- [62] Andersen, E.; Blaalid, T; Engstad, H.; Røkenes, S. "A *LoRa Mesh* Network Asset Tracking Prototype". *Researchgate*, **2020**, 501-510. 10.15439/2020F99.
- [63] Abrardo, A.; Pozzebon, A. "A Multi-Hop LoRa Linear Sensor Network for the Monitoring of Underground Environments: The Case of the Medieval Aqueducts in Siena, Italy". *Sensors* **2019**, 19, 402. <https://doi.org/10.3390/s19020402>
- [64] Cunha, M. P. "Análise e Caracterização da Cobertura LoRa para Ambiente Indoor na Frequência de 915 MHz". 2021, Dissertação. (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) - Escola de Engenharia. Universidade Federal Fluminense. Niterói, Rio de Janeiro, 2021.
- [65] IoT ANALYTICS RESARCH, September, 2021. "State of IoT 2021: Number of connected IoT devices growing 9% to 12.3 billion globally, cellular IoT now surpassing 2 billion". IoT Analytics Research, 2021. Disponível em: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>
- [66] El-Rashidy, N.; El-Sappagh, S.; Islam, S. M. R.; El-Bakry, H. M.; and Abdelrazek, S. "Mobile Health in Remote Patient Monitoring for Chronic Diseases: Principles, Trends, and Challenges". *Diagnostics - MDPI*, 2021.
- [67] UFF INSTITUCIONALIZA AÇÕES DE COLABORAÇÃO CIENTÍFICO-TECNOLÓGICA COM AS FORÇAS ARMADAS DO BRASIL. Página da UFF na Internet, 2021. Disponível em: <https://www.uff.br/?q=noticias/15-02-2019/uff-institucionaliza-acoes-de-colaboracao-cientifico-tecnologica-com-forcas> .

- [68] GONZALES, S. "What is a Virtual Library?". EaseTechJunkie, 2022. Disponível em: <https://www.easytechjunkie.com/what-is-a-virtual-library.htm> .
- [69] Domingues, H. T. "Tecnologia IoT LoRa na Automação do Abastecimento de Água". 2020, Dissertação. (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) - Escola de Engenharia. Universidade Federal Fluminense. Niterói, Rio de Janeiro, 2020.
- [70] NATIONAL INSTRUMENTS CORP., 2022. "Understanding Spread Spectrum for Communications". Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/understanding-spread-spectrum-for-communications.html#:~:text=Spread%20Spectrum%20refers%20to%20a,signal%20in%20the%20same%20band>.

Anexo A – Obtenção de uma expressão prática para a capacidade de um canal de comunicações a partir da equação de Shannon-Hartley

Na teoria da informação, o Teorema de Shannon-Hartley enuncia que [30]:

$$C = B \log_2 \left[1 + \left(\frac{S}{N} \right) \right] \text{ bits / s} \quad (1)$$

em que:

C = capacidade do canal, representando o limite teórico máximo da taxa de transmissão de informação em bits por segundo. Esta grandeza indica o número máximo de bits que poderiam ser transmitidos por segundo com uma probabilidade de erro arbitrariamente próxima de zero;

B = largura de banda do canal em Hz;

S = potência média do sinal recebido, em watts;

N = potência média do ruído presente no canal, em watts.

Desenvolvendo-se a equação (1), obtém-se:

$$\begin{aligned} C = B \log_2 \left[1 + \left(\frac{S}{N} \right) \right] &\Leftrightarrow \frac{C}{B} = \log_2 \left[1 + \left(\frac{S}{N} \right) \right] = \frac{\ln[1 + (\frac{S}{N})]}{\ln 2} \\ &\Leftrightarrow \frac{C}{B} = \frac{1}{\ln 2} \cdot \{\ln[1 + \left(\frac{S}{N} \right)]\} \end{aligned} \quad (2)$$

Lembrando-se que a Série de Taylor de uma função de variável x é:

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!} \cdot (x - a) + \frac{f''(a)}{2!} \cdot (x - a)^2 + \frac{f'''(a)}{3!} \cdot (x - a)^3 + \dots \quad (3)$$

E, fazendo-se $a = 0$ na expressão (3), obtém-se a Série de Maclaurin:

$$f(x) = f(0) + \frac{f'(0)}{1!} \cdot x + \frac{f''(0)}{2!} \cdot x^2 + \frac{f'''(0)}{3!} \cdot x^3 + \dots \quad (4)$$

Recordando que, para $f(x) = \ln(1+x)$, tem-se as derivadas primeira, segunda, terceira etc. desta função dadas por:

$$f'(x) = \frac{1}{1+x} \quad ; \quad f''(x) = (-)\frac{1}{(1+x)^2} \quad ; \quad f'''(x) = \frac{2}{(1+x)^3} \quad ; \quad \dots \quad (5)$$

E, fazendo-se $x = 0$ nas expressões (5), serão obtidos os seguintes valores:

$$f(0) = 0 \quad ; \quad f'(0) = 1 \quad ; \quad f''(0) = (-)1 \quad ; \quad f'''(0) = 2 \quad ; \quad \dots \quad (6)$$

Substituindo-se, então, (6) em (4), resultará em:

$$f(x) = \ln(1+x) = 0 + x - \frac{1}{2} \cdot x^2 + \frac{2}{6} \cdot x^3 + \dots \quad (7)$$

Fazendo -se $x = \frac{S}{N}$ em (7), obter-se-á:

$$\ln\left[1 + \left(\frac{S}{N}\right)\right] = \left(\frac{S}{N}\right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{S}{N}\right)^2 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{S}{N}\right)^3 + \dots \quad (8)$$

Levando-se em conta que, na prática, normalmente tem-se $\left(\frac{S}{N}\right) \ll 1$, as potências de $\left(\frac{S}{N}\right)$ terão valores muito menores do que $\left(\frac{S}{N}\right)$, podendo, então, ser desprezadas. Portanto, a expressão (8) ficará da seguinte forma:

$$\ln\left[1 + \left(\frac{S}{N}\right)\right] \cong \frac{S}{N} \quad , \text{ para } \left(\frac{S}{N}\right) \ll 1 \quad (9)$$

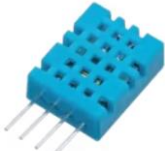
Substituindo-se $\frac{1}{\ln 2} \cong 1,443$ e o resultado obtido em (9) na expressão (2), chegar-se-á, finalmente, à expressão procurada:

$$\frac{C}{B} \cong 1,443 \cdot \left(\frac{S}{N}\right) \quad \Leftrightarrow \quad \boxed{C \cong [1,443 \cdot \left(\frac{S}{N}\right)] \cdot B} \quad (10)$$

Anexo B – Características técnicas dos sensores DHT11 e DHT22

- Quadro comparativo entre os sensores DHT11 e DHT22

Tabela 13. Principais características técnicas dos sensores DHT11 e DHT22.

	 DHT11	 DHT22
Faixa de tensão elétrica de alimentação	3,0 V a 5,0 V	3,0 V a 5,0 V
Corrente elétrica máxima durante a requisição de dados	2,5 mA	2,5 mA
Faixa de leitura da Temperatura	0° C a 50° C com +/- 2° C de acurácia	(-) 40° C a 80° C com +/- 0,5° C de acurácia
Faixa de leitura da Umidade Relativa do Ar	20% a 80% com 5% de acurácia	0% a 100% com 2% a 5% de acurácia
Taxa de leitura de dados	≥ 1,0 s	≥ 2,0 s
Número de pinos	4 com espaçamento de 0,1"	4 com espaçamento de 0,1"
Dimensões	15,5 mm X 12 mm X 5,5 mm	15,1 mm X 25 mm X 7,7 mm

Fonte: Adafruit Industries [54].

- Pinagem dos sensores DHT11 e DHT22

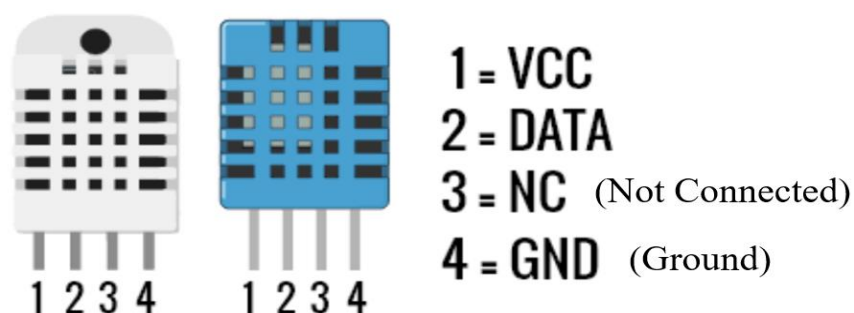


Figura 109. Identificação dos pinos dos sensores DHT11 e DHT22.

Fonte: Project Hub [55].

Anexo C – Características do módulo rádio *LoRa* *Mesh* Radioenge RD42C

- Recursos:
 - Configuração do módulo como mestre ou escravo;
 - Possui duas interfaces UART (comandos e transparente);
 - Permite a configuração via interface UART ou por rádio;
 - Dispõe de oito GPIOs, sendo duas configuráveis como entradas analógicas;
 - Apresenta três LEDs, nas cores verde, amarela e vermelha, para sinalização de operação;
 - Permite o diagnóstico remoto do dispositivo.
- Características gerais:
 - Tensão de alimentação entre 1,8 V e 12 VCC (+3,3 V sem regulador);
 - Possui baixo consumo de energia;
 - Apresenta as seguintes dimensões: 33 mm X 22 mm X 3 mm;
 - Admite uma temperatura de operação na faixa de (-) 5° C a (+) 55° C;
 - É equipado com um microprocessador ARM Cortex-M0+, de 32 bits;
 - Apresenta as seguintes taxas máximas de transmissão de dados: 21,9 kbps (LoRa) e 250 kbps (FSK);
 - Trabalha com topologia de rede em malha (*mesh*);
- Características de RF:
 - Opera na banda ISM, com a frequência de 915 MHz;
 - Possui as seguintes sensibilidades de recepção: (-) 137 dBm (Lora) e (-) 92 dBm (FSK);
 - Permite a operação com uma potência máxima de transmissão de (+) 20 dBm;
 - Pode operar por modulação LoRa ou FSK;
 - Possui a homologação ANATEL nº 02021-18-07215;
- Aplicações:
 - Internet das Coisas (IoT);

- Manual de utilização Possui baixo consumo de energia;
 - Automação doméstica e comercial;
 - Sistema de segurança e monitoramento;
 - Aquisição e envio de dados;
 - Leitura remota de sensores.
- Especificações de operação

Tabela 14. Especificações básicas de operação do módulo rádio *LoRa Mesh* RD42C.

Especificação	Descrição
Modulação	LoRa® ou FSK
Faixas de frequência	902,5 – 907 MHz e 915 – 928 MHz
Largura de banda	125 kHz / 250 kHz / 500 kHz (LoRa); 250 kHz (FSK)
Spreading Factor (LoRa)	7, 8, 9, 10, 11 e 12
Coding Rate (LoRa)	4/5, 4/6, 4/7 e 4/8
Estabilidade de frequência	±5,0 ppm (partes por milhão)
Protocolo	LoRa/MESH Radioenge
Sensibilidade	(-) 137 dBm (LoRa); (-) 92 dBm (FSK)
Potência de transmissão	Máx. (+) 20 dBm / 100 mW
Conexão com antena	Pad acastelado (pino 18) ou conector SMA-M
Interface de comunicação	UART

Fonte: Manual de utilização do módulo *LoRa MESH* da empresa Radioenge [56].

- Valores mínimos e máximos

Tabela 15. Valores máximos e mínimos de várias grandezas do módulo *LoRa Mesh* RD42C.

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Unidade
Tensão entre VCC e GND (com regulador)	(-) 0,3	16,0	V
Tensão entre VCC e GND (sem regulador)	(-) 0,3	4,0	V
Tensão nos pinos de UART	(-) 0,3	4,0	V
Tensão nos pinos GPIO e Analógicos	(-) 0,3	4,0	V
Corrente máxima drenada por uma GPIO	-	16,0	mA
Corrente máxima fornecida por uma GPIO	-	16,0	mA
Corrente máxima drenada por todas as GPIOs	-	90,0	mA
Temperatura de armazenamento	(-) 10	(+) 70	°C
Temperatura de operação	(-) 5	(+) 55	°C
Potência máxima na entrada RF	-	0,0	dBm

Fonte: Manual de utilização do módulo *LoRa Mesh* da empresa Radioenge [56].

- Pinagem

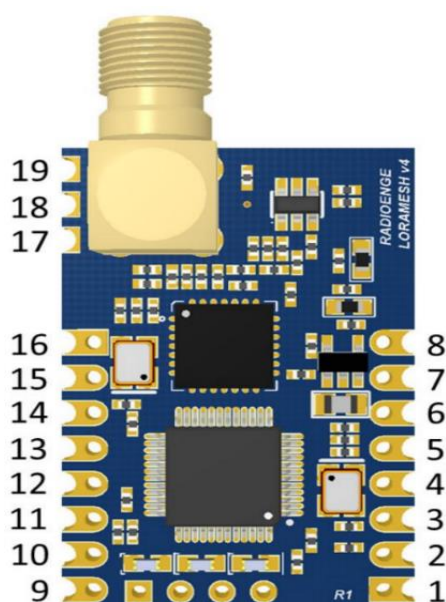


Figura 110. Módulo rádio *LoRa Mesh* RD42C, da empresa Radioenge.

Fonte: Manual de utilização do módulo *LoRa Mesh* da empresa Radioenge [56].

Tabela 16. Identificação dos pinos do módulo rádio *LoRa Mesh* RD42C.

Pino	Nome	Tipo	Descrição
1	GND	Alimentação	Conectado à terra (ground)
2	RX_1	Entrada	RX da interface UART de comando
3	TX_1	Saída	TX da interface UART de comando
4	VCC	Alimentação	Conectado à alimentação
5	VCC	Alimentação	Conectado à alimentação
6	TX_2	Saída	TX da interface UART transparente
7	RX_2	Entrada	RX da interface UART transparente
8	GND	Alimentação	Conectado à terra (ground)
9	GPIO0	I/O	Pino de uso geral
10	GPIO1	I/O	Pino de uso geral
11	GPIO2	I/O	Pino de uso geral
12	GPIO3	I/O	Pino de uso geral
13	GPIO4	I/O	Pino de uso geral
14	GPIO5	I/O ou Analógico	Pino de uso geral ou entrada analógica
15	GPIO6	I/O ou Analógico	Pino de uso geral ou entrada analógica
16	GPIO7	I/O	Pino de uso geral
17	GND	Alimentação	Conectado à terra (ground)
18	ANT	Saída RF	Saída de RF para antena externa
19	GND	Alimentação	Conectado à terra (ground)

Fonte: Manual de utilização do módulo *LoRa MESH* da empresa Radioenge [56].

- Parâmetros de operação

Tabela 17. Parâmetros de operação do módulo rádio *LoRa Mesh* RD42C.

Parâmetro	Mínimo	Normal	Máximo	Unidade
Tensão de Alimentação (com regulador)	1,8	-	12,0	V
Tensão de Alimentação (sem regulador)	1,8	3,3	3,6	V
Consumo de corrente durante uma transmissão ($V_{cc} = 3,3V$)	-	111,0	-	mA
Consumo de corrente durante uma recepção ($V_{cc} = 3,3V$)	-	20,0	-	mA
Tensão de saída em nível baixo (GPIO, $I_o = 8\text{ mA}$)	-	-	0,4	V
Tensão de saída em nível alto (GPIO, $I_o = 8\text{ mA}$)	2,9	-	-	V
Limiar de tensão de entrada em nível baixo (GPIO)	-	-	1,0	V
Limiar de tensão de entrada em nível alto (GPIO)	2,3	-	-	V
Limiar de tensão de entrada em nível baixo (USART)	-	-	10,0	V
Limiar de tensão de entrada em nível alto (USART)	2,3	-	-	V
Corrente drenada/fornecida por uma entrada	-	-	50,0	nA
Faixa de leitura das entradas analógicas	0,0	-	3,3	V
Impedância da entrada analógica	-	-	50,0	k Ω
Resolução do ADC (Analog to Digital Converter)	8	-	12	bits
Baudrate das interfaces UART	9.600	-	57.600	bps
Taxa de dados da transmissão LoRa	180	-	21.900	bps
Taxa de dados da transmissão FSK	-	250	-	kbps

Fonte: Manual de utilização do módulo *LoRa MESH* da empresa Radioenge [56].

- Taxas de transmissão de dados nas comunicações LoRa

Tabela 18. Taxas de transmissão de dados do módulo rádio *LoRa Mesh* RD42C.

Taxa de Codificação (CR) = 4/5		Fator de Espalhamento (SP)					
		7	8	9	10	11	12
Largura de Banda	125 kHz	5.469 bps	3.125 bps	1.758 bps	977 bps	537 bps	293 bps
	250 kHz	10.938 bps	6.250 bps	3.516 bps	1.953 bps	1.074 bps	586 bps
	500 kHz	21.875 bps	12.500 bps	7.031 bps	3.906 bps	2.148 bps	1.172 bps
Taxa de Codificação (CR) = 4/6		Fator de Espalhamento (SP)					
		7	8	9	10	11	12
Largura de Banda	125 kHz	4.557 bps	2.604 bps	1.465 bps	814 bps	448 bps	244 bps
	250 kHz	9.115 bps	5.208 bps	2.930 bps	1.628 bps	895 bps	488 bps
	500 kHz	18.229 bps	10417 bps	5.859 bps	3.255 bps	1.790 bps	977 bps
Taxa de Codificação (CR) = 4/7		Fator de Espalhamento (SP)					
		7	8	9	10	11	12
Largura de Banda	125 kHz	3.906 bps	2.232 bps	1.256 bps	698 bps	384 bps	209 bps
	250 kHz	7.813 bps	4.464 bps	2.511 bps	1.395 bps	767 bps	419 bps
	500 kHz	15.625 bps	8.929 bps	5.022 bps	2.790 bps	1.535 bps	837 bps
Taxa de Codificação (CR) = 4/8		Fator de Espalhamento (SP)					
		7	8	9	10	11	12
Largura de Banda	125 kHz	3.418 bps	1.953 bps	1.098 bps	610 bps	336 bps	183 bps
	250 kHz	6.836 bps	3.906 bps	2.197 bps	1.220 bps	671 bps	366 bps
	500 kHz	13.672 bps	7.813 bps	4.395 bps	2.441 bps	1.343 bps	732 bps

Fonte: Manual de utilização do módulo *LoRa MESH* da empresa Radioenge [56].

Apêndice A – Detalhamento dos Quadros LoRa e Beacon

A.1 Estrutura básica dos quadros LoRa

As mensagens LoRa utilizam o chamado *modo explícito de cabeçalho do pacote* pelo qual são incluídos um cabeçalho físico LoRa (PHDR) e um campo de checagem de erros do cabeçalho (PHDR_CRC). No modo explícito de cabeçalho, o campo PHDR armazena o comprimento da carga útil (*payload*) em *bytes*, havendo um campo para a taxa de correção de erro progressiva (*forward error correction rate*) e, também, a presença de um campo CRC (*Cyclic Redundancy Check*) opcional para a carga útil [29]. Então, a integridade desta (carga útil) é protegida por um campo CRC em mensagens de *Uplink*. Os campos PHDR, PHDR_CRC e CRC da carga útil são inseridos pelo transceptor. A Figura 111 mostra um esboço da estrutura LoRa PHY.

Size	8 Symbols	4.25 Symbols	8 Symbols		L bytes (from PHDR)	2 Bytes
Packet Structure	Preamble	Synchronization Word	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload	CRC (uplink only)

Figura 111. Estrutura de um quadro LoRa (LoRa PHY).

Fonte: LoRa Alliance RP002-1.0.2 [51].

Beacons LoRaWAN, por sua vez, são transmitidos através de modulação LoRa em modo implícito de cabeçalho, com um comprimento fixo. No modo implícito de cabeçalho, os campos PHDR e PHDR_CRC não estão presentes.

- Carga útil *PHY* (*PHYPayload*)

Todos os quadros LoRa de *Uplink* e de *Downlink* possuem uma carga útil *PHY* (*PHYPayload*) composta por um cabeçalho MAC de um *byte* (MHDR), seguido de uma carga útil MAC (*MACPayload*) constituída de sete a um valor máximo “M” de *bytes*, e são terminados por um campo contendo um código de verificação de integridade da mensagem (MIC), composto por quatro *bytes*. Nos casos em que o dispositivo final está trocando dados com o servidor de conexão à rede (*Join Server*), nos quadros LoRa respectivos, em vez do campo

MACPayload, há um campo *Join-Request* ou *Join-Accept*. A Figura 112 mostra um esboço do campo *PHYPayload*.

O comprimento máximo M do campo *MACPayload* depende da região e da taxa de dados específicas consideradas e é definido no documento *Regional Parameters*, divulgado pela organização *LoRa Alliance*, através da sua mais recente versão, por ocasião da realização desta dissertação, *RP002-1.0.2*. No mundo, conforme sugerido por esta organização, os parâmetros de comunicação LoRa variam de acordo com a área geográfica considerada. Assim, nem o dispositivo final, nem a rede devem enviar, através da taxa de dados usada na transmissão, um quadro contendo um campo *MACPayload* com um comprimento maior do que o valor máximo especificado M , ou este será silenciosamente descartado [29].

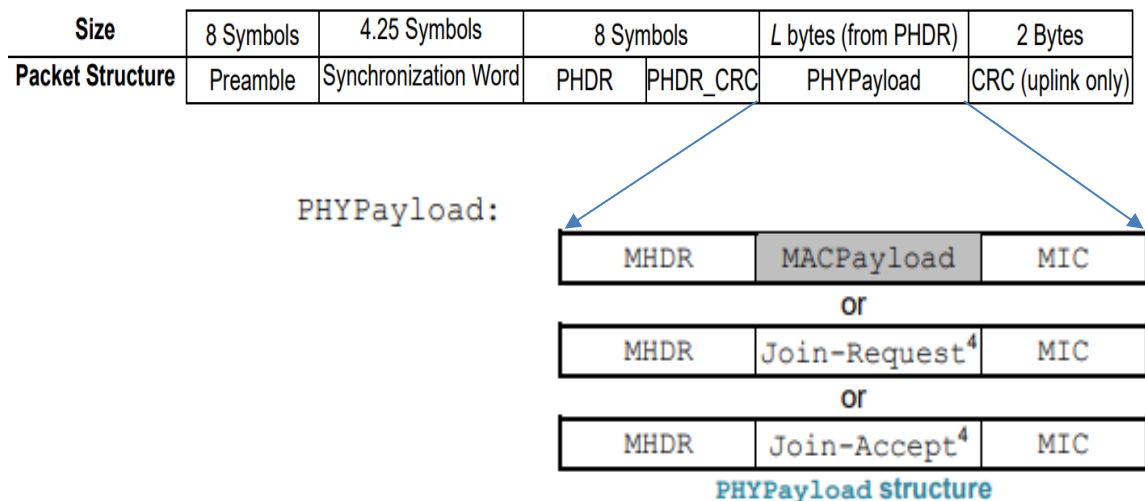


Figura 112. Estrutura da carga útil da carga útil *PHY* de um quadro LoRa (*PHYPayload*).

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

- Campo *MHDR*

O campo *MAC Header (MHDR)* é composto por dois campos, *Frame Port (FPort)*, que especifica o tipo de quadro, e *Major*, que indica a versão principal do formato do quadro da camada LoRaWAN segunda a qual ele é codificado. A Figura 113 apresenta um esboço deste campo.

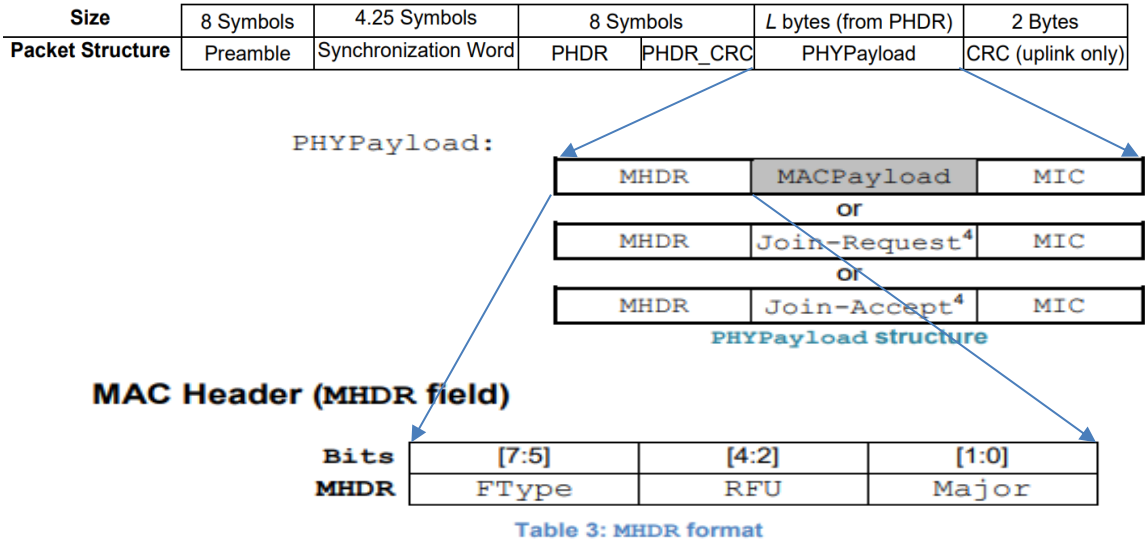


Figura 113. Campo MAC Header (MHDR).
Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

• Campo *Frame Types* (FType)

A especificação LoRaWAN possui seis diferentes tipos de quadro MAC: Join-Request, Join-Accept, dados *Uplink* não-confirmados, dados *Downlink* não-confirmados, dados *Uplink* confirmados e dados *Downlink* confirmados, conforme mostrado na tabela disposta no fim da Figura 114.

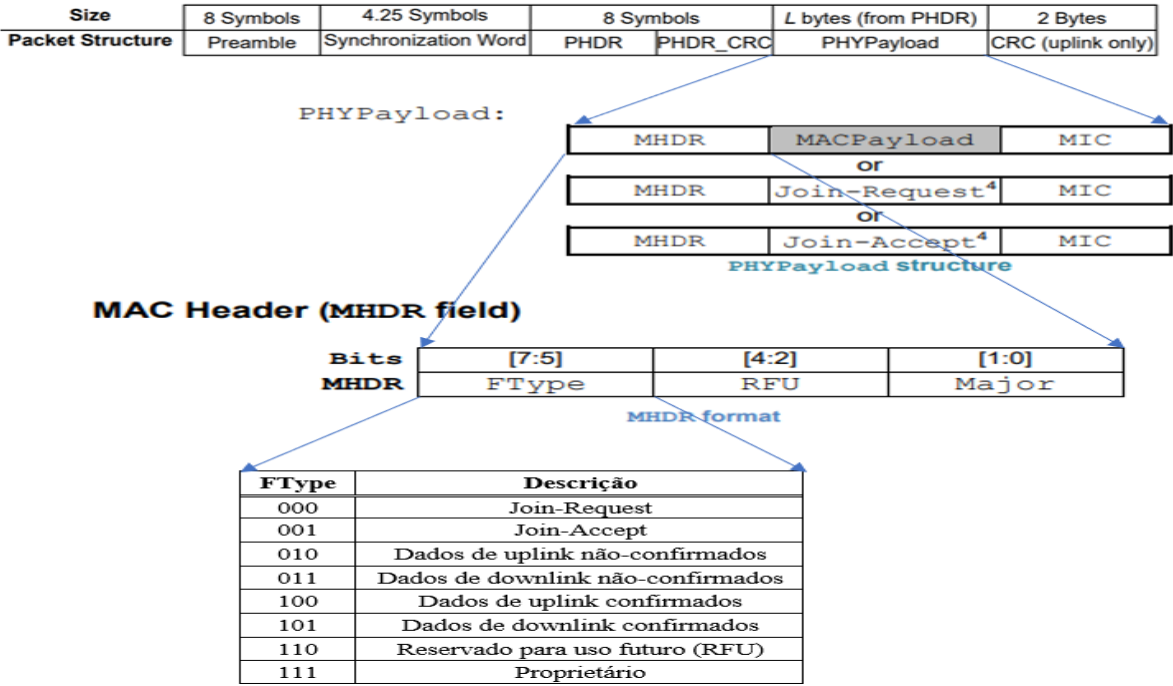


Figura 114. Campo *Frame Types* (FType).
Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

- Campo *Major*

O campo *Major* especifica a versão do formato dos quadros trocados no procedimento *Join* (*Join procedure*) e os quatro primeiros *bytes* do campo *MACPayload*. Para cada versão *Major*, os dispositivos finais podem implementar diferentes versões *Minor* do formato do quadro. No entanto, a versão *Minor* usada pelo dispositivo final deve ser conhecida de antemão pelo Servidor de Rede, através do uso de comunicação fora-de-banda (como parte, por exemplo, da informação trocada durante o processo de personalização do dispositivo final) [29]. A Figura 115 mostra um esboço do campo *Major*.

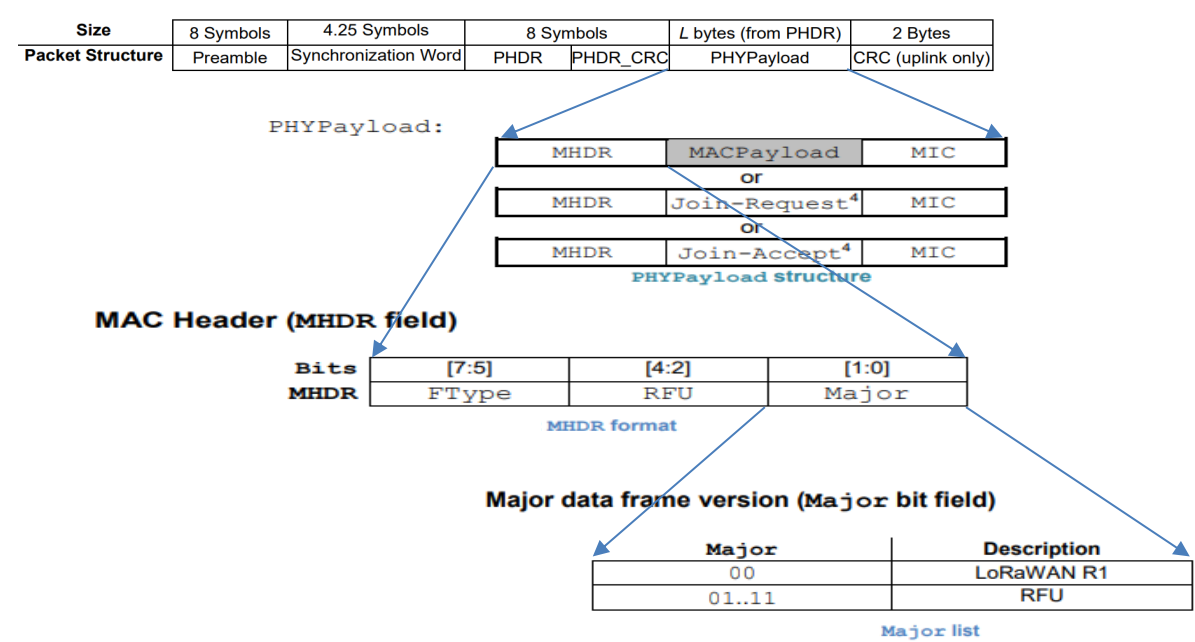


Figura 115. Campo *Major*, integrante do campo *MAC Header (MHDR)*.

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

- Campo *MACPayload*

O campo *MACPayload* possui de sete a *M bytes* de comprimento e é constituído pelos campos *Frame Header (FHDR)*, e dois campos opcionais, *Port Field (FPort)* e um campo para a carga útil do quadro MAC (*FRMPayload*), conforme pode ser visto na Figura 116.

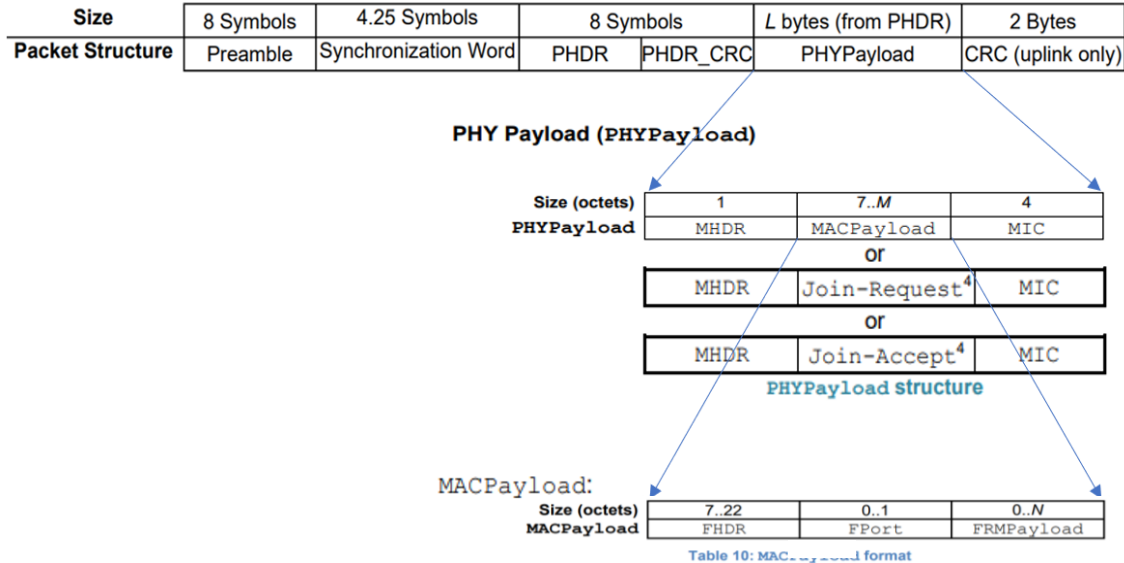


Figura 116. Campo *MACPayload*, integrante do campo *PHYPayload*.
Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

- Campo *Frame Header (FHDR)*

O campo *Frame Header (FHDR)* é composto pelo campo *DevAddr*, que contém o chamado *endereço curto de dispositivo final*, com tamanho de 4 (quatro) bytes, mais o campo de controle de quadro *FCtrl*, com 1 (um) byte de tamanho, mais o campo *FCnt*, com 2 (dois) bytes, usado para contagem de quadros, e, finalmente, mais o campo de opções de quadro *FOpts*, contendo de 0 (zero) a 15 (quinze) bytes, para o transporte de comandos MAC, conforme mostrado na Figura 117.

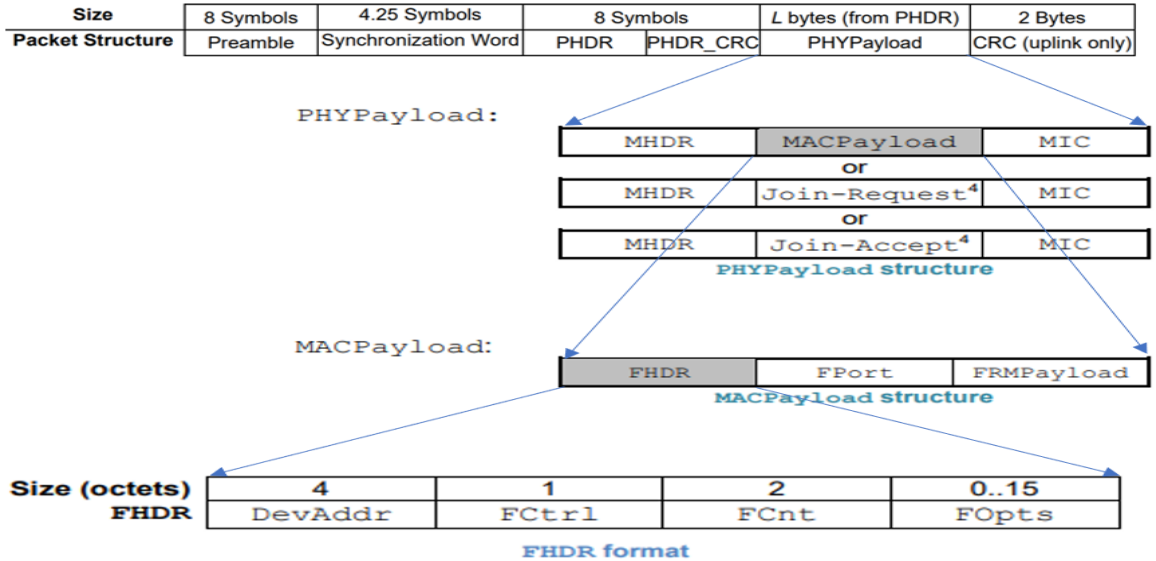


Figura 117. Campo *Frame Header (FHDR)*, integrante do campo *MACPayload*.
Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

- Campo controle de quadro (*FCtrl*)

O campo controle de quadro, *FCtrl*, tem o tamanho de 1 (um) *byte* e apresenta-se sob duas formas, uma para quadros de *Uplink*, mostrada na Figura 118, e outra para quadros de *Downlink*, detalhada na Figura 119.

- Campo *FCtrl* em quadros de *Uplink*:

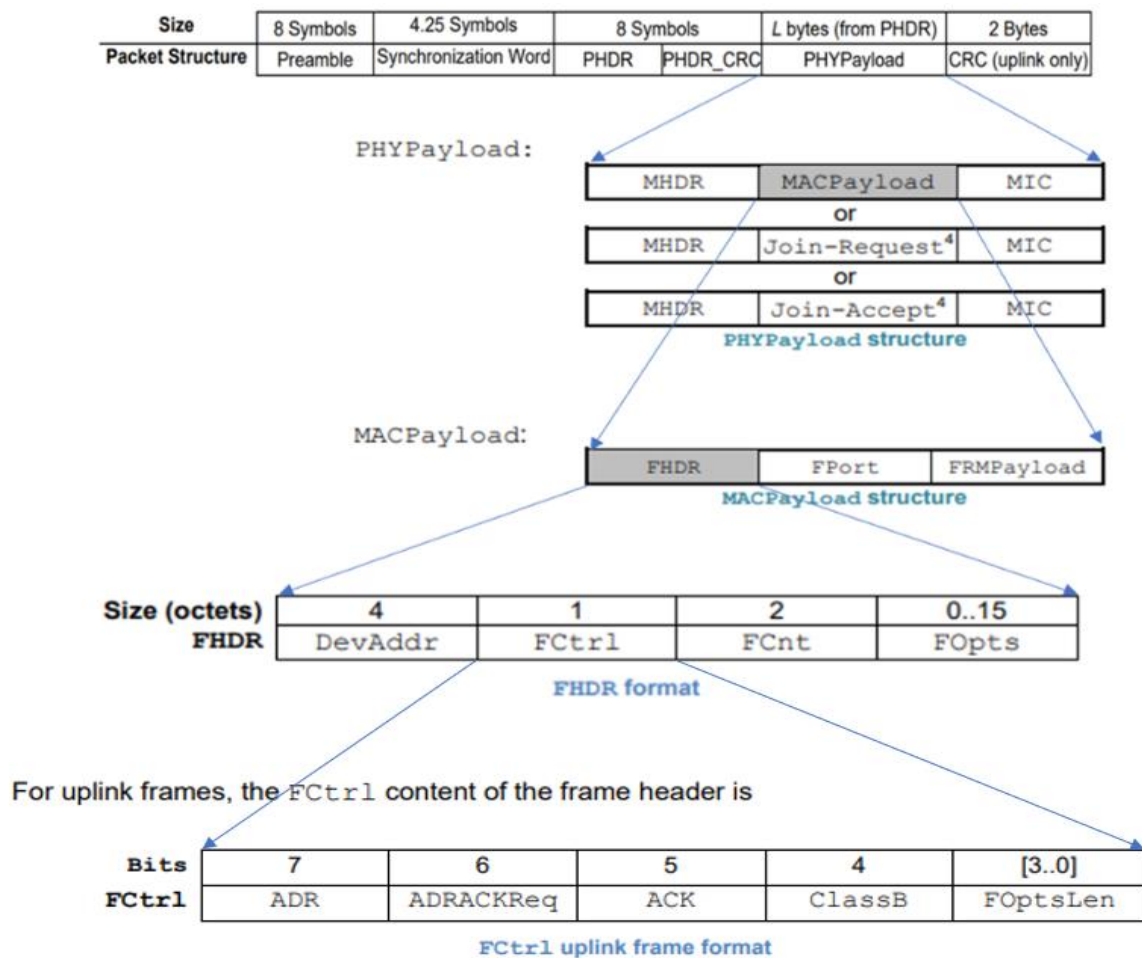


Figura 118. Campo *Frame Control (FCtrl)*, integrante do campo *Frame Header (FHDR)*, em quadros de *Uplink*.

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

Nos quadros de *Uplink*, o campo *FCtrl* é composto pelos seguintes campos:

ADR: o sistema LoRaWAN permite que os dispositivos finais utilizem qualquer uma das taxas de transmissão de dados e de potência de transmissão permitidas. Esta característica é usada pelos Servidores de Rede para adaptarem e otimizarem o número de retransmissões de mensagens, a taxa de dados e a potência de transmissão dos dispositivos finais. Isto é

chamado de *Taxa de Transmissão Adaptativa (ADR)* e, quando ela é habilitada, os dispositivos finais terão o seu desempenho otimizado no sentido de fazerem uso da taxa de transmissão de dados mais rápida, com a menor potência de transmissão possíveis;

ADRACKReq: se este bit é ativado por um dispositivo (Servidor de Rede ou dispositivo final), isto significa que ele requer uma confirmação de recebimento;

ACK: quando recebe um quadro de dados que solicita confirmação, o receptor responde com um quadro de dados que tem o bit de confirmação (ACK) ativado. Se é o Servidor de Rede que recebe tal quadro de dados solicitando confirmação, ele deve enviar uma confirmação utilizando uma das janelas de recepção Classe A abertas (Figura 43) pelo dispositivo final após uma transmissão. Por sua vez, se é o dispositivo final que recebe tal quadro de dados solicitando confirmação, em uma de suas janelas de recepção Classe A abertas, ele deve enviar uma confirmação junto com a sua próxima transmissão *Uplink* de dados. Finalmente, se o dispositivo final recebe tal quadro de dados solicitando confirmação fora de suas janelas de recepção Classe A abertas, como, por exemplo, em um *ping slot Classe B* (Figura 49), ou em uma janela RXC Classe C (Figura 51), ele (dispositivo final) deve enviar, a seguir, uma confirmação.

As confirmações somente devem ser enviadas em resposta ao último quadro recebido e não mais do que *NbTrans* vezes, em que *NbTrans* é um parâmetro do sistema LoRaWAN que armazena o número máximo de vezes que o sistema pode transmitir uma confirmação.

ClassB: se este bit é colocado em 1, isto sinaliza para o Servidor de Rede que o dispositivo final foi habilitado para atuar na Classe B e, a partir deste momento, está pronto para receber *pings* de *Downlink* periódicos.

FOptsLen: o campo *comprimento das opções de quadro (FOptsLen)* armazena o número de *bytes* do campo *opções de quadro (FOpts)*, presente no campo *FHDR*.

O campo *FOpts* transporta comandos MAC, que são comandos de administração da rede, e tem um comprimento de 0 (zero) a, no máximo, 15 (quinze) *bytes*. Estes comandos MAC pegam carona (piggyback) em quadros de dados.

Se *FOptsLen* = 0, então o campo *FOpts* deve estar ausente. Por outro lado, se *FOptsLen* ≠ 0, ou seja, se comandos MAC estão presentes no campo *FOpts*, o campo *FPort*, que será detalhado mais adiante, não poderá ter o valor 0 (zero) (*FPort* ou não está presente ou, se estiver, não pode assumir o valor zero) [29].

Comandos MAC não podem estar presentes, simultaneamente, no campo de carga útil (*FRMPayload*) e no campo opções de quadro (*FOpts*). Se isso ocorrer, o dispositivo final irá descartar o quadro silenciosamente.

- Campo *FCtrl* em quadros de *Downlink*:

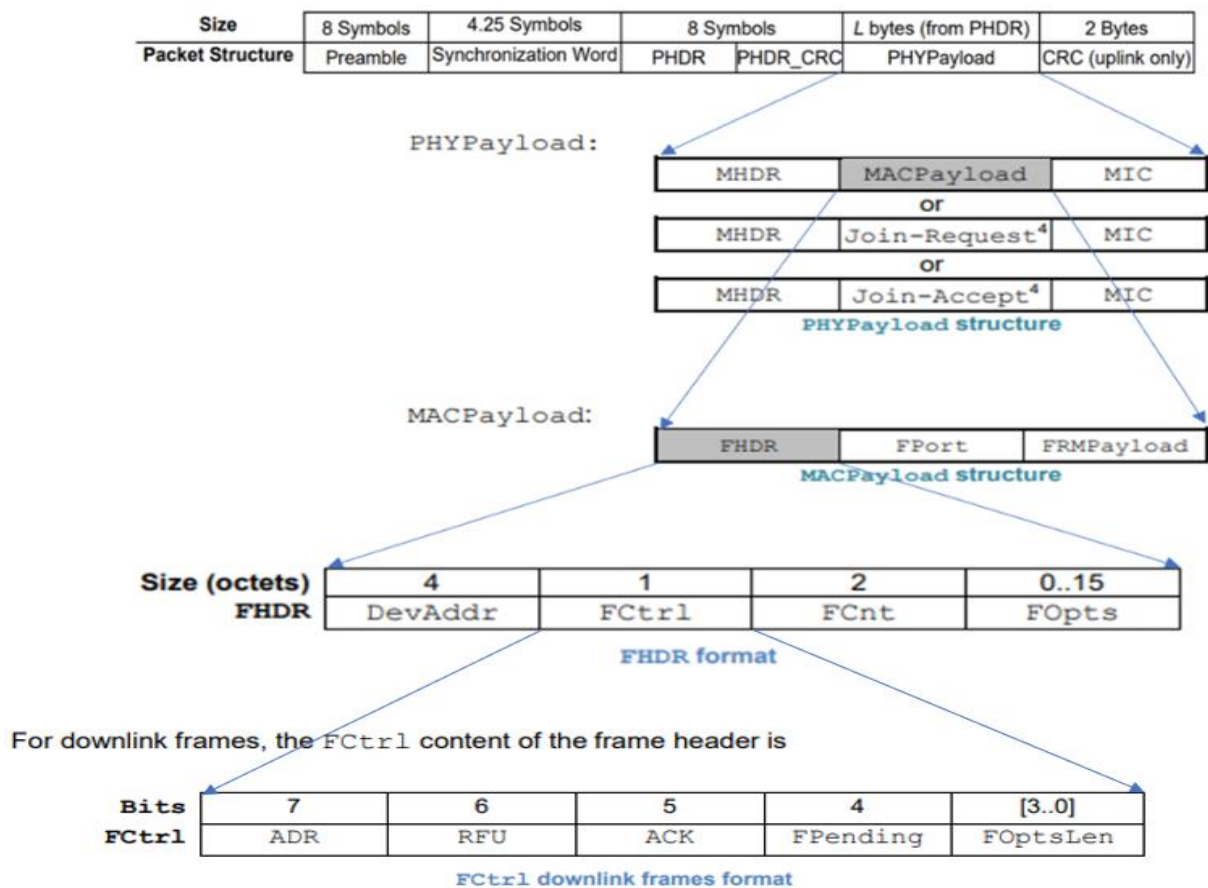


Figura 119. Campo *Frame Control (FCtrl)*, integrante do campo *Frame Header (FHDR)*, em quadros de *Downlink*.

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

Nos quadros de *Downlink*, na Figura 119, o campo *FCtrl* é composto pelos seguintes campos:

ADR: o mesmo significado dos quadros de *Uplink*;

RFU: reservado para uso futuro;

ACK: o mesmo significado dos quadros de *Uplink*;

FPending: este bit é usado somente em comunicações de *Downlink*. Em dispositivos de Classe A, o bit *FPending* indica que o Servidor de Rede tem mais dados pendentes a serem enviados e, conseqüentemente, o dispositivo final pode enviar um quadro de *uplink* tão logo quanto possível. Já em dispositivos finais Classe B, o bit *FPending* indica a prioridade de escuta em caso de conflito devido à ocorrência de colisão no recebimento de mensagens em *ping slots*.

FOptsLen: o mesmo significado dos quadros de *Uplink*;

- Campo *Frame Counter (FCnt)*

Há dois contadores de quadro para cada dispositivo final, *FCntUp* e *FCntDown*. O contador de quadro *FCntUp* é incrementado por um dispositivo final quando um quadro de dados é transmitido por ele para um Servidor de Rede (mensagem de *Uplink*). Já o contador de quadro *FCntDown* é incrementado por um Servidor de Rede quando ele envia um quadro de dados para um dispositivo final (mensagem de *Downlink*). O Servidor de Rede monitora o contador de quadros de *Uplink* e gera o contador de *Downlink* para cada dispositivo final [29]. A Figura 120 mostra o campo *FCnt* em destaque.

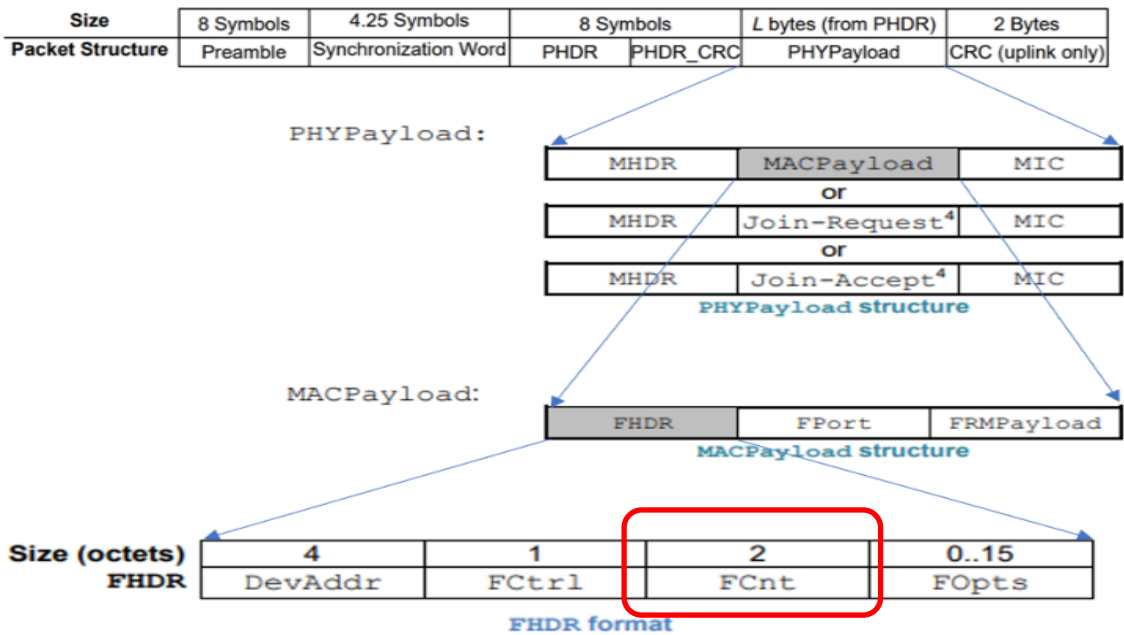


Figura 120. Campo *Frame Counter (FCnt)*, integrante do campo *Frame Header (FHDR)*.

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

O contador *FCntUp* é incrementado com cada mensagem de *Uplink* e o contador *FCntDown*, por sua vez, é incrementado com cada mensagem de *Downlink*.

- Campo *Frame Options (FOpts)*

Conforme já abordado, o campo *FOpts* é opcional e transporta comandos MAC, que são instruções para administração da rede LoRaWAN, e possui um comprimento entre 0 (zero) e o valor máximo de 15 (quinze) *bytes*. Estes comandos pegam carona (*piggyback*) em quadros de dados [29].

O campo *FOptsLen*, em *FCtrl*, armazena o comprimento em *bytes* do campo *FOpts*. Se *FOptsLen* = 0, o campo *FOpts* estará ausente. Entretanto, se *FOptsLen* ≠ 0, isto é, se comandos MAC estiverem presentes no campo *FOpts*, o valor 0 não poderá ser utilizado no campo *FPort* (neste caso, *FPort* não está presente ou, se estiver, não pode assumir o valor 0).

Comandos MAC não podem aparecer, simultaneamente, na carga útil (*FRMPayload*) e no campo *FOpts*. Caso isso venha a ocorrer, o dispositivo final descarta o quadro silenciosamente. A Figura 121 mostra em destaque o campo *FOpts*.

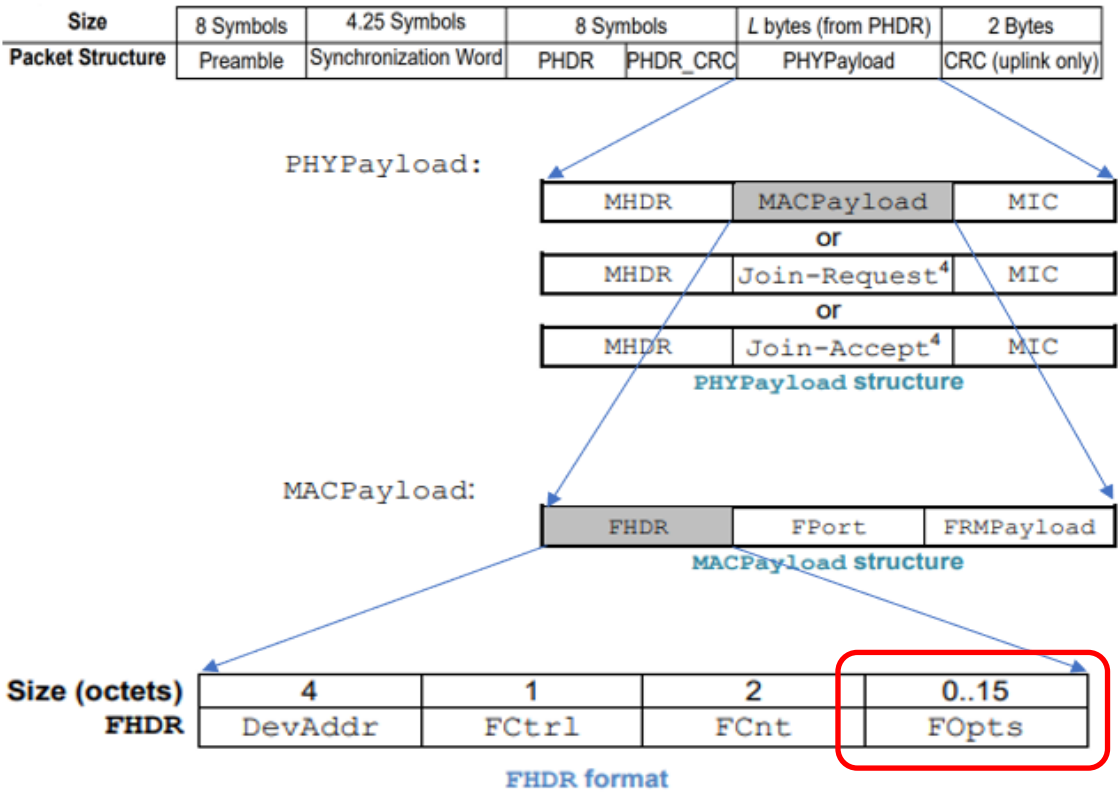


Figura 121. Campo *Frame Options* (*FOpts*), integrante do campo *Frame Header* (*FHDR*).

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

- Campo *Port Field* (*FPort*)

Como já mencionado, o campo *Port Field* (*FPort*), a exemplo do campo *FRMPayload*, é opcional. Caso o campo de carga útil do quadro não seja vazio, o campo *FPort* deve estar presente. Caso esteja presente, *FPort* tem o comprimento de um *byte*, e, se possuir um valor 0 armazenado, isso indica que o campo *FRMPayload* contém somente comandos MAC. Valores de *FPort* na faixa decimal 1..223 são específicas para uso das aplicações. O valor decimal 224

é dedicado a testes de protocolo na camada LoRaWAN MAC e a faixa decimal 225..255 é reservada para uso e alocação pela organização LoRa Alliance. A Figura 122 apresenta em destaque o campo FPort.

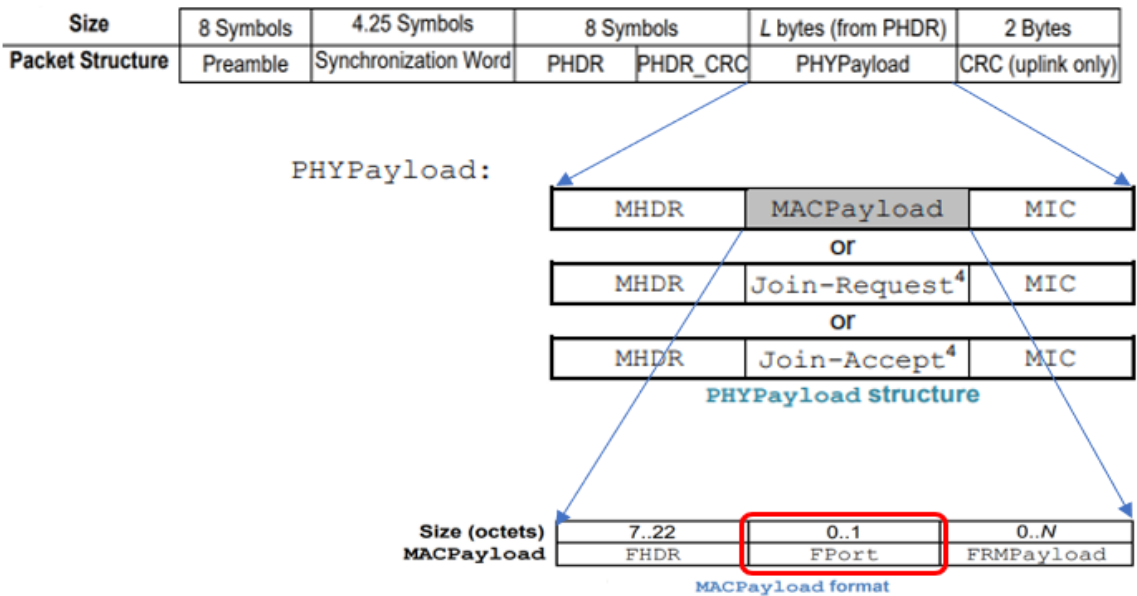


Figura 122. Campo *Port Field (FPort)*, integrante do campo *MACPayload*.

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

- Campo *Frame Payload (FRMPayload)*

O campo *Frame Payload (FRMPayload)* destina-se ao transporte de dados ou de comandos MAC. Se o quadro contém dados na carga útil (*FRMPayload*), ela deve ser criptografada antes de o *Código de Integridade de Mensagem (MIC)*, que será abordado mais adiante, ser calculado.

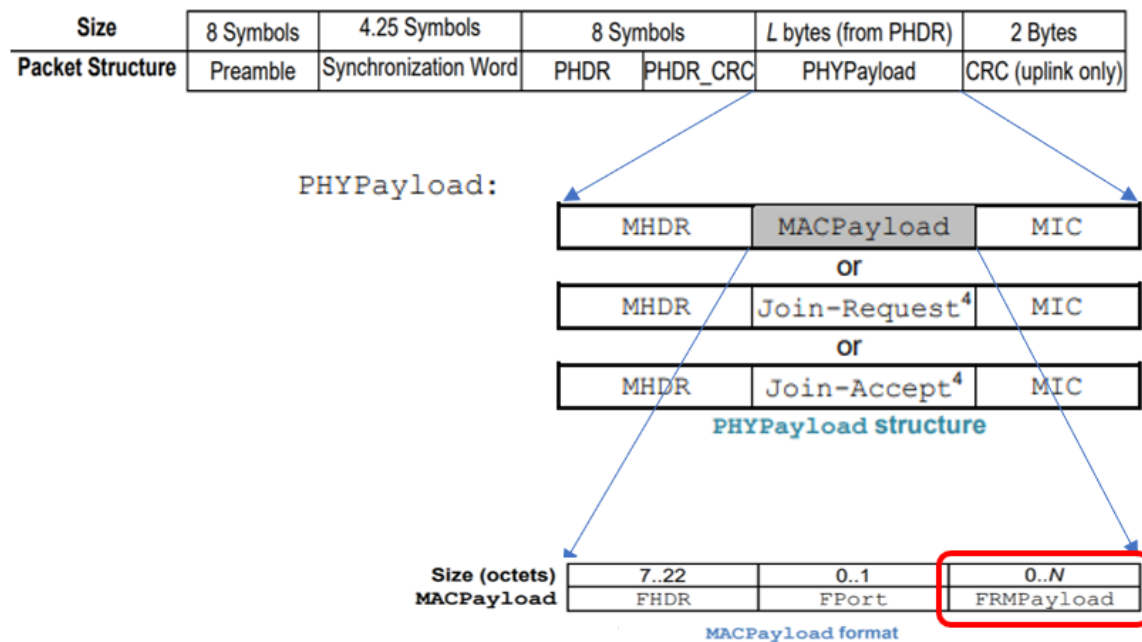
O esquema de criptografia utilizado na especificação LoRaWAN é baseado em um algoritmo que utiliza criptografia *AES (Advanced Encryption Standard)*, com um comprimento de chave *K* de 128 (cento e vinte e oito bits). Esta chave depende do valor do campo *FPort*, como mostrado na Tabela 19. Se *FPort* = 0, a chave *K* será destinada a criptografia de rede (*Network Session Key, NwkSKey*), mas, se *FPort* assumir algum valor na faixa decimal 1..223, a chave *K* será destinada a criptografia de aplicação (*Application Session Key, AppSKey*).

Tabela 19. Valor decimal do campo *Port Field (FPort)* e a chave de criptografia *K* correspondente.

FPort	K
0	Network Session Key (NwkSKey)
1..255	Application Session Key (AppSKey)

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

O campo *FRMPayload* é mostrado em destaque na Figura 123.

**Figura 123.** Campo de carga útil *Frame Payload (FRMPayload)*, integrante do campo *MACPayload*.

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

- Campo *Message Integrity Code (MIC)*

A especificação LoRaWAN 1.0 definiu algumas chaves de segurança, como *Appkey*, *NwkSKey* e *AppSKey*, todas com o tamanho de 128 (cento e vinte e oito) bits. O algoritmo usado para isso é o *Advanced Encryption Standard 128 (AES-128)* [29].

Dispositivos finais ativados através do processo *OTAA (Over The Air Activation)* usam a chave de aplicação *AppKey* para derivação das duas chaves de sessão, *AppSKey* e *NwkSKey*, durante o procedimento de ativação.

Quando um dispositivo final junta-se à rede, processo chamado de união (*join*) ou ativação (*activation*), são geradas uma *Chave de Sessão de Rede (NwkSKey)* e uma *Chave de Sessão de Aplicação (AppSKey)*. A primeira (*NwkSKey*) é compartilhada coma rede, enquanto que a segunda (*AppSKey*) é mantida privada. Estas chaves de sessão, como a expressão indica, são usadas durante a sessão mantida entre o dispositivo final e o outro ente (Servidor de Rede, Servidor de Aplicação etc.).

A *Chave de Sessão de Aplicação (AppSKey)* é usada para a criptografia e descriptografia da carga útil de dados. Esta é totalmente criptografada entre o dispositivo final e o Servidor de Aplicação, impedindo que outros entes exceto estes dois consigam ler o conteúdo das mensagens enviadas e recebidas.

A *Chave de Sessão de Rede (NwkSKey)* é empregada na interação entre o dispositivo final e o Servidor de Rede. Esta chave é usada para a validação da integridade de cada mensagem através do *Código de Integridade de Mensagem (Message Integrity Code, MIC)*, o qual é similar a um algoritmo de checksum, para detecção de dados corrompidos, mas com o objeto de evitar adulteração intencional da mensagem. Este código *MIC* é calculado sobre o conteúdo dos campos *MHDR*, *FHDR*, *FPort* e *FRMPPayload* do quadro analisado [29]. Para isso, a especificação LoRaWAN utiliza o algoritmo *Advanced Encryption Standard – Cipher Message Authentication Code (AES-CMAC)* [50].

Ambas as chaves de sessão *NwkSKey* e *AppSKey* são únicas por dispositivo e por sessão. Se o dispositivo final é ativado por meio do processo *OTAA*, elas são regeneradas a cada ativação, mas, se a ativação se dá através do procedimento *Activation By Personalization (ABP)*, estas chaves permanecem as mesmas, até que o usuário da aplicação decida mudá-las. A Figura 124 mostra o campo *MIC* em destaque.

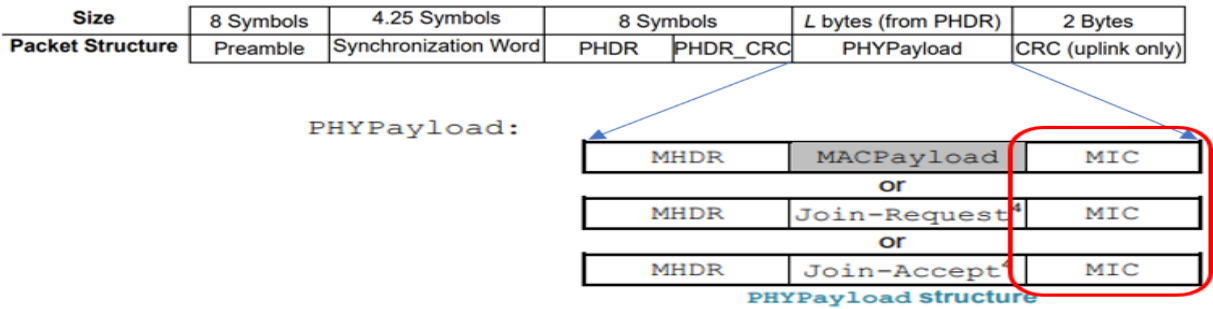


Figura 124. Campo *Message Integrity Code (MIC)*, integrante do campo *PHYPayload*.

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

A.2 Estrutura básica dos quadros *Beacon*

Nas redes LoRaWAN, os *gateways* oferecem, entre outras atividades, um mecanismo de sincronização de tempo para os dispositivos finais através do envio de quadros *beacon* a intervalos regulares de tempo. Estes quadros *beacon* são usados pelos dispositivos finais que operam na Classe B para a sincronização das suas referências internas de tempo com as da rede. Esta sincronização deve ocorrer antes que eles (dispositivos finais) comecem a atuar nesta classe.

Uma vez operando na Classe B, os dispositivos finais devem, periodicamente, procurar e receber quadros *beacon* encaminhados pelos *gateways* da rede, para que possam minimizar qualquer desvio temporal de seus relógios internos em relação aos da rede.

Todos os quadros *beacon* são transmitidos no chamado *modo implícito de pacote de rádio*, ou seja, sem a presença, no quadro, de um cabeçalho físico LoRa, e sem o campo *CRC* normalmente colocado pelo rádio. A Figura 125 ilustra o formato físico de um quadro *beacon* [29].

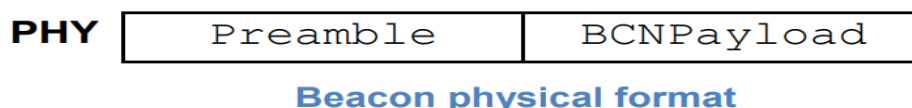


Figura 125. Formato físico de um quadro

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

- Campo *Preamble*

O preâmbulo do quadro *beacon* (*Preamble*) deve conter 10 (dez) símbolos não modulados, de modo a permitir que os dispositivos finais implementem uma procura por quadros *beacon* com baixo consumo de energia.

O comprimento do quadro *beacon* está fortemente atrelado à operação da camada física do rádio. Assim, o comprimento real do quadro e o seu conteúdo variam de acordo com a implementação utilizada na região geográfica considerada. Deste modo, o conteúdo do quadro *beacon*, os parâmetros de modulação e as frequências utilizadas são especificados, para cada

região, por ocasião da realização deste trabalho, no documento *RP002 LoRaWAN Regional Parameters*, divulgado pela organização LoRa Alliance.

- Campo *Carga Útil do quadro Beacon (BNC Payload)*

O campo *Carga Útil do quadro Beacon (BNC Payload)* é constituído por uma parte comum de rede e uma parte específica de *gateway*, que é opcional. Conforme mostrado na Figura 126, nota-se que o campo *BNC Payload* apresenta variações em seu formato, de acordo com o valor do *Fator de Espalhamento (Spread Spectrum, SF)*.

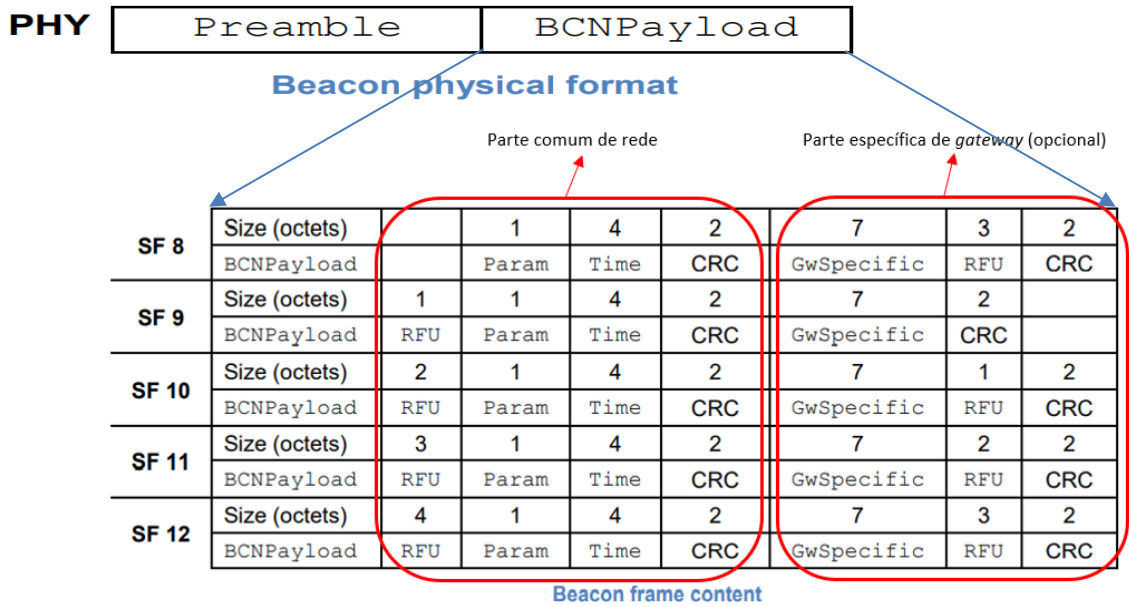


Figura 126. Campo *Carga Útil do quadro Beacon (BNC Payload)*.

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

➤ Parte comum de rede de um quadro *beacon*

- Campo *RFU* da parte comum de rede

A parte comum de rede de um quadro *beacon* pode conter um campo *RFU (Reserved for Future Use)*, que deve receber o valor zero. A Figura 127 apresenta este campo em destaque.

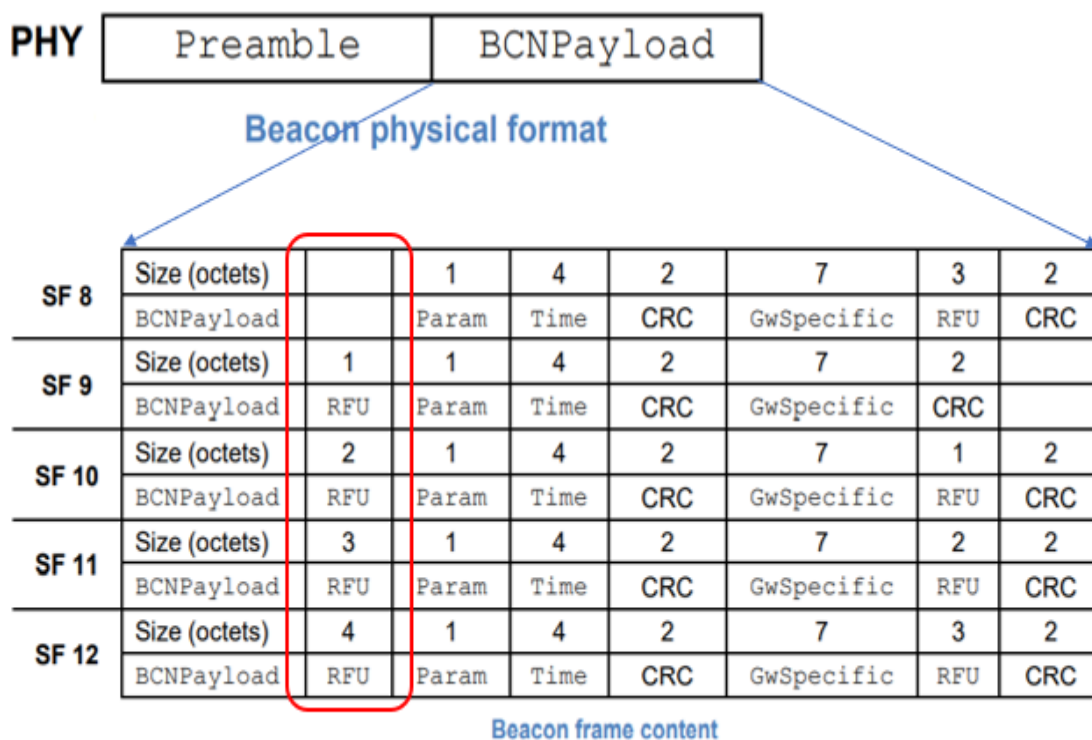


Figura 127. Campo *RFU*, integrante da parte comum de rede do campo *Beacon* (*BNC Payload*).

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

- Campo *Param*

O campo *Param* tem o comprimento de um *byte* e é constituído por dois campos, o primeiro contendo seis bits e sem uso (*RFU*) e o segundo, *Prec*, com tamanho de dois bits. O campo *Prec* codifica a precisão de tempo do quadro *beacon*. Assim, o valor decimal do campo *Prec* deve ser interpretado como parte de um expoente de base 10 que representa a precisão do tempo de transmissão do quadro *beacon*, cuja potência é $10^{(-6+Prec)}$. O valor *default* do campo *Prec* é zero e ele pode assumir qualquer valor dentro do intervalo de números na base dez [0 : 3]. Se o campo *RFU* (*Reserved for Future Use*) do campo *Param* receber o valor 0, o dispositivo final irá ignorá-lo. A Figura 128 apresenta um detalhamento deste campo.

- Campo *Time*

O campo *Time*, integrante da parte comum de rede dos quadros *beacon*, contém um valor que representa o número de segundos decorridos desde o instante 00:00:00 *UTC* (*Universal Time Coordinated*) do dia 6 de Janeiro de 1980, começo da contagem da época GPS, módulo 2^{32} . A Figura 129 mostra este campo.

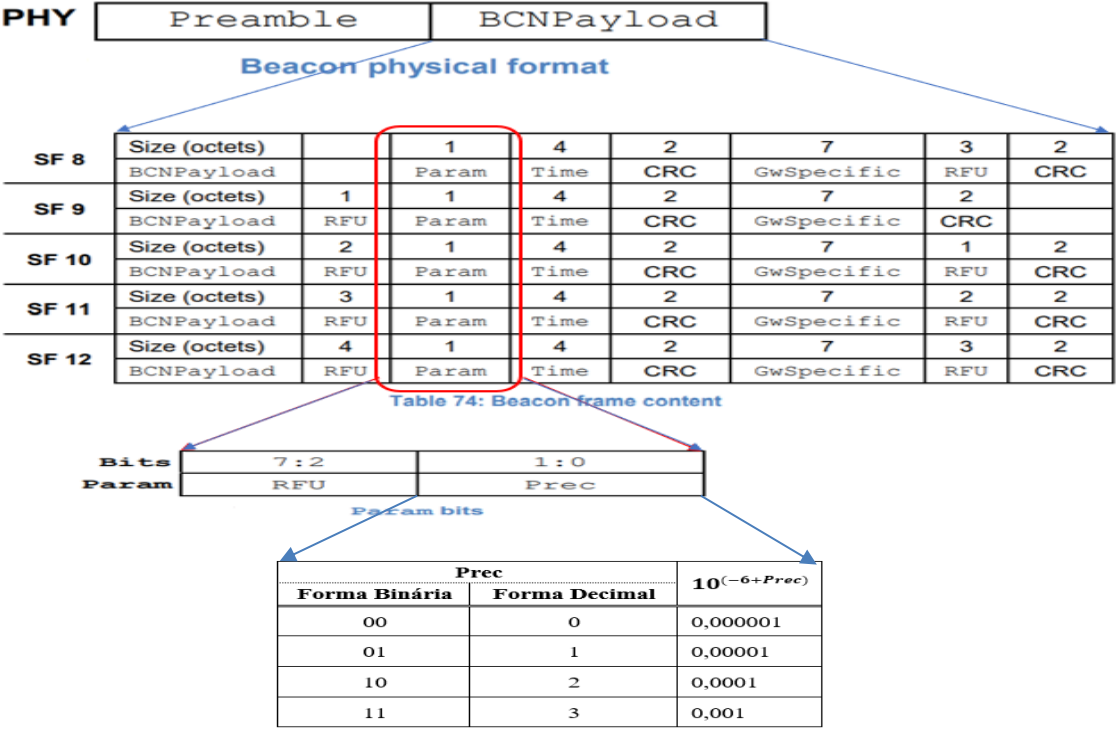


Figura 128. Campo *Param*, integrante da parte comum de rede do campo *Beacon* (*BNC Payload*).
Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

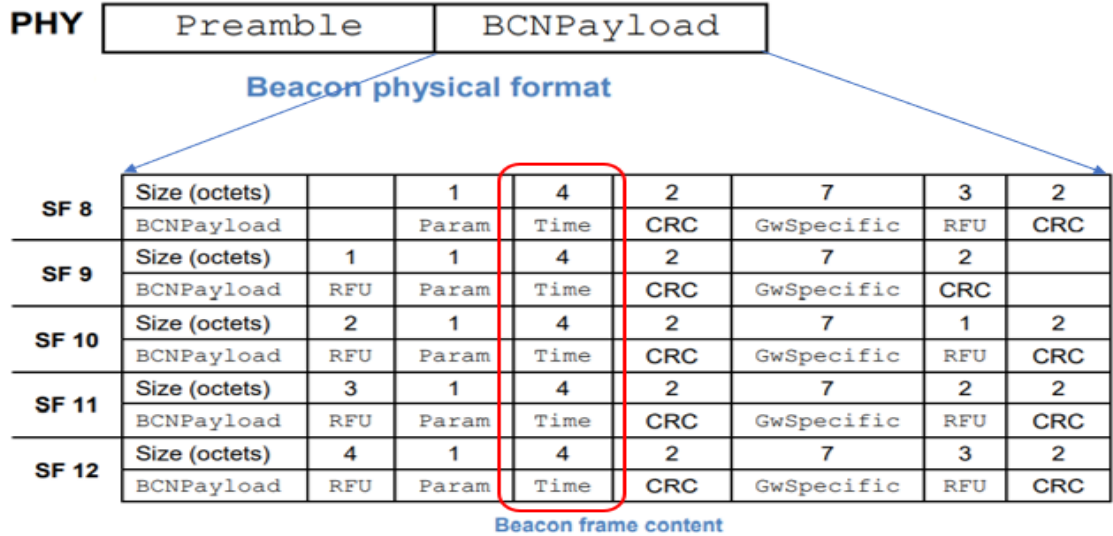


Figura 129. Campo *Time*, integrante da parte comum de rede do campo *Beacon* (*BNC Payload*).
Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

• Campo *CRC*

O campo *CRC*, da parte comum de rede do campo *BCNPayload*, tem a função de protegê-la contra erros, através de uma verificação *CRC* de 16 bits. O valor deste campo deve

ser computado sobre os campos *RFU*, *Param* e *Time*, todos eles integrantes da parte comum de rede do campo *BCNPayload*. A Figura 130 mostra em destaque este campo *CRC*.

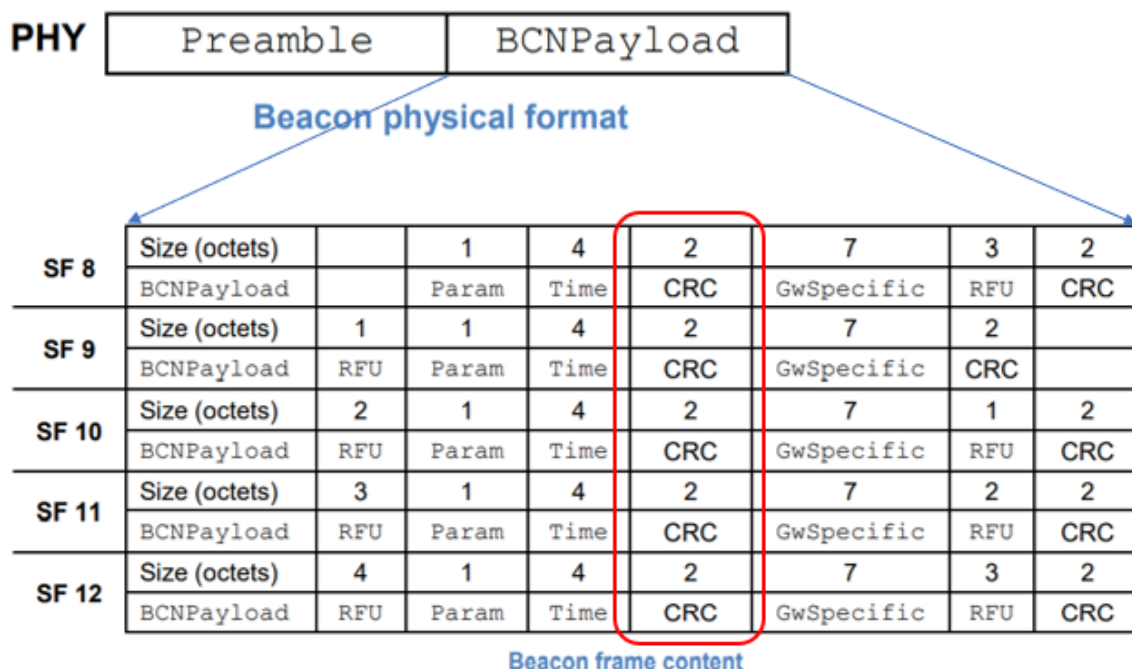


Figura 130. Campo *CRC*, integrante da parte comum de rede do campo *Beacon* (*BNC*)
Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

➤ Parte específica de *gateway* (opcional) de um quadro *beacon*

Nesta parte do quadro *beacon*, em geral aparecem os campos *GwSpecific*, *RFU* e *CRC*, mas, se o *Fator de Espalhamento* for *SF* = 9, o campo *RFU* não está presente.

- Campo *GwSpecific*

O campo *GwSpecific* possui um tamanho de sete *bytes* e é formado pels campo *InfoDesc*, com um *byte* de comprimento, e pelo campo *Info*, com seis *bytes*.

- Campo *InfoDesc*

O campo *descriptor de informação*, *InfoDesc* descreve como o campo de informação *Info* deve ser interpretado, como mostrado na Figura 131. Se *InfoDesc* possuir o valor decimal 0, o

campo *Info* conterá as coordenadas GPS da primeira antena do *gateway*. Se *InfoDesc* assumir os valores 2 ou 3, o campo *Info* guardará as coordenadas GPS da segunda ou terceira antena, respectivamente, do *gateway*. Caso *InfoDesc* seja igual a 3, o campo *Info* armazenará os endereços de rede e do *gateway* (*NetID* + *GatewayID*). Valores decimais de *InfoDesc* pertencentes ao intervalo [4 : 127] são reservados para uso futuro (RFU). Finalmente, se o campo *InfoDesc* apresentar um valor decimal dentro do intervalo [128 : 255], o campo *Info* conterá dados de transmissões específicas de rede personalizadas.

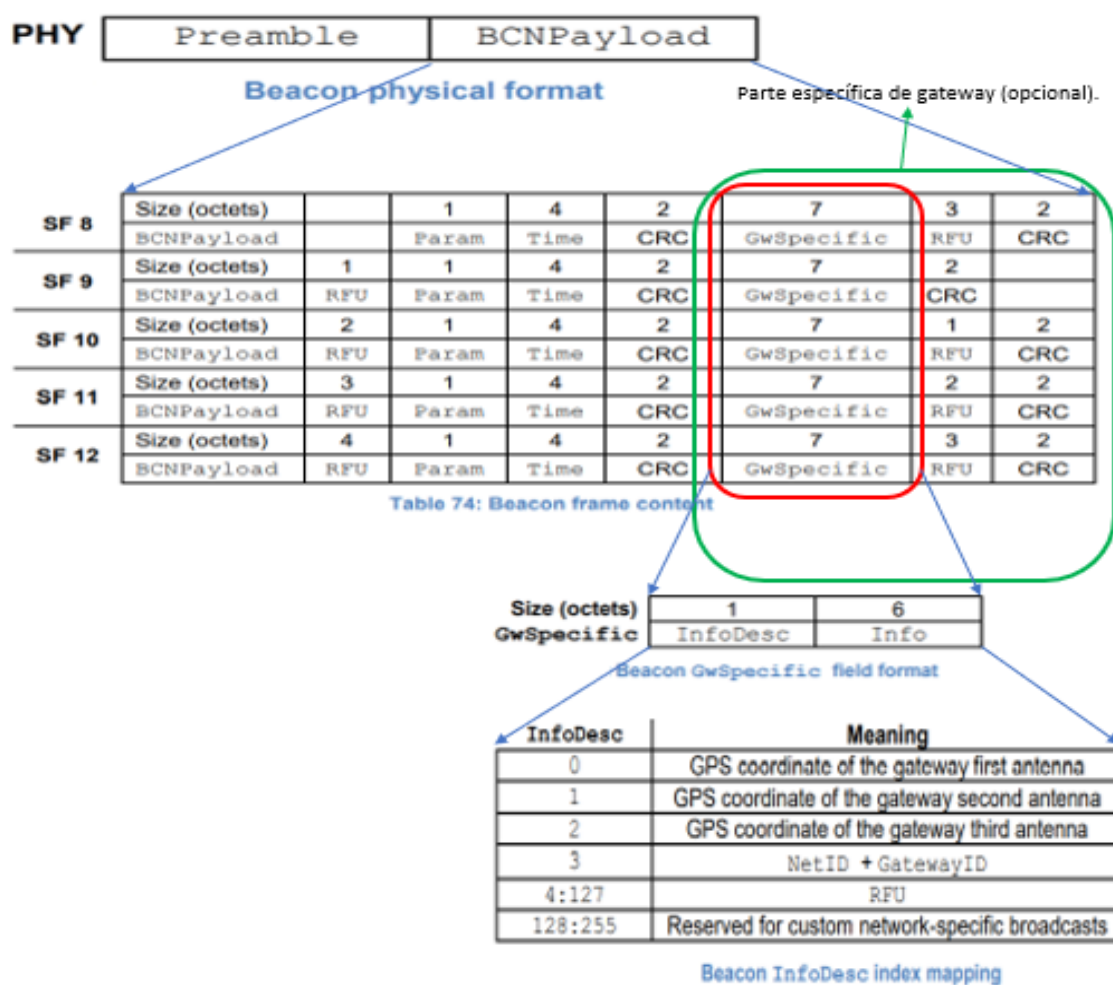


Figura 131. Campos *InfoDesc* e *Info*, integrantes do campo *GwSpecific*.

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

Para um *gateway* que possua uma única antena omnidirecional, o valor do campo *Infodesc* é zero (*InfoDesc* = 0) na transmissão de coordenadas GPS. Já em um local no qual haja antenas setorizadas, por exemplo, a primeira antena transmite o quadro *beacon* com *InfoDesc* = 0, a segunda antena o faz com *InfoDesc* = 1 e assim sucessivamente [29].

- Campo *InfoDesc* contendo os valores 0, 1 ou 2

Conforme mencionado acima, para *InfoDesc* = 0, 1 ou 2, o campo *Info* contém as coordenadas GPS da antena que transmite o quadro *beacon*, sendo três *bytes* para a codificação da *Latitude* e três *bytes* para a *Longitude*, como mostrado na Tabela 20.

Tabela 20. Campo *Info*, quando *InfoDesc* = 0, 1 ou 2.

Size (octets)	3	3
Info	Lat	Lng

Beacon Info field format, InfoDesc=0, 1, 2

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

- Campo *InfoDesc* assumindo o valor 3

Caso o campo *InfoDesc* tenha o valor três, o conteúdo do campo *Info* codifica o identificador da rede, *NetID*, e um identificador de *gateway* ou célula, *GatewayID*, conforme ilustrado na Tabela 21.

Tabela 21. Campo *Info*, quando *InfoDesc* = 3.

Size (octets)	3	3
Info	NetID	GatewayID

Beacon Info field format, InfoDesc=3

Fonte: LoRa Alliance LoRaWAN L2 1.0.4 Specification [29].

- Campo *InfoDesc* assumindo os valores 4 a 127: reservados para uso futuro (RFU).
- Campo *InfoDesc* assumindo os valores 128 a 255: reservados para transmissões específicas de rede personalizadas.

A seguir, em cada um dos pontos da praia escolhidos para se fazer medições do sinal de rádio, estão detalhadas as tentativas de comunicação feitas entre o nó ID0, fixado no começo da Praia de Boa Viagem, e o nó ID3, deslocado ao longo da orla desta região, na área destinada ao estacionamento de carros, escolhida por haver menor trânsito de pessoas, para se verificar se ambos os rádios conseguiam manter contato entre si com confiabilidade. Em cada posição do nó móvel ID3 foram encaminhados 10 (dez) comandos *Ping* do módulo ID0 para ele (ID3). Em seguida, ID3 era deslocado para um ponto mais adiante no sentido da Ilha da Boa Viagem.

- **Nó ID3 localizado na área do estacionamento *em frente* ao nó fixo ID2 (P₂)**

Inicialmente, após o nó ID3 ser ligado à bateria, comandos *Ping* começaram a ser encaminhados do nó ID0 para ele enquanto era deslocado, desde o local onde se encontrava ID0 (início da Praia da Boa Viagem), na direção e sentido da posição onde estava fixado o nó ID2 (ponto P₂, na Figura 107), ao longo da área de estacionamento, situada ao lado do calçadão da Praia da Boa Viagem e escolhida por haver baixo fluxo de pessoas. Os resultados mostraram que a comunicação estava em perfeitas condições, como ilustrado na Figura 132, que apresenta um registro da tela do aplicativo de comunicação, no qual, dos comandos *Ping* enviados do nó ID0 para ID3, 90% foram recebidos com sucesso e 10% perdidos, quando este último nó estava posicionado na área do estacionamento em frente ao nó ID2 fixo (ponto P₂). Possivelmente, os quadros perdidos tenham sofrido fortes interferências dos veículos e pessoas que transitavam no local.



Figura 132. Tela do aplicativo de comunicação mostrando o envio e recebimento, com sucesso, de comandos *Ping*, de ID0 para ID3.

Fontes: aplicativo de comunicação e o autor.

A Figura 133 apresenta a vista aérea da região onde figuram o nó fixo ID2 e o nó móvel ID3, posicionado num ponto da área de estacionamento em frente a ID2 (ponto P₂, na Figura 107).

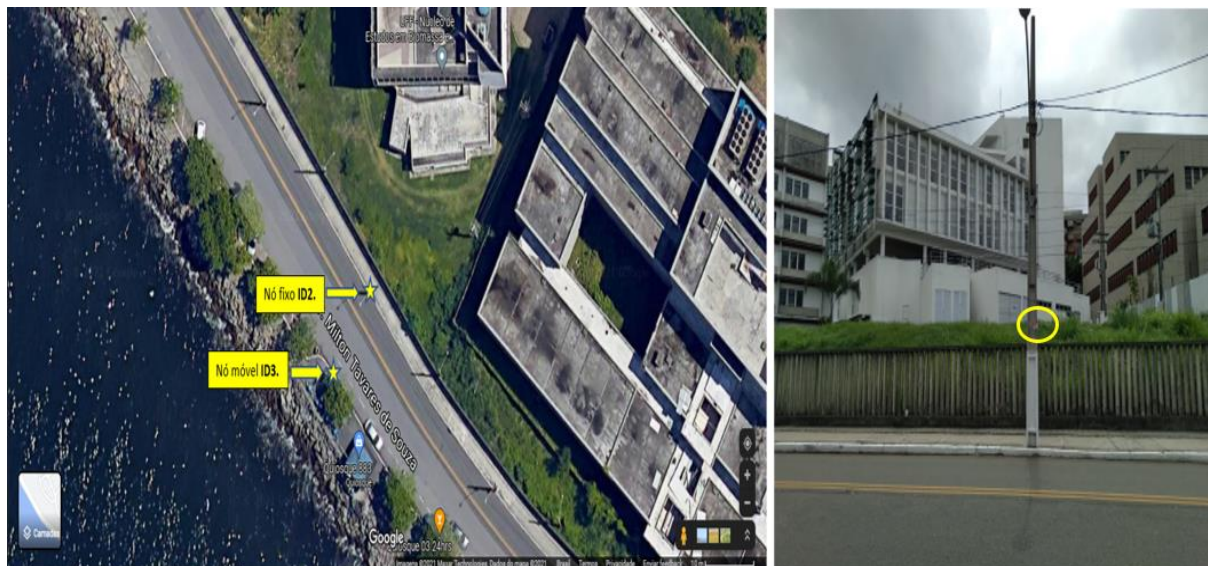


Figura 133. Vista aérea da região onde aparecem o nó fixo ID2 e o nó móvel ID3, posicionado num ponto da área de estacionamento em frente a ID2.

Fontes: Google Maps, Joacir de Oliveira Silva e o autor.

A Figura 134 mostra o nó móvel ID3 posicionado diante do nó fixo ID2 e distando 472,63 m, aproximadamente, do nó fixo ID0, sem estabelecer uma linha de visada direta. Apesar disto, os comandos encaminhados do nó ID0 diretamente para o nó ID2 chegavam normalmente, sem perdas, exceto nos momentos em que passavam carros, vans, caminhões ou ônibus pela Avenida Milton Tavares de Souza, na orla, o que, em geral, provocava perdas ou interferências nos quadros de dados.

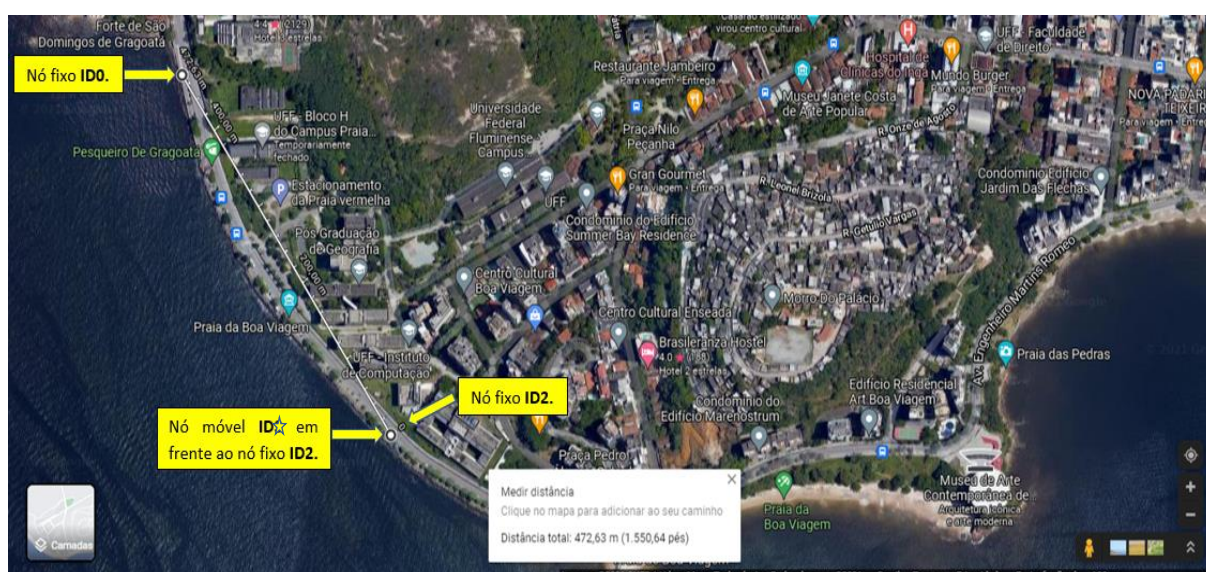


Figura 134. Distância em linha reta entre o nó fixo ID0 e o nó móvel ID3, posicionado em um ponto da área de estacionamento em frente ao nó fixo ID2.

Fontes: Google Maps e o autor.

- **Nó móvel ID3 posicionado num local da área de estacionamento em frente ao primeiro poste depois daquele onde estava fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem (ponto P₃, na Figura 108)**

Prosseguindo com o deslocamento do nó móvel ID3 na Avenida Milton Tavares de Souza, ao longo da área de estacionamento de carros, no sentido da Ilha da Boa Viagem, o próximo ponto de medição dos sinais enviados do nó ID0 para o nó ID3 foi em um local do estacionamento em frente ao primeiro poste depois daquele em que estava posicionado o nó fixo ID2 (ponto P₄), como ilustrado na Figura 135. Nota-se que a distância entre os nós ID2 e ID3 era algo em torno de 38,68 m.

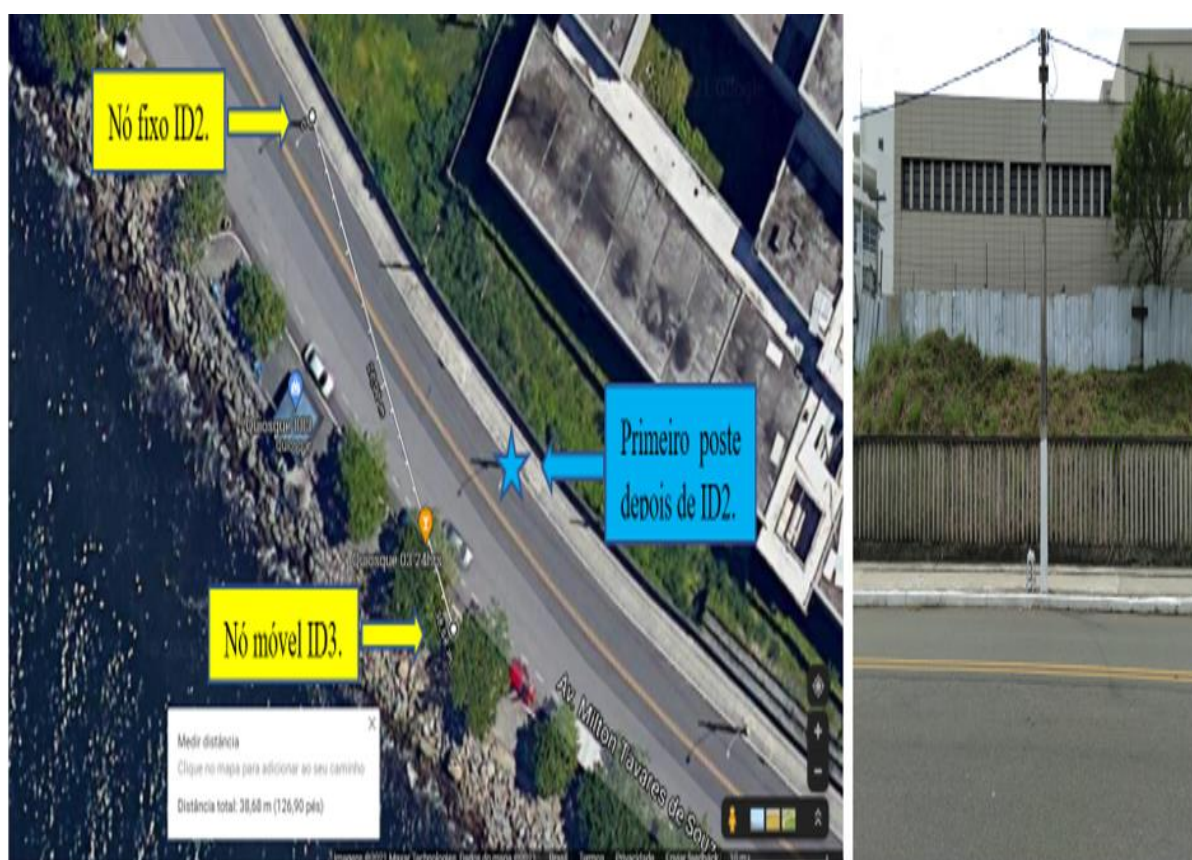


Figura 135. Vista aérea mostrando as posições dos nós ID2 e ID3, em frente ao primeiro poste depois daquele onde foi fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem.

Fontes: Google Maps, Joacir de Oliveira Silva e o autor.

Conforme mencionado anteriormente, o nó ID2 foi fixado em um ponto da orla o mais afastado do nó ID0 (fixado no começo da Praia da Boa Viagem) que ainda possibilitava a comunicação entre ID0 e ID2 sem perdas. Além desta posição de ID2, já começavam a ocorrer perdas significativas na comunicação direta entre estes nós.

Assim, quando o nó móvel ID3 foi posicionado num local da área de estacionamento em frente ao *primeiro* poste depois daquele onde estava fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem, verificou-se que os comandos encaminhados do nó fixo ID0 para o nó móvel ID3 já não mais chegavam diretamente a este (ocorrendo um salto através de ID2), como pode ser observado na Figura 136, que mostra a tela do aplicativo de comunicação depois da execução de um comando *Traceroute*. Nota-se, nesta figura, que todos os quadros enviados do nó ID0 para o nó ID2 foram recebidos com sucesso, embora 10% tenha sofrido interferências.

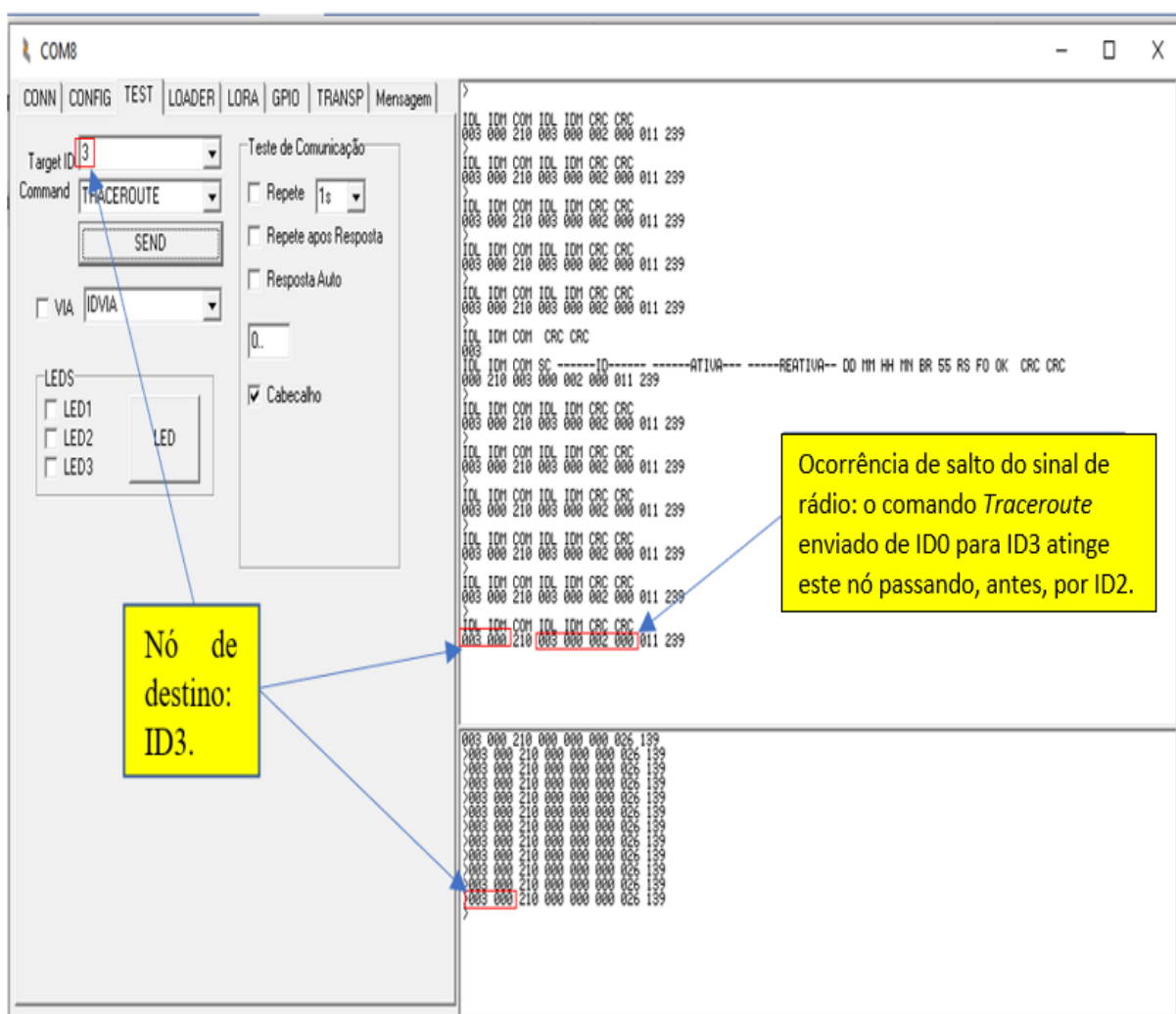


Figura 136. Tela mostrando o envio e recebimento, com sucesso, de comandos Traceroute de ID0 para ID3, através de ID2.

Fontes: aplicativo de comunicação e o autor.

A Figura 137 apresenta uma vista aérea das localizações dos nós ID0 (fixo), ID2 (também fixo) e ID3 (móvel). A distância em linha reta entre os nós fixos ID0 e ID2 (472,63 m) somada à existente entre ID2 e ID3 totalizou 511,24 m, aproximadamente.



Figura 137. Vista aérea mostrando as posições dos nós ID0, ID2 e ID3 quando ID3 encontrava-se em frente ao *primeiro* poste depois daquele onde foi fixado ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem.

Fontes: Google Maps e o autor.

- **Nó móvel ID3 posicionado num local da área de estacionamento em frente ao *segundo* poste depois daquele onde estava fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem (ponto P₄, na Figura 108)**

Continuando com o deslocamento do nó móvel ID3 ao longo da área de estacionamento de carros, no sentido da Ilha da Boa Viagem, o próximo ponto de medição dos sinais enviados do nó ID0 para o nó ID3 foi em um local do estacionamento em frente ao *segundo* poste depois daquele em que estava posicionado o nó fixo ID2, como ilustrado na Figura 138, na qual nota-se que a distância entre os nós ID2 e ID3 ficou em 71,08 m.

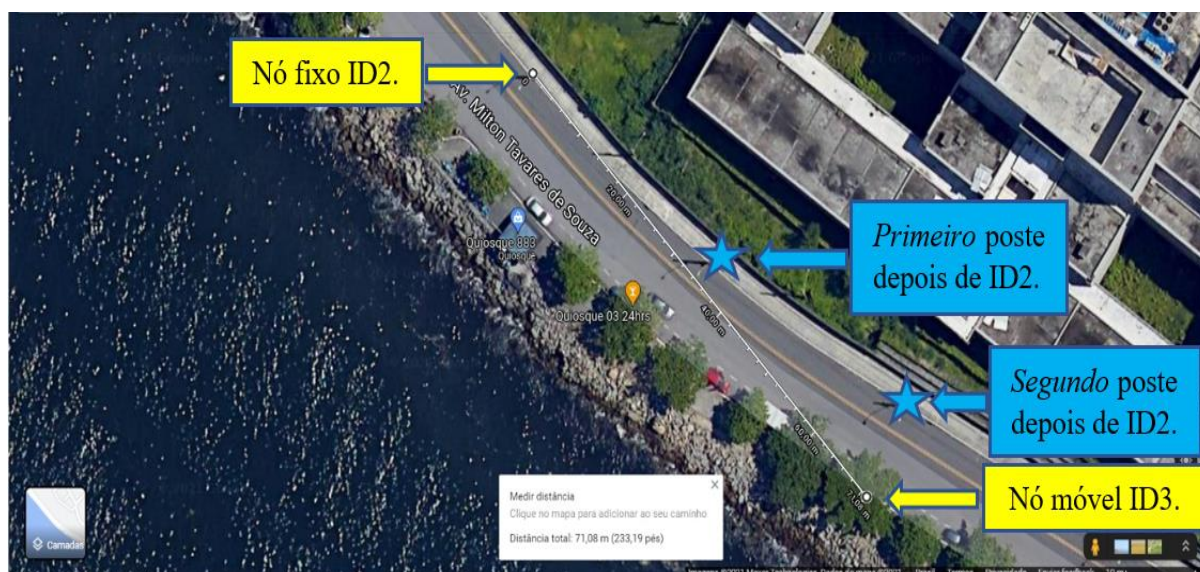


Figura 138. Nó móvel ID3 na área de estacionamento em frente ao *segundo* poste depois daquele onde estava fixado o nó fixo ID2.

Fontes: Google Maps e o autor.

Quando o nó móvel ID3 foi posicionado em um ponto dentro da área de estacionamento em frente ao *segundo* poste depois daquele onde estava fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem, notou-se que os quadros de sinal encaminhados do nó fixo ID0 para o nó móvel ID3 continuaram passando, antes, pelo nó fixo ID2, havendo, então, a ocorrência de um salto de ID0 para ID2, seguido de outro, de ID2 para ID3, como pode ser observado na Figura 139, que mostra a tela do aplicativo de comunicação, depois da execução de comandos *Traceroute*. Nela pode ser notado que todos os quadros encaminhados do nó fixo ID0, localizado no começo da Praia da Boa Viagem, para o nó móvel ID3 chegaram com sucesso, através do nó fixo ID2, embora 8,33% deles tenha sofrido interferências.

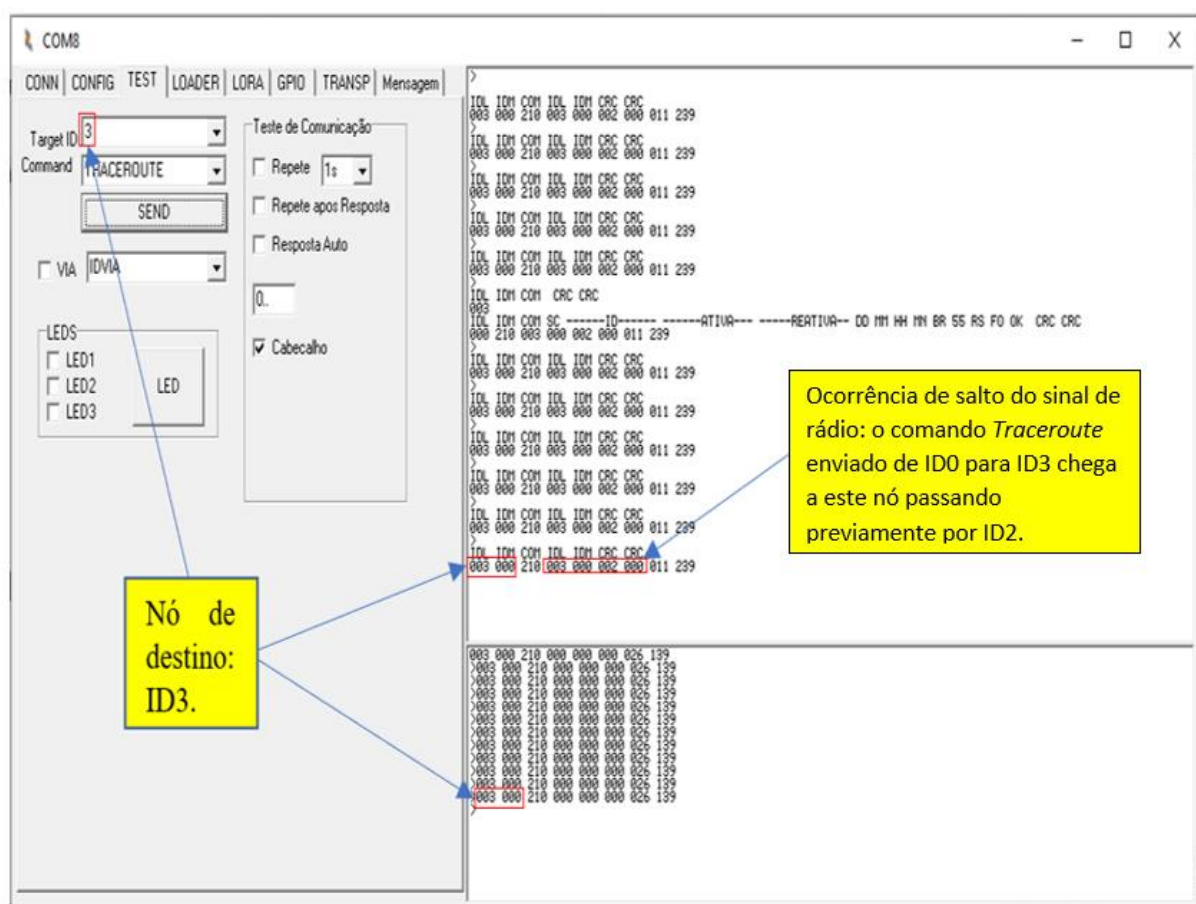


Figura 139. Tela do aplicativo de comunicação mostrando o envio e recebimento, com sucesso, de comandos *Traceroute* de ID0 para ID3, através de ID2.

Fontes: aplicativo de comunicação e o autor.

A Figura 140 apresenta uma vista aérea das localizações dos nós ID0 (fixo), ID2 (também fixo) e ID3 (móvel). Ela mostra que a distância em linha reta entre os nós ID0 e ID2, somada àquela entre ID2 e ID3 ficou em torno de 546,28 m, aproximadamente.

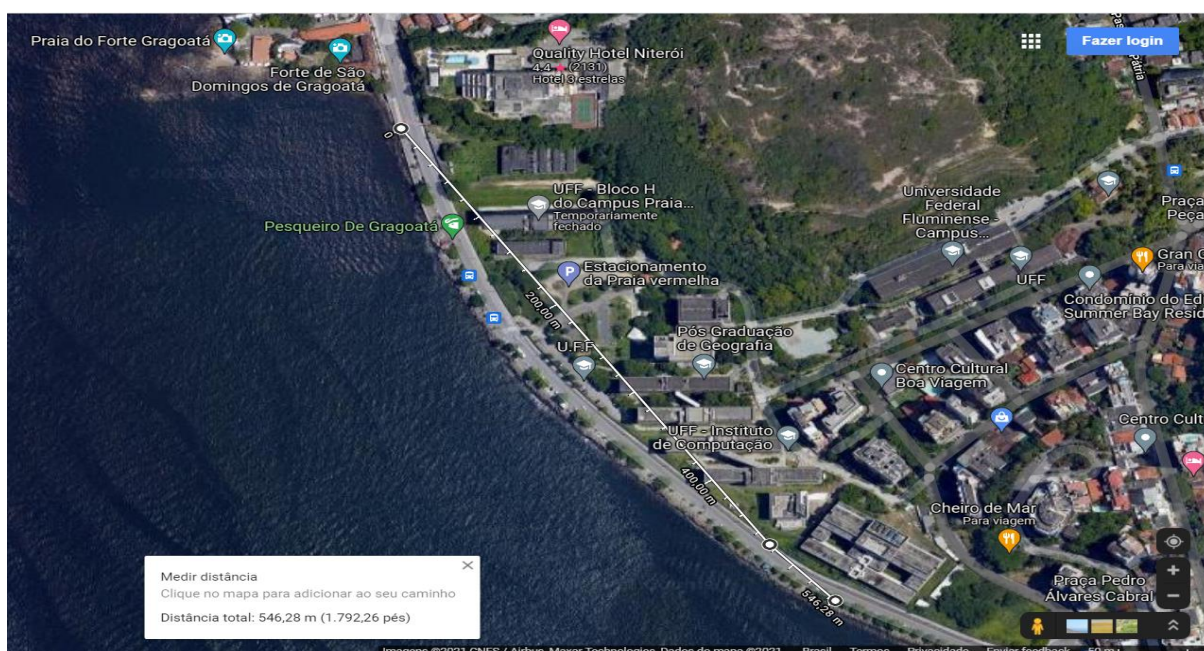


Figura 140. Vista aérea mostrando as posições dos nós ID0, ID2 e o móvel ID3, que estava na área de estacionamento em frente ao *segundo* poste depois daquele onde foi fixado o nó ID2.

Fontes: Google Maps e o autor.

- **Nó móvel ID3 posicionado num local da área de estacionamento em frente ao *terceiro* poste depois daquele onde estava fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem (ponto P₅, na Figura 108)**

Seguindo com o deslocamento do nó móvel ID3 ao longo da área de estacionamento de carros, no sentido da Ilha da Boa Viagem, o próximo ponto de medição dos sinais enviados do nó ID0 para o nó ID3 foi em um local do estacionamento em frente ao *terceiro* poste depois daquele em que estava posicionado o nó fixo ID2, como ilustrado na Figura 141, na qual nota-se que a distância entre os nós ID0, ID2 e ID3 ficou em torno de 573,08 m, aproximadamente.

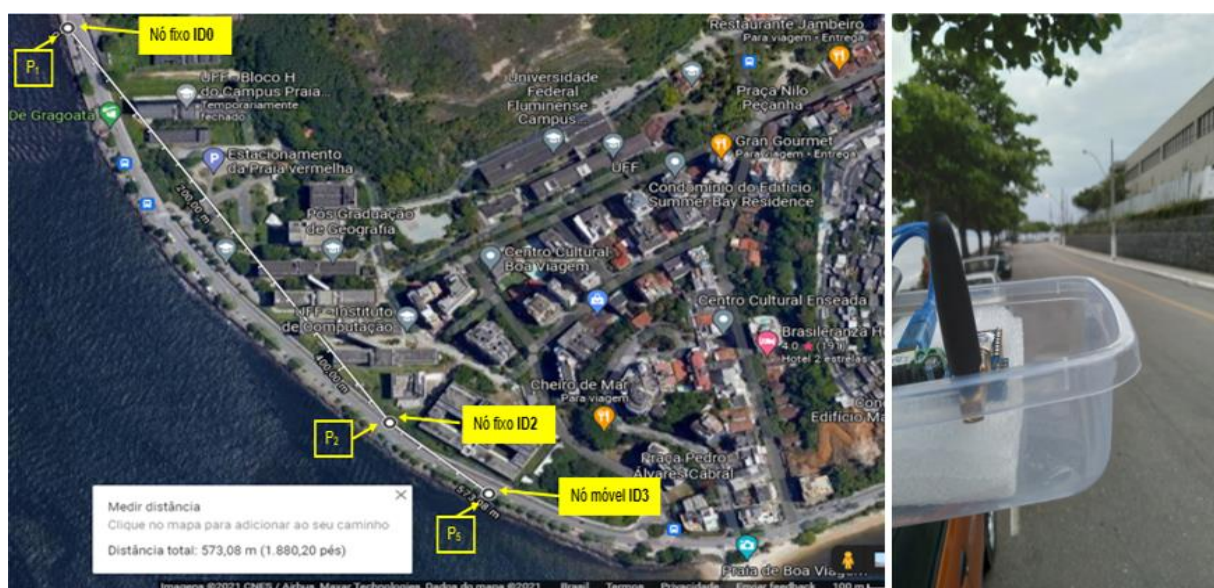


Figura 141. Nó móvel ID3 na área de estacionamento em frente ao *terceiro* poste depois daquele onde estava o nó fixo ID2.

Fontes: Google Maps, Joacir de Oliveira Silva e o autor.

Foram enviados comandos *Traceroute* do nó fixo ID0 para o nó móvel ID3 e verificou-se que o sinal realizou um salto através do nó fixo ID2 antes de chegar a ID3, conforme mostrado na tela de comunicação do aplicativo apresentada na Figura 142. Os quadros de sinal enviados por ID0 foram todos recebidos pelo nó ID3 com sucesso.



Figura 142. Tela do aplicativo de comunicação mostrando o envio pelo nó fixo ID0 de comandos *Traceroute*, os quais foram todos recebidos pelo nó ID3 com sucesso.

Fontes: aplicativo de comunicação e o autor.

- **Nó móvel ID3 posicionado num local da área de estacionamento em frente ao quarto poste depois daquele onde estava fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem (ponto P₆, na Figura 108)**

Prosseguindo com o deslocamento do nó móvel ID3 ao longo da área de estacionamento de carros, no sentido da Ilha da Boa Viagem, o próximo ponto de medição dos sinais enviados do nó ID0 para o nó ID3 foi em um local do estacionamento em frente ao *quarto* poste depois daquele em que estava posicionado o nó fixo ID2, como ilustrado na Figura 143, na qual nota-se que a distância entre os nós ID0, ID2 e ID3 ficou em torno de 608,02 m, aproximadamente.

Foram enviados comandos *Traceroute* do nó fixo ID0 para o nó móvel ID3 e verificou-se que o sinal passou, antes, pelo nó fixo ID2, para, então, chegar a ID3, conforme mostrado na

tela do aplicativo de comunicação apresentada na Figura 144. Como pode ser observado, os quadros de sinal encaminhados por ID0 foram todos recebidos pelo nó ID3 com sucesso, mas 15,38% deles sofreram interferências, possivelmente devido a veículos que trafegavam na Avenida Milton Tavares de Souza, e dois quadros foram perdidos.



Figura 143. Nó móvel ID3 na área de estacionamento em frente ao quarto poste depois daquele onde estava o nó fixo ID2.

Fontes: Google Maps, Joacir de Oliveira Silva e o autor.

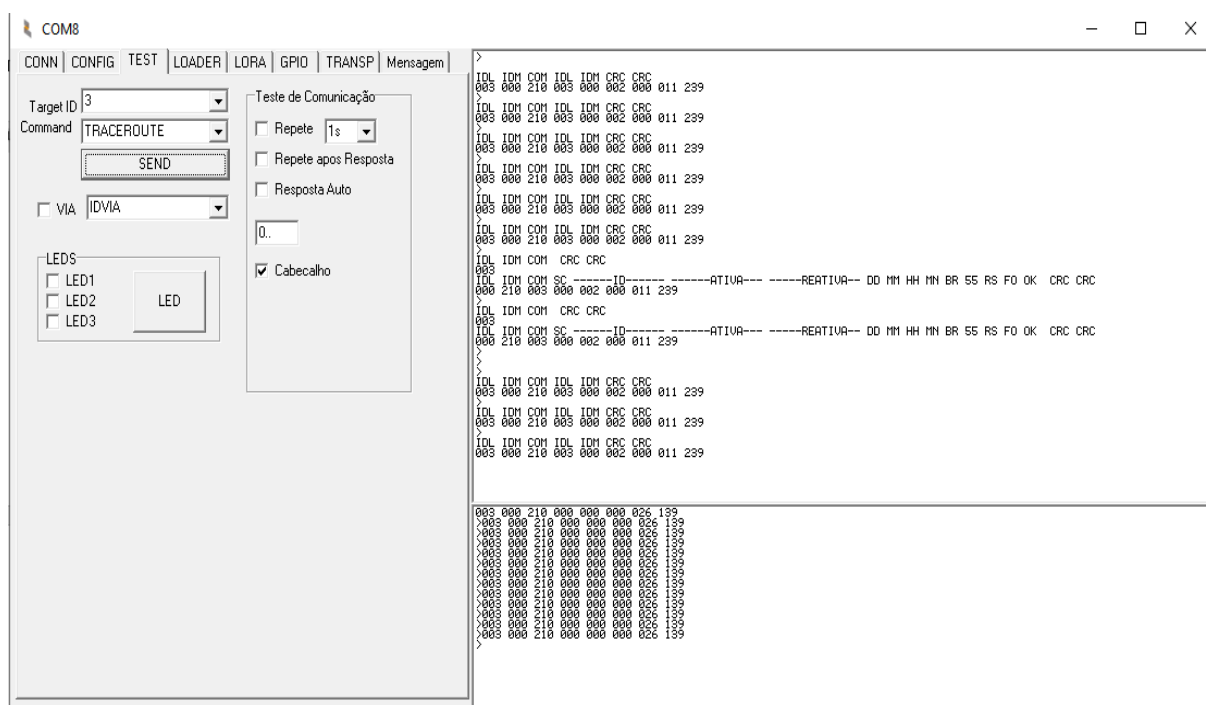


Figura 144. Tela do aplicativo de comunicação mostrando o envio pelo nó fixo ID0 de comandos *Traceroute*, dos quais a maioria foi recebida, pelo nó ID3, com sucesso.

Fonte: aplicativo de comunicação e o autor.

- **Nó móvel ID3 posicionado num local da área de estacionamento em frente ao quinto poste depois daquele onde estava fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem (ponto P₇, na Figura 108)**

Continuando com o deslocamento do nó móvel ID3 ao longo da área de estacionamento de carros, no sentido da Ilha da Boa Viagem, o próximo ponto de medição dos sinais enviados do nó ID0 para o nó ID3 foi em um local do estacionamento em frente ao *quinto* poste depois daquele em que estava posicionado o nó fixo ID2, como ilustrado na Figura 145, na qual nota-se que a distância entre os nós ID0, ID2 e ID3 ficou em torno de 645,59 m, aproximadamente.

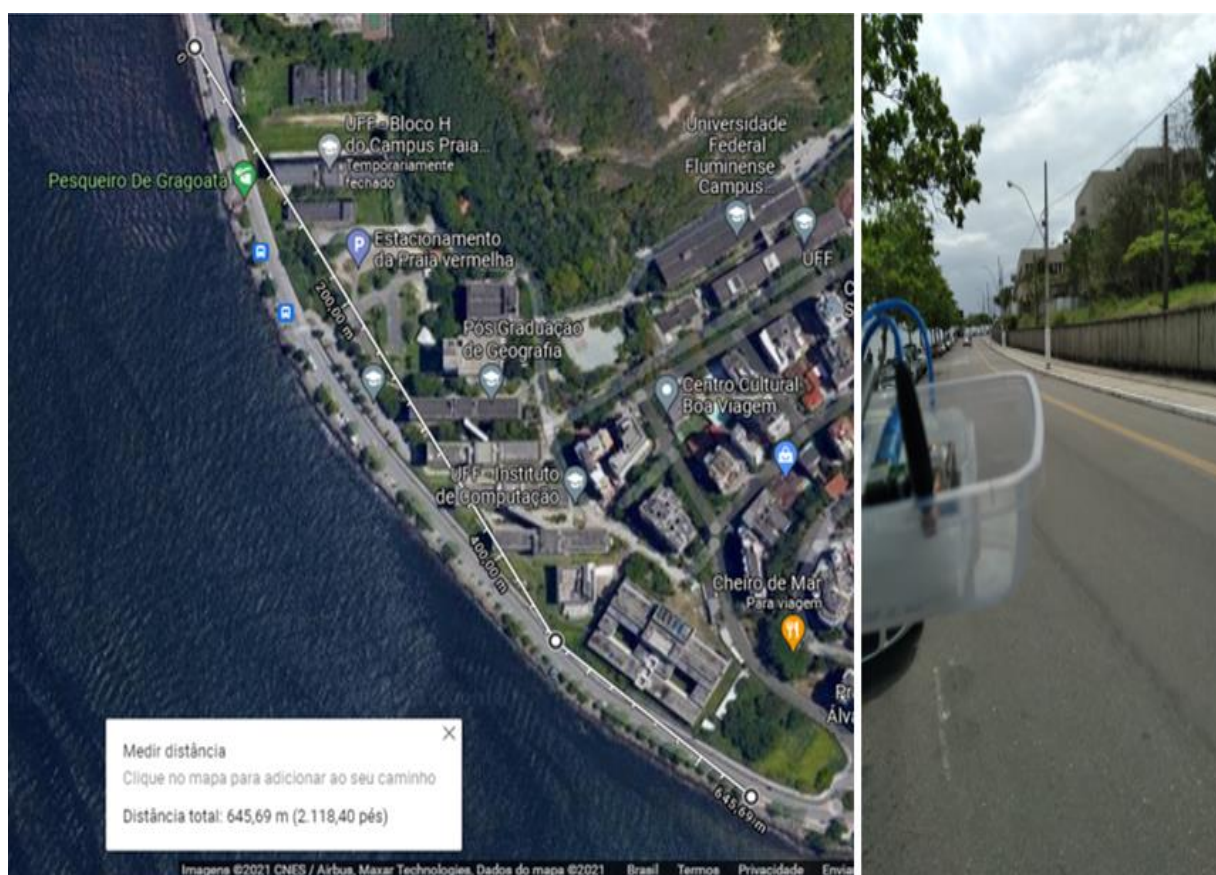


Figura 145. Nó móvel ID3 na área de estacionamento em frente ao *quinto* poste depois daquele onde estava o nó fixo ID2.

Fontes: Google Maps, Joacir de Oliveira Silva e o autor.

Foram enviados comandos *Traceroute* do nó fixo ID0 para o nó móvel ID3 e verificou-se que os quadros passaram pelo nó fixo ID2 antes de chegarem a ID3, conforme mostrado na tela de comunicação do aplicativo apresentada na Figura 146. Como pode ser observado, todos os quadros de sinal foram recebidos pelo nó ID3 com sucesso, sendo que 7,69% deles sofreram interferências, possivelmente devido a veículos que trafegavam na Avenida Milton Tavares de Souza.

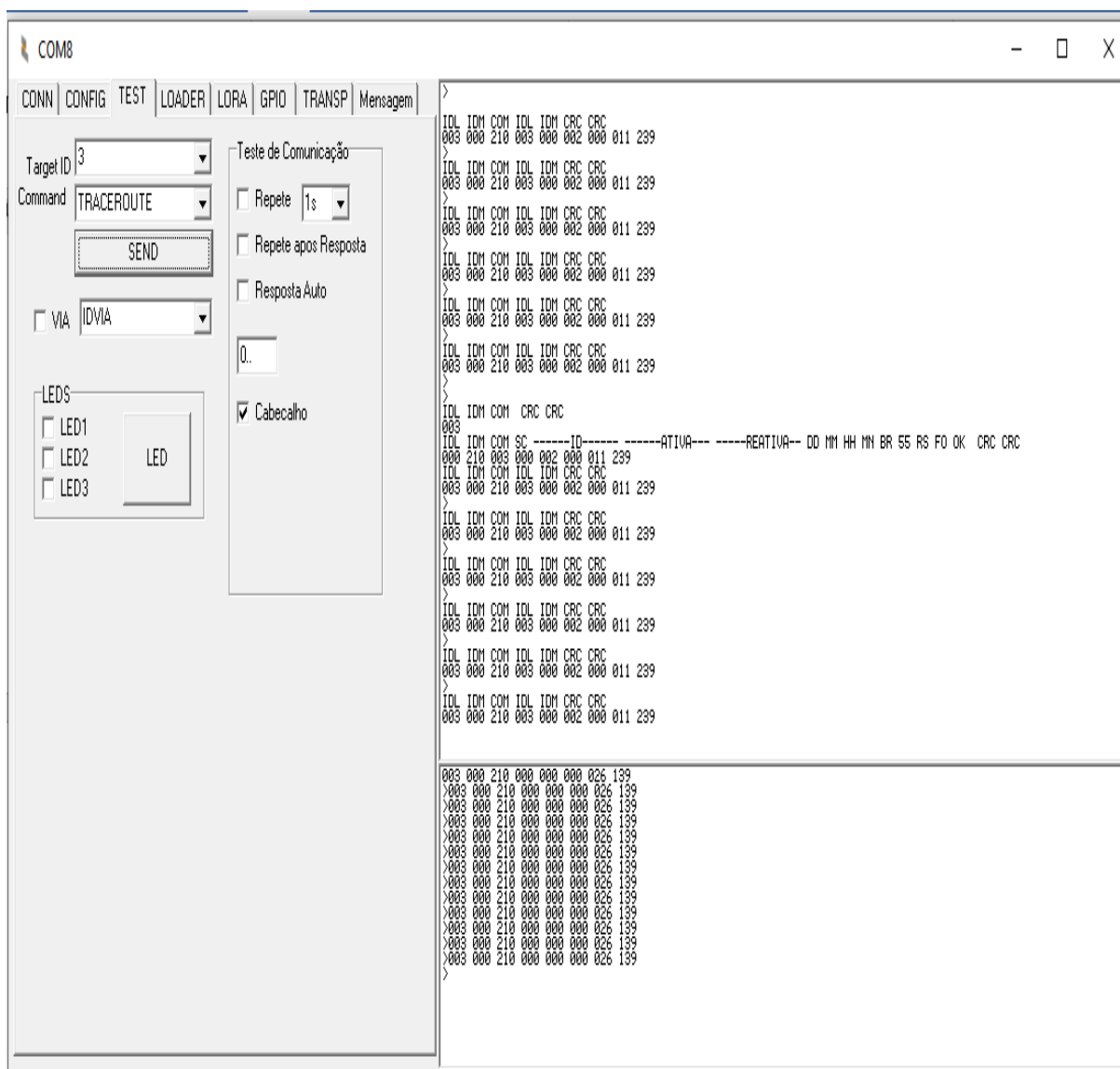


Figura 146. Tela do aplicativo de comunicação mostrando o envio pelo nó fixo ID0 de comandos *Traceroute*, dos quais todos foram recebidos, pelo nó ID3, com sucesso.

Fontes: aplicativo de comunicação e o autor.

- **Nó móvel ID3 posicionado num local da área de estacionamento em frente ao sexto poste depois daquele onde estava fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem (ponto P₈, na Figura 108)**

Seguindo com o deslocamento do nó móvel ID3 ao longo da área de estacionamento de carros, no sentido da Ilha da Boa Viagem, o próximo ponto de medição dos sinais enviados do nó ID0 para o nó ID3 foi em um local do estacionamento em frente ao *sexto* poste depois daquele em que estava posicionado o nó fixo ID2, como ilustrado na Figura 147, na qual nota-se que a distância entre os nós ID0, ID2 e ID3 ficou em torno de 673,35 m, aproximadamente.

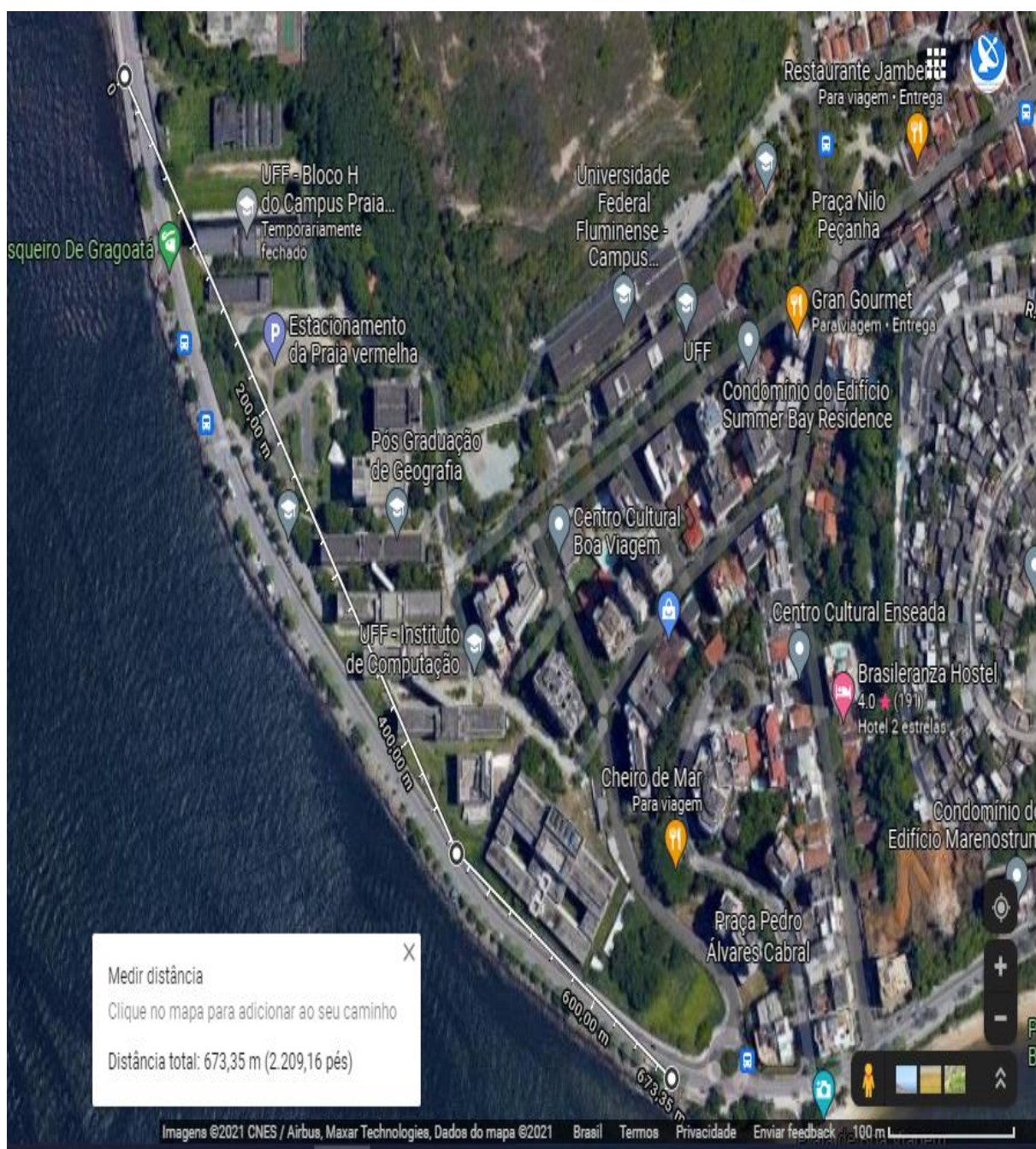


Figura 147. Nó móvel ID3 na área de estacionamento em frente ao sexto poste depois daquele onde estava o nó fixo ID2.

Fontes: Google Maps e o autor.

Foram enviados comandos *Traceroute* do nó fixo ID0 para o nó móvel ID3 e verificou-se que os quadros do sinal passaram pelo nó fixo ID2 antes de chegarem a ID3, conforme mostrado na tela do aplicativo de comunicação apresentada na Figura 148. Como pode ser observado, todos os quadros de sinal enviados por ID0 frecebidos, pelo nó ID3, com sucesso, sendo que 8,33% deles sofreram interferências, possivelmente devido a veículos que se deslocavam na Avenida Milton Tavares de Souza.

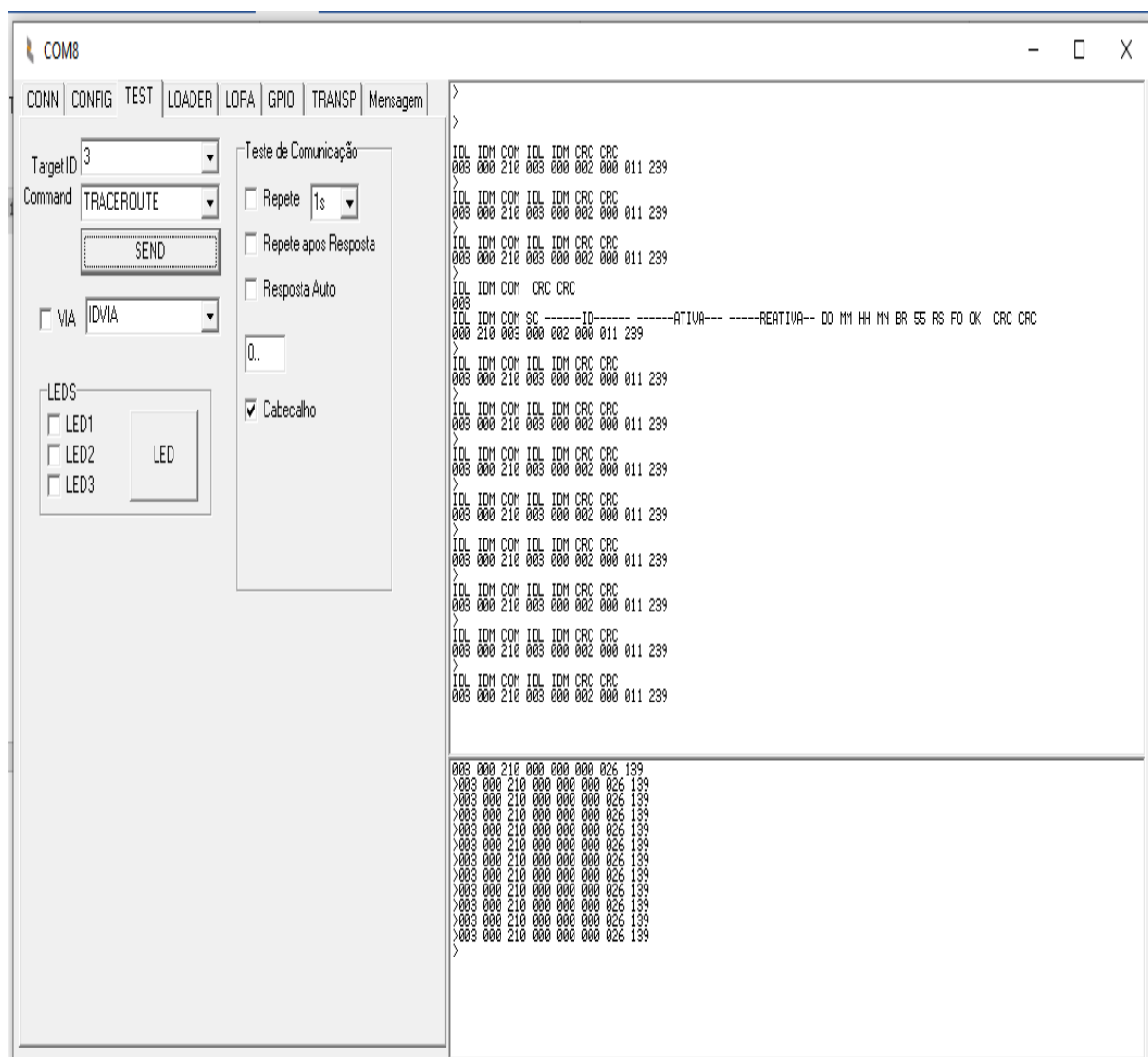


Figura 148. Tela do aplicativo de comunicação mostrando o envio, pelo nó fixo ID0, de comandos *Traceroute*, dos quais foram todos recebidos, pelo nó ID3, com sucesso, sendo que um deles sofreu interferências.

Fontes: aplicativo de comunicação e o autor.

- **Nó móvel ID3 posicionado num local da área de estacionamento em frente ao sétimo poste depois daquele onde estava fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem (ponto P₉, na Figura 108)**

Prosseguindo com o deslocamento do nó móvel ID3 ao longo da área de estacionamento de carros, no sentido da Ilha da Boa Viagem, o próximo ponto de medição dos sinais enviados do nó ID0 para o nó ID3 foi em um local do estacionamento em frente ao *sétimo* poste depois daquele em que estava posicionado o nó fixo ID2, como ilustrado na Figura 149, na qual nota-se que a distância entre os nós ID0, ID2 e ID3 ficou em torno de 720,10 m, aproximadamente.

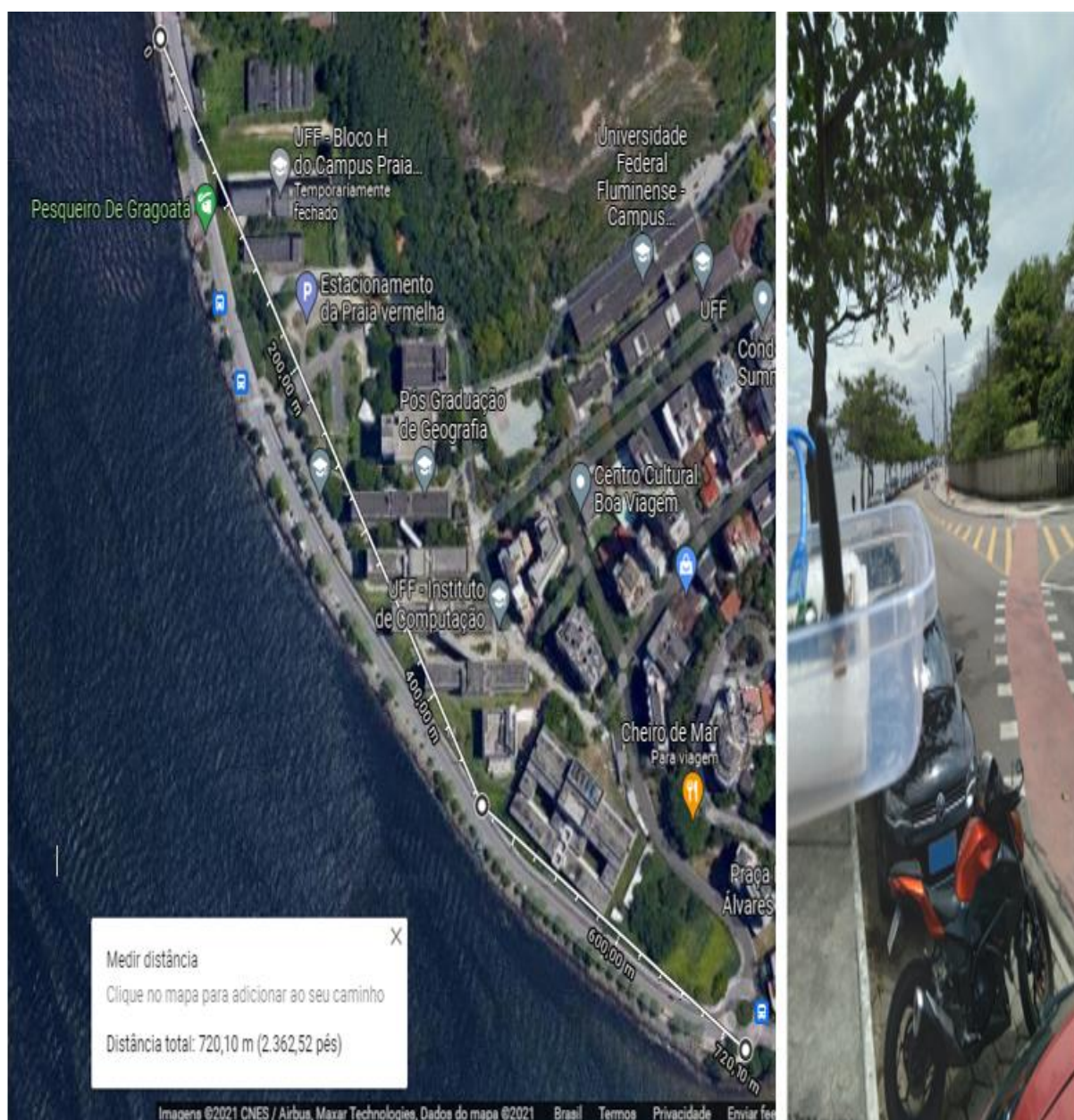


Figura 149. Nó móvel ID3 na área de estacionamento em frente ao sétimo poste depois daquele onde estava o nó fixo ID2.

Fontes: Google Maps, Joacir de Oliveira Silva e o autor.

Foram enviados comandos *Traceroute* do nó fixo ID0 para o nó móvel ID3 e verificou-se que os quadros passaram pelo nó fixo ID2 antes de chegarem a ID3, conforme mostrado na tela de comunicação do aplicativo apresentada na Figura 150. Como pode ser observado, todos os quadros de sinal enviados por ID0 foram recebidos pelo nó ID3 com sucesso, sendo que 45,45% deles sofreram interferências, provavelmente devido a veículos que trafegavam pela Avenida Milton Tavares de Souza.

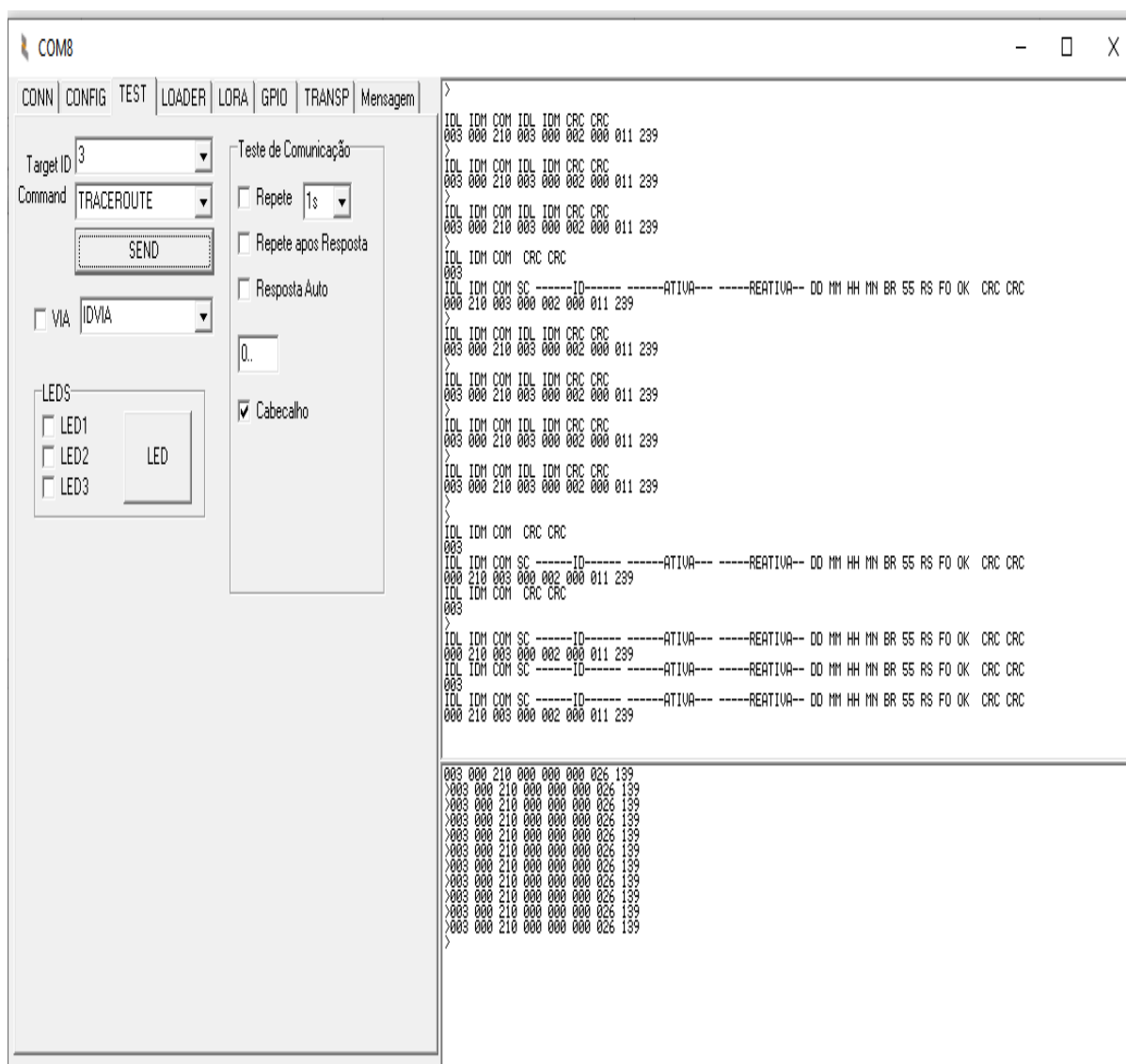


Figura 150. Tela do aplicativo de comunicação mostrando o envio pelo nó fixo ID0 de comandos *Traceroute*, dos quais todos foram recebidos, pelo nó ID3, com sucesso, embora alguns deles tenham sofrido interferências.

Fontes: aplicativo de comunicação e o autor.

- **Nó móvel ID3 posicionado num local da área de estacionamento em frente ao oitavo poste depois daquele onde estava fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem (ponto P₁₀, na Figura 108)**

Seguindo com o deslocamento do nó móvel ID3 ao longo da área de estacionamento de carros, no sentido da Ilha da Boa Viagem, o próximo ponto de medição dos sinais enviados do nó ID0 para o nó ID3 foi em um local do estacionamento em frente ao *oitavo* poste depois daquele em que estava posicionado o nó fixo ID2, como ilustrado na Figura 151, na qual nota-se que a distância entre os nós ID0, ID2 e ID3 ficou em torno de 750,59 m, aproximadamente.

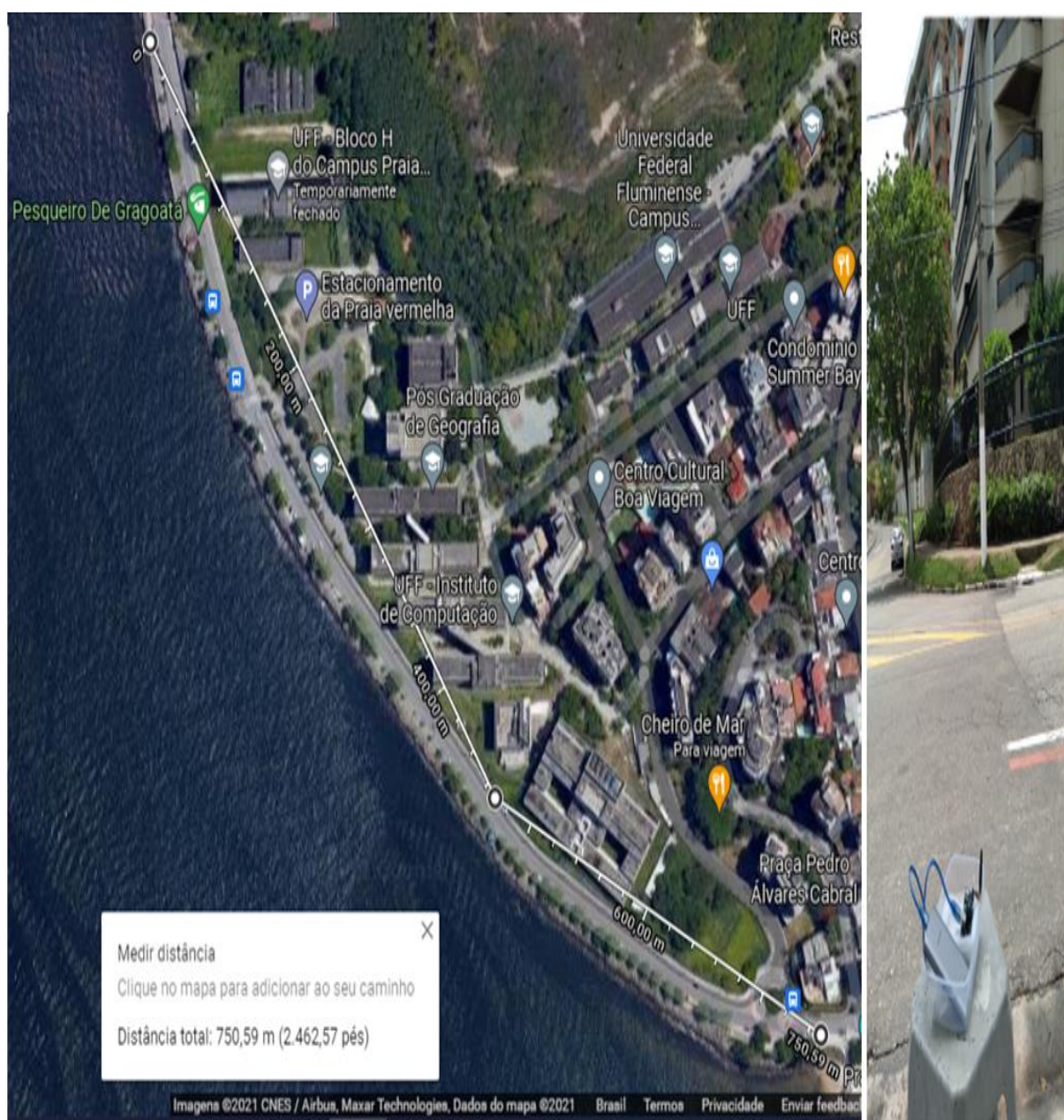


Figura 151. Nó móvel ID3 na área de estacionamento em frente ao oitavo poste depois daquele onde estava o nó fixo ID2.

Fontes: Google Maps, Joacir de Oliveira Silva e o autor.

Foram enviados comandos *Traceroute* do nó fixo ID0 para o nó móvel ID3 e verificou-se que os quadros passaram pelo nó fixo ID2 antes de chegarem a ID3, conforme mostrado na tela do aplicativo de comunicação apresentada na Figura 152. Como pode ser observado, dos quadros de sinal enviados por ID0, 91,67% foram recebidos pelo nó ID3 com sucesso, sendo que 27,27% dos recebidos com êxito sofreram interferências, e 8,33% foram perdidos, possivelmente devido a veículos que trafegavam na Avenida Milton Tavares de Souza.

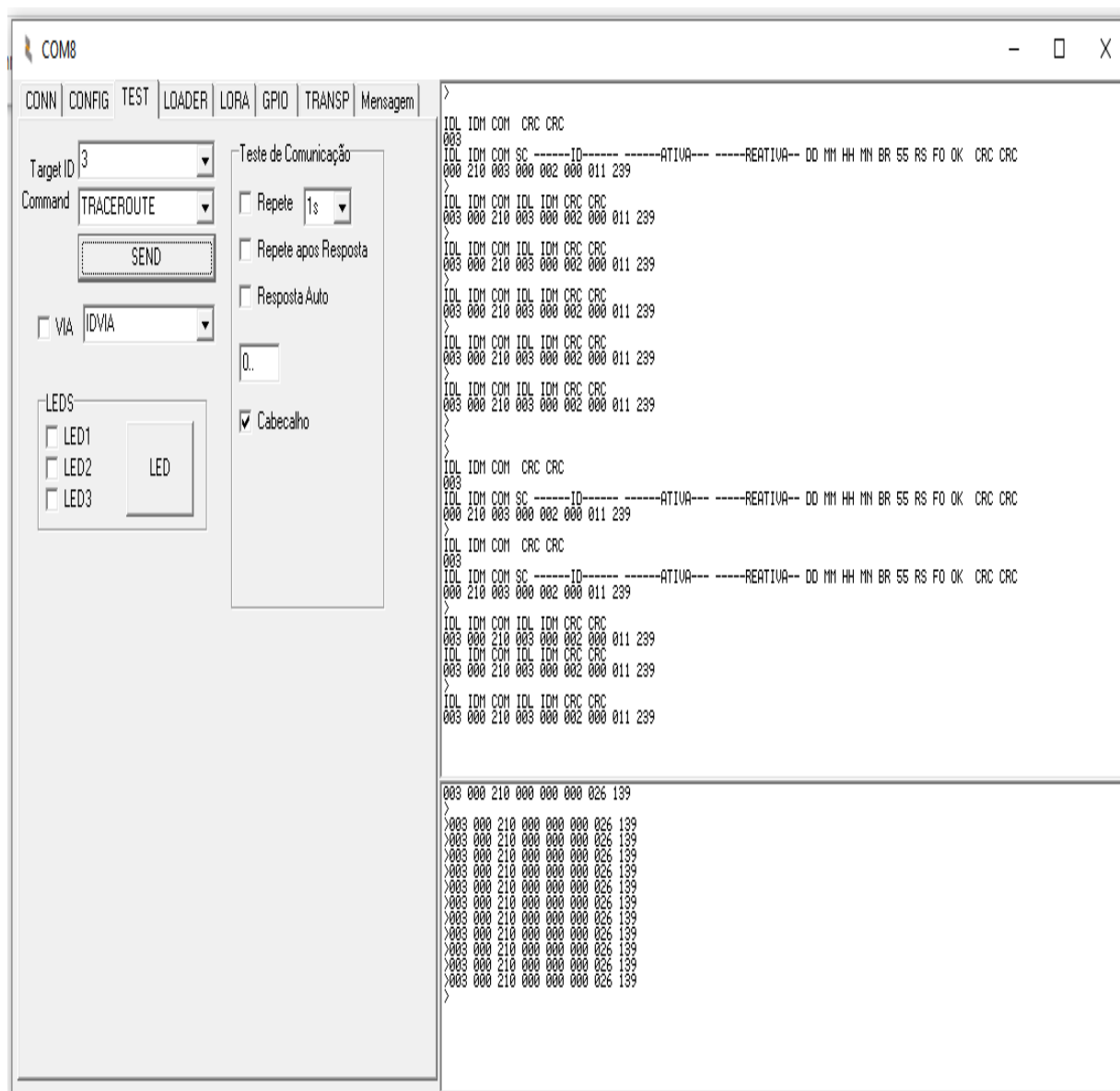


Figura 152. Tela do aplicativo de comunicação mostrando o envio pelo nó fixo ID0 de comandos *Traceroute*, dos quais todos foram recebidos, pelo nó ID3, com sucesso, embora alguns deles tenham sofrido interferências.

Fontes: aplicativo de comunicação e o autor.

- **Nó móvel ID3 posicionado num local da área de estacionamento em frente ao *nono* poste depois daquele onde estava fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem (ponto P11, na Figura 108)**

Continuando com o deslocamento do nó móvel ID3 ao longo da área de estacionamento de carros, no sentido da Ilha da Boa Viagem, o próximo ponto de medição dos sinais enviados do nó ID0 para o nó ID3 foi em um local do estacionamento em frente ao *nono* poste depois daquele em que estava posicionado o nó fixo ID2, como ilustrado na Figura 153, na qual nota-se que a distância entre os nós ID0, ID2 e ID3 ficou em torno de 784,75 m, aproximadamente.

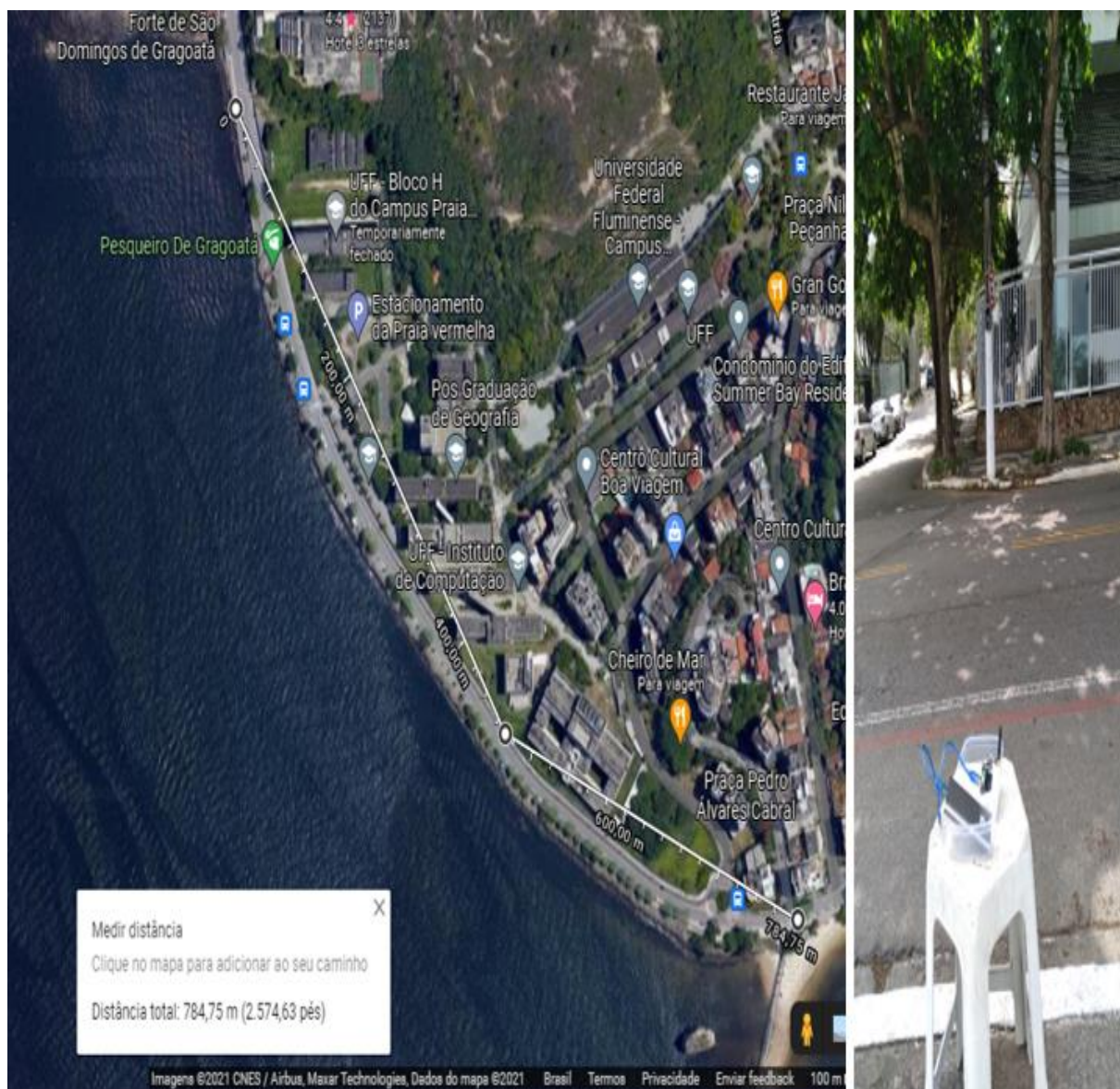


Figura 153. Nó móvel ID3 na área de estacionamento em frente ao *nono* poste depois daquele onde estava o nó fixo ID2.

Fontes: Google Maps, Joacir de Oliveira Silva e o autor.

Foram enviados comandos *Traceroute* do nó fixo ID0 para o nó móvel ID3 e verificou-se que os quadros do sinal passaram pelo nó fixo ID2 antes de chegarem a ID3, conforme mostrado na tela do aplicativo de comunicação mostrada na Figura 154. Como pode ser observado, dos quadros de sinal enviados por ID0, 78,57% foram recebidos pelo nó ID3 com sucesso, 21,43% foram perdidos e, dos que chegaram com êxito, 18,18% sofreram interferências, provavelmente devido a veículos que trafegavam na Avenida Milton Tavares de Souza.

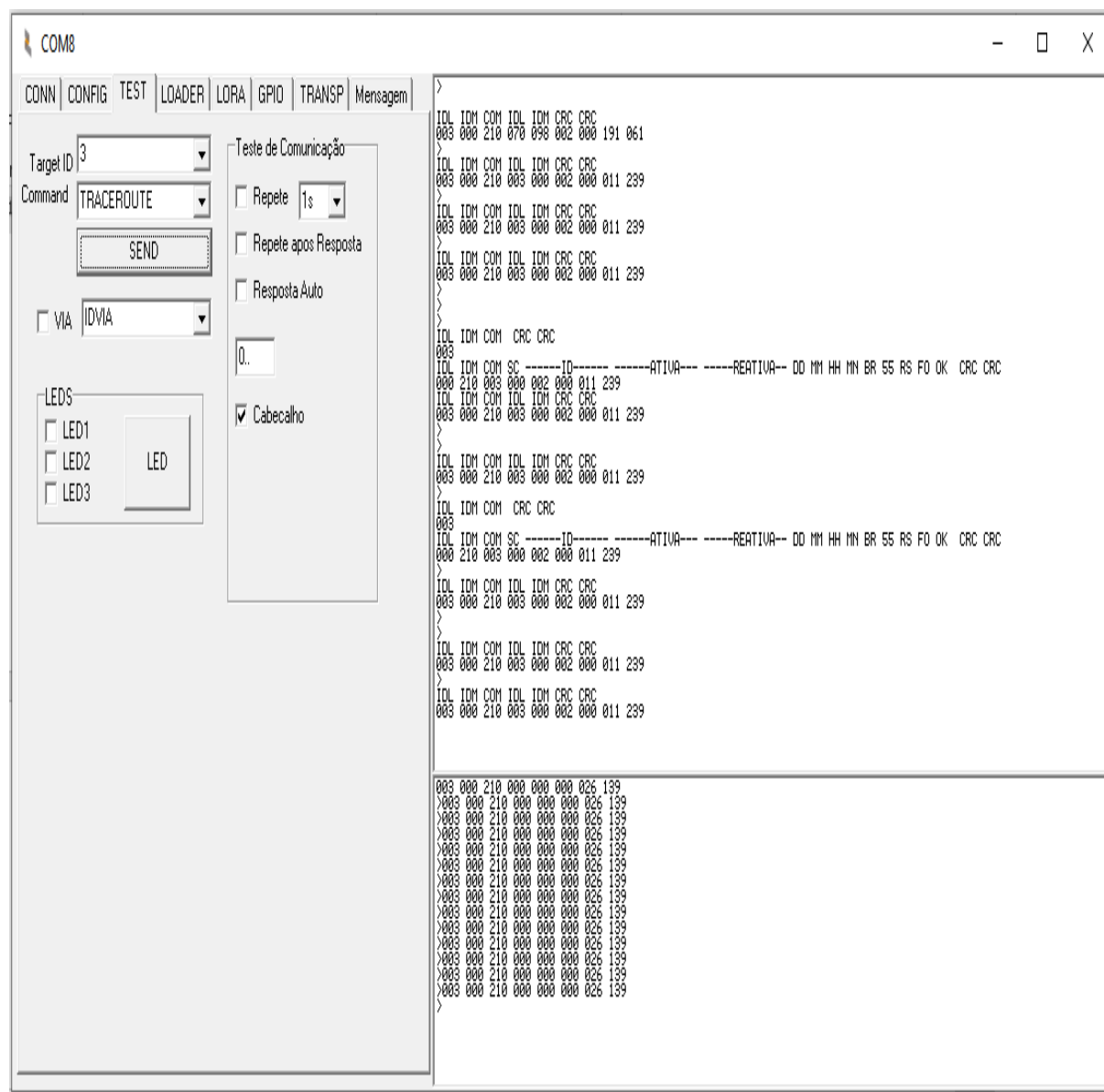


Figura 154. Tela do aplicativo de comunicação mostrando o envio pelo nó fixo ID0 de comandos *Traceroute*, dos quais a maioria foi recebida, pelo nó ID3, com sucesso, embora alguns deles tenham sofrido interferências ou sido perdidos.

Fontes: aplicativo de comunicação e o autor.

- **Nó móvel ID3 posicionado num local da área de estacionamento em frente ao *décimo* poste depois daquele onde estava fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem (ponto P₁₂, na Figura 108)**

Seguindo com o deslocamento do nó móvel ID3 ao longo da área de estacionamento de carros, no sentido da Ilha da Boa Viagem, o próximo ponto de medição dos sinais enviados do nó ID0 para o nó ID3 foi em um local do estacionamento em frente ao *décimo* poste depois daquele em que estava posicionado o nó fixo ID2, como ilustrado na Figura 155, na qual nota-se que a distância entre os nós ID0, ID2 e ID3 ficou em torno de 811,69 m, aproximadamente.

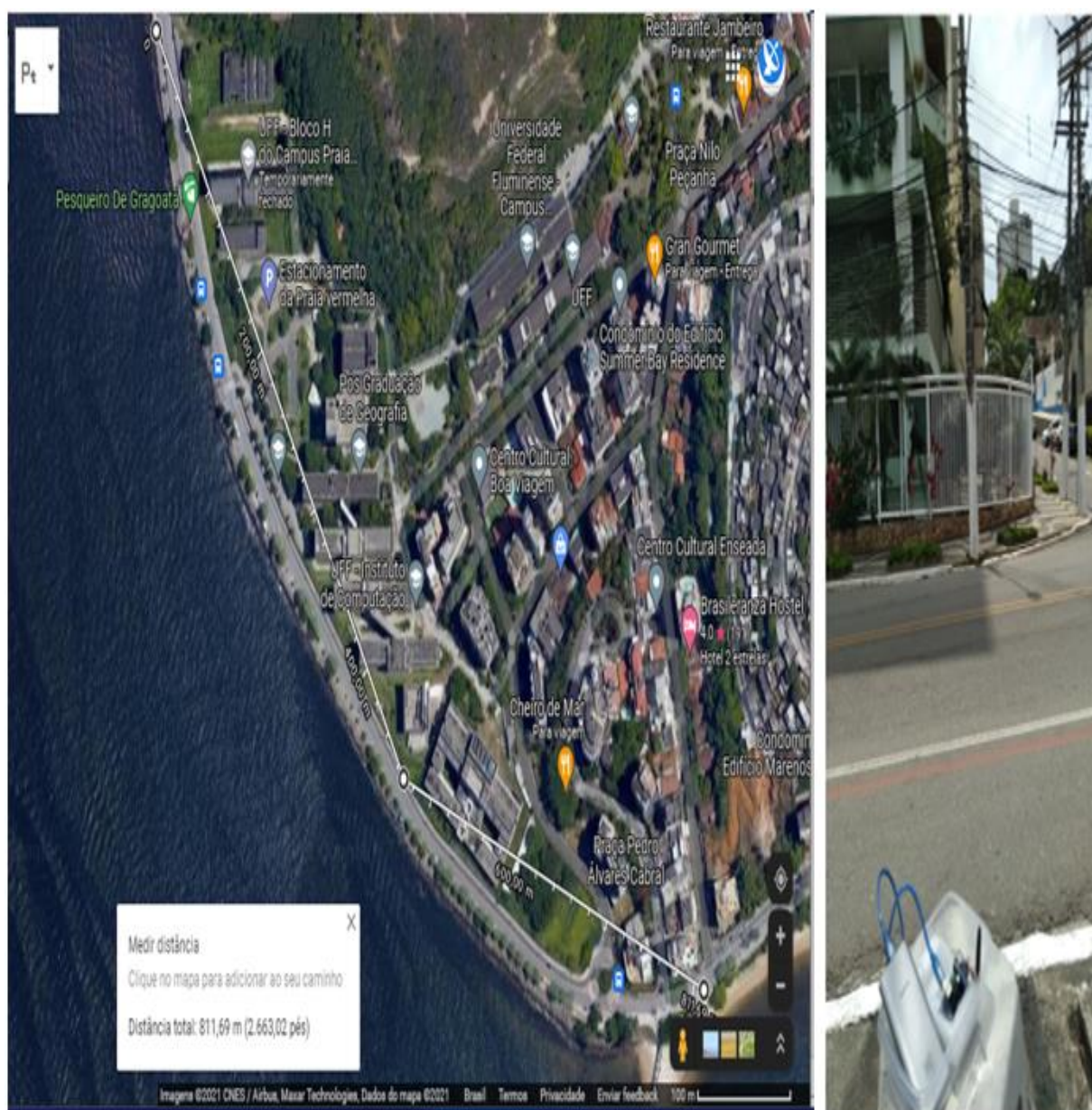


Figura 155. Nó móvel ID3 na área de estacionamento em frente ao *décimo* poste depois daquele onde estava o nó fixo ID2.

Fontes: Google Maps, Joacir de Oliveira Silva e o autor.

Foram enviados comandos *Traceroute* do nó fixo ID0 para o nó móvel ID3 e verificou-se que os quadros de dados passaram pelo nó fixo ID2 antes de chegarem a ID3, conforme mostrado na tela do aplicativo de comunicação apresentada na Figura 156. Como pode ser observado, dos quadros de sinal encaminhados por ID0, 68,75% foram recebidos pelo nó ID3 com sucesso, sendo que 9,09% dos que chegaram com êxito sofreram interferências, e 31,25% foram perdidos, possivelmente devido a veículos que trafegavam na Avenida Milton Tavares de Souza.

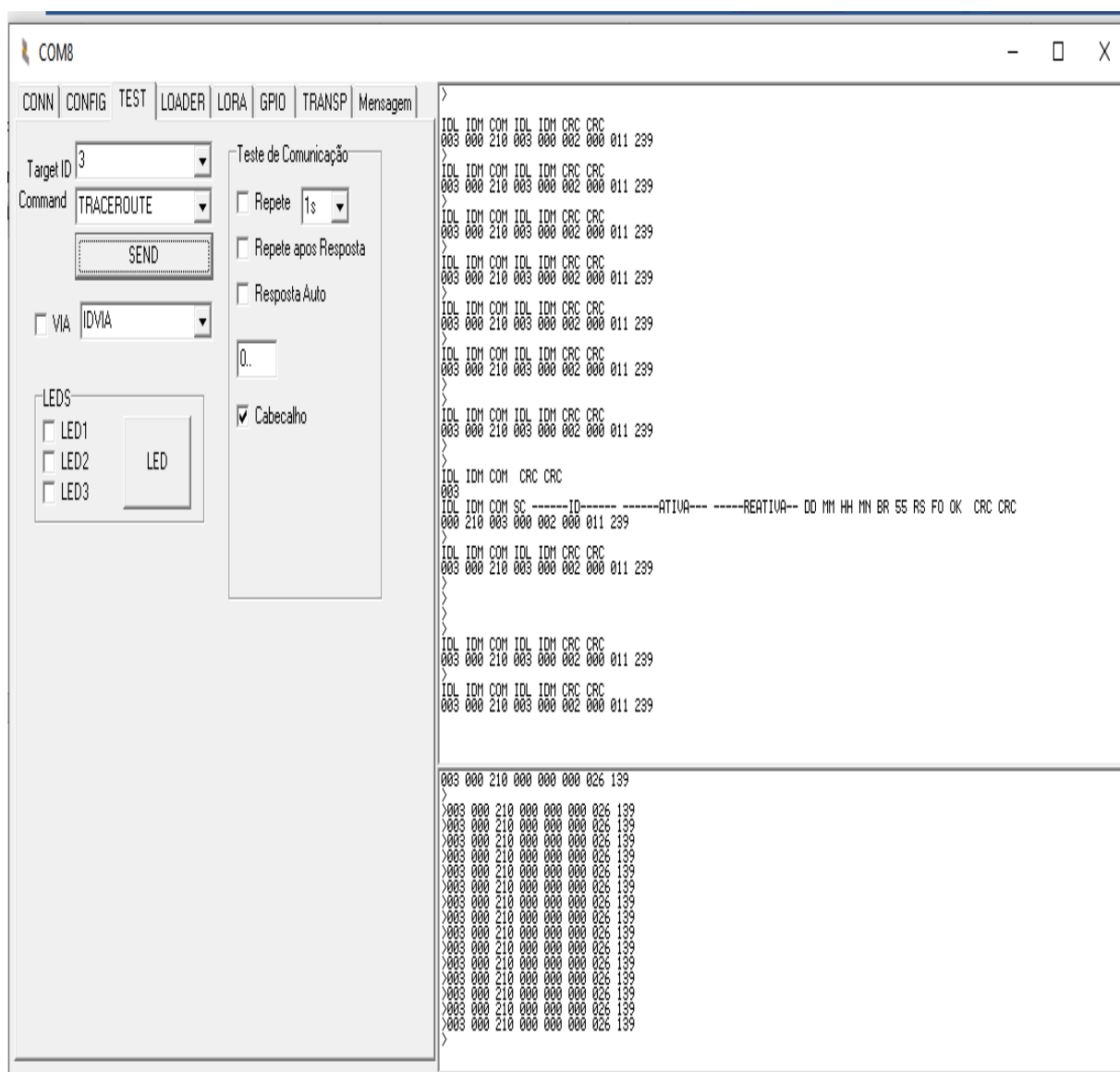


Figura 156. Tela do aplicativo de comunicação mostrando o envio pelo nó fixo ID0 de comandos *Traceroute*, dos quais a maioria foi recebida, pelo nó ID3, com sucesso e alguns deles tenham sido perdidos.

Fontes: aplicativo de comunicação e o autor.

- **Nó móvel ID3 posicionado num local da área de estacionamento em frente ao *décimo primeiro* poste depois daquele onde estava fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem (ponto P₁₃, na Figura 108)**

Continuando com o deslocamento do nó móvel ID3 ao longo da área de estacionamento de carros, no sentido da Ilha da Boa Viagem, o próximo ponto de medição dos sinais enviados do nó ID0 para o nó ID3 foi em um local do estacionamento em frente ao *décimo primeiro* poste depois daquele em que estava posicionado o nó fixo ID2, como ilustrado na Figura 157, na qual

nota-se que a distância entre os nós ID0, ID2 e ID3 ficou em torno de 832,09 m, aproximadamente.

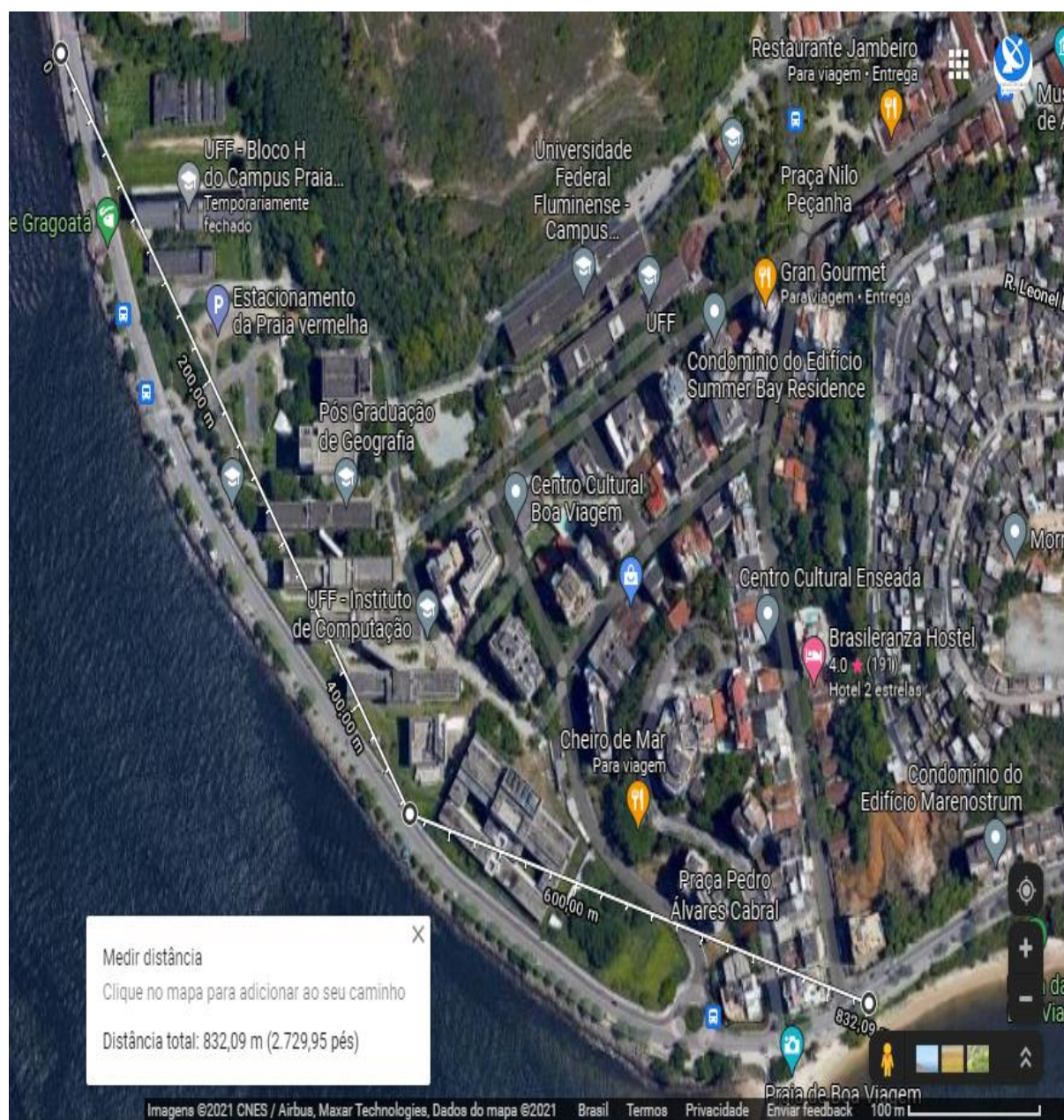


Figura 157. Nó móvel ID3 na área de estacionamento em frente ao *décimo primeiro* poste depois daquele onde estava o nó fixo ID2.

Fontes: Google Maps e o autor.

Foram enviados comandos *Traceroute* do nó fixo ID0 para o nó móvel ID3, mas, conforme mostrado na tela de comunicação do aplicativo apresentada na Figura 158, foram todos perdidos, devido, possivelmente, ao bloqueio causado pelos edifícios dispostos no meio do trajeto do sinal enviado pelo nó fixo ID0 até o nó móvel ID3.

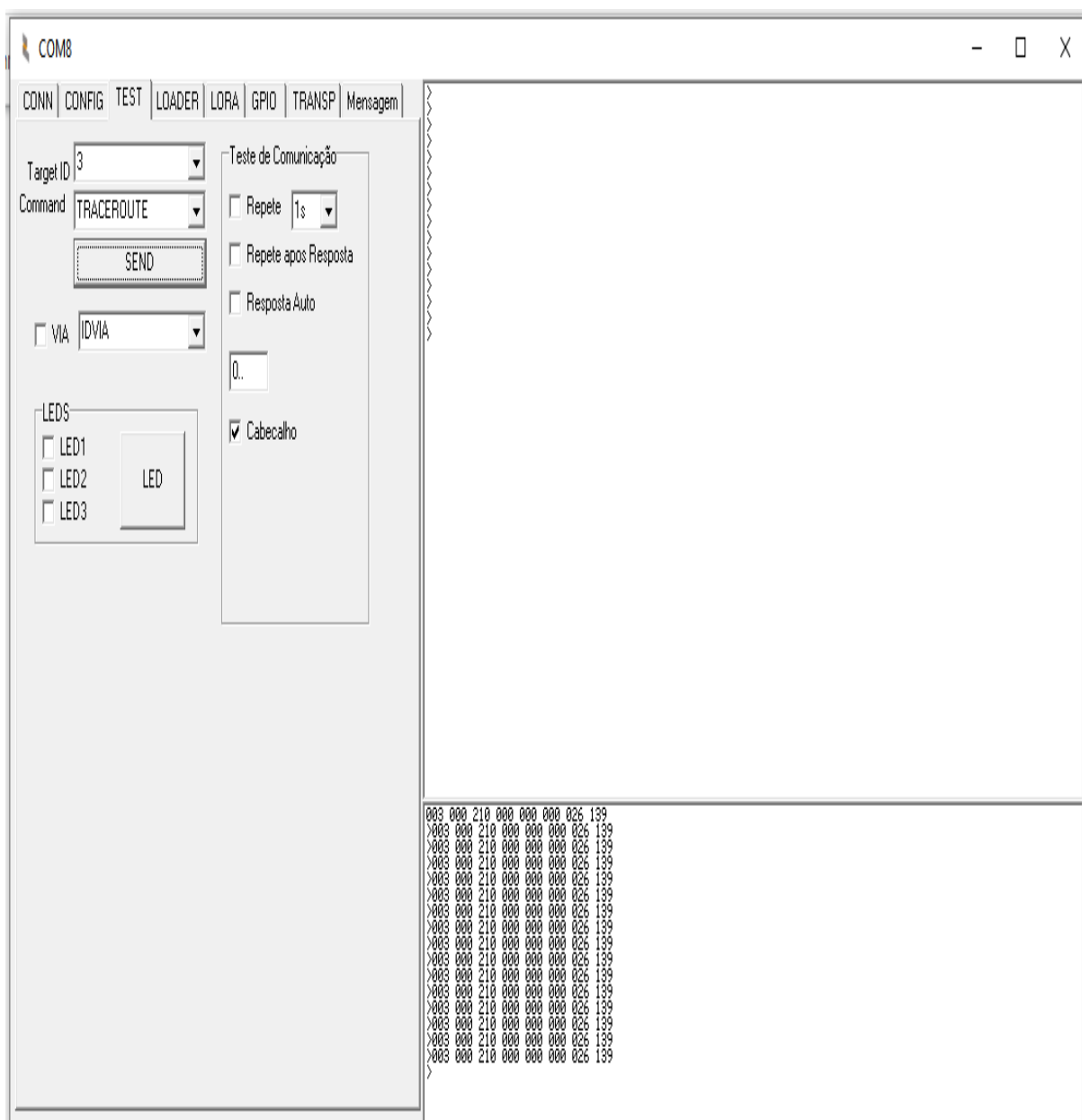


Figura 158. Tela do aplicativo de comunicação mostrando o envio pelo nó fixo ID0 de comandos *Traceroute*, os quais todos foram perdidos.

Fontes: aplicativo de comunicação e o autor.

- **Nó móvel ID3 posicionado num local da área de estacionamento em frente ao *décimo segundo* poste depois daquele onde estava fixado o nó ID2, no sentido da Ilha da Boa Viagem (ponto P₁₄, na Figura 108)**

Mantendo o deslocamento do nó móvel ID3 ao longo da área de estacionamento de carros, no sentido da Ilha da Boa Viagem, o próximo ponto de medição dos sinais enviados do nó ID0 para o nó ID3 foi em um local do estacionamento em frente ao *décimo segundo* poste depois daquele em que estava posicionado o nó fixo ID2, como ilustrado na Figura 159, na qual

nota-se que a distância entre os nós ID0, ID2 e ID3 ficou em torno de 861,85 m, aproximadamente.

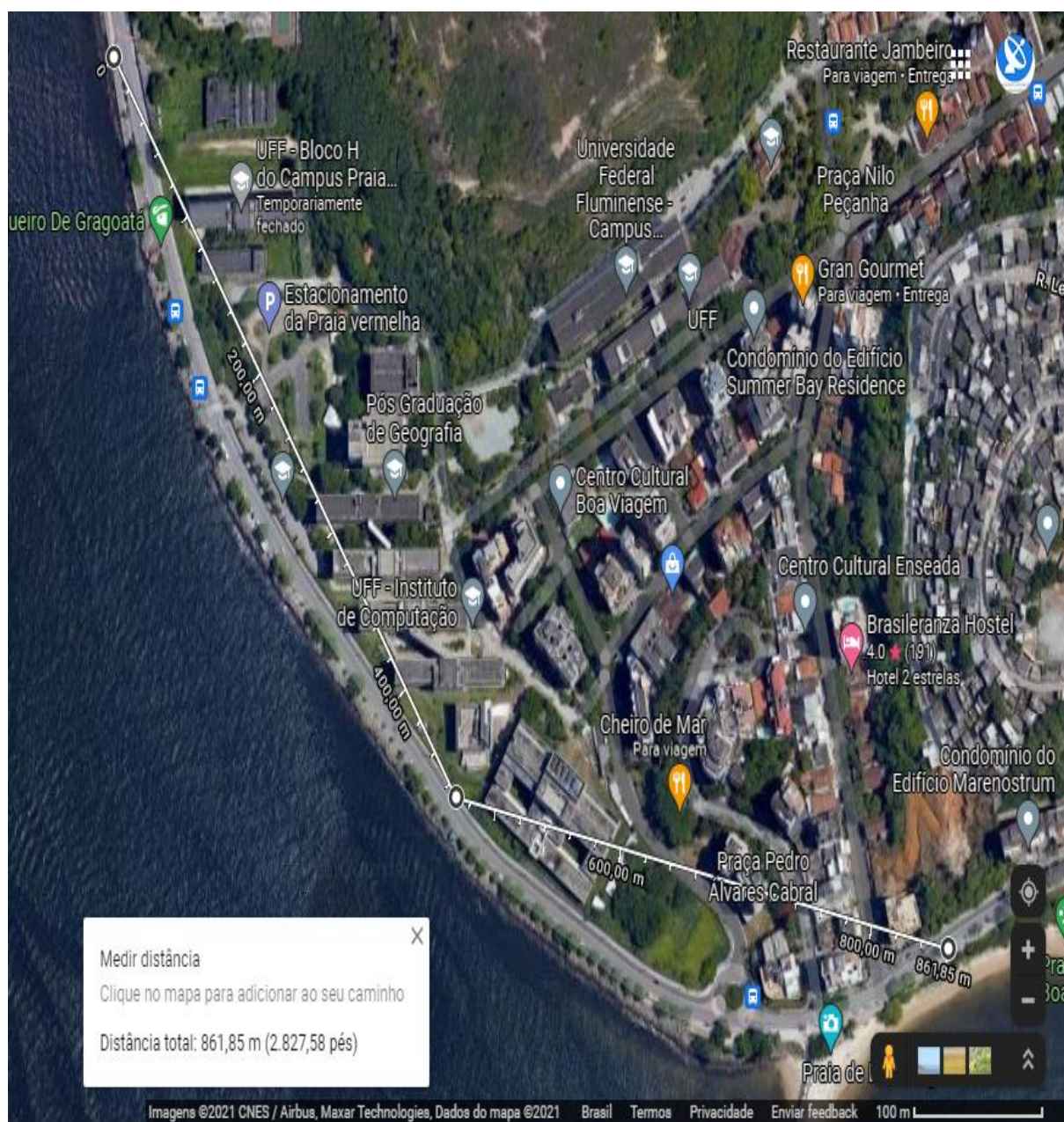


Figura 159. Nó móvel ID3 na área de estacionamento em frente ao *décimo segundo* poste depois daquele onde estava o nó fixo ID2.

Fontes: Google Maps e o autor.

Foram enviados comandos *Traceroute* do nó fixo ID0 para o nó móvel ID3, mas, novamente, conforme pode ser observado na tela do aplicativo de comunicação apresentada na Figura 160, foram todos perdidos, devido, provavelmente, ao bloqueio causado pelos edifícios dispostos no meio do trajeto do sinal enviado pelo nó fixo ID0 até o nó móvel ID3.

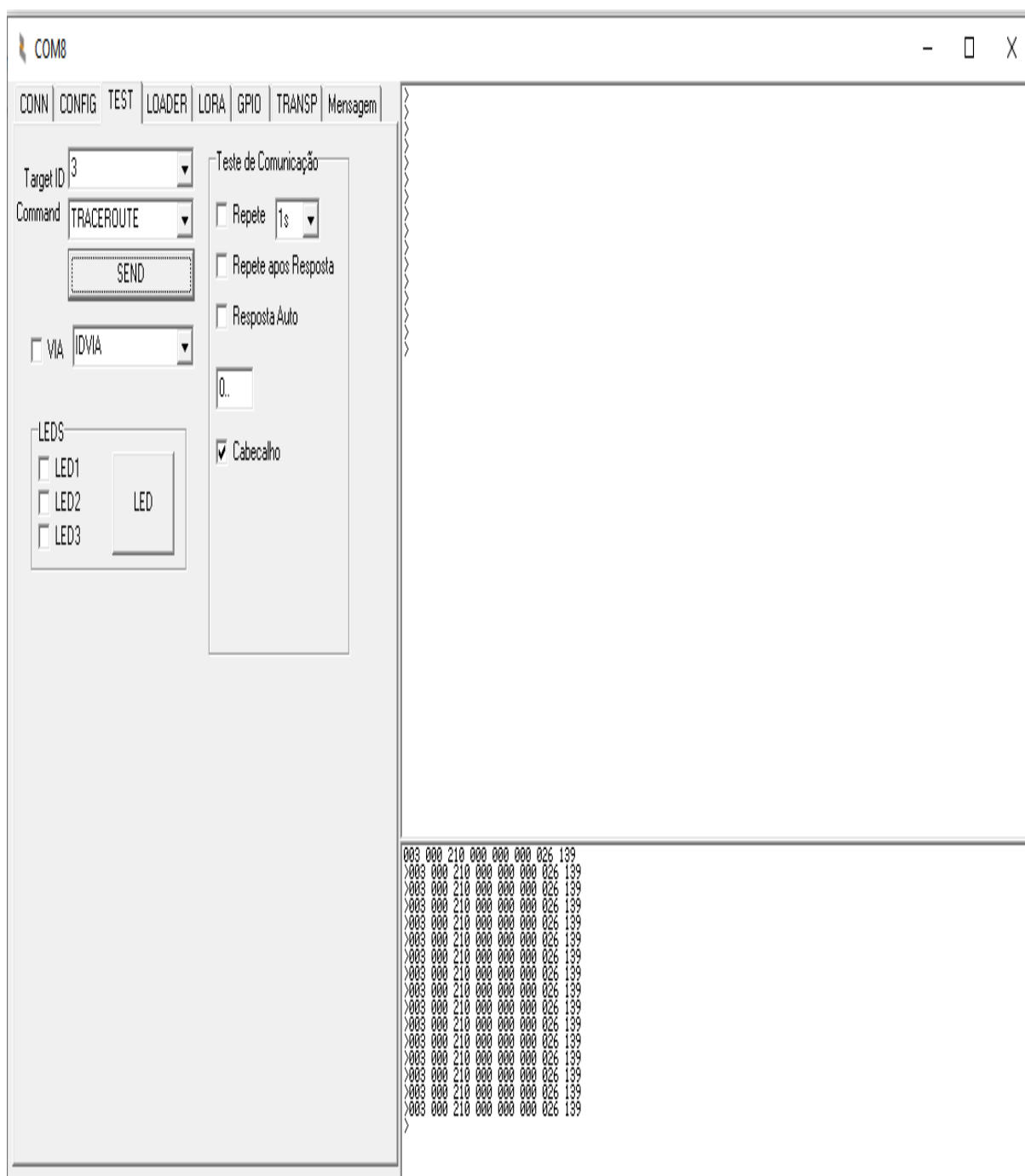


Figura 160. Tela do aplicativo de comunicação mostrando o envio pelo nó fixo ID0 de comandos *Traceroute*, os quais todos foram perdidos.

Fontes: aplicativo de comunicação e o autor.

Finalmente, é mostrada, novamente, a Figura 108, na qual estão detalhados todos os pontos considerados.

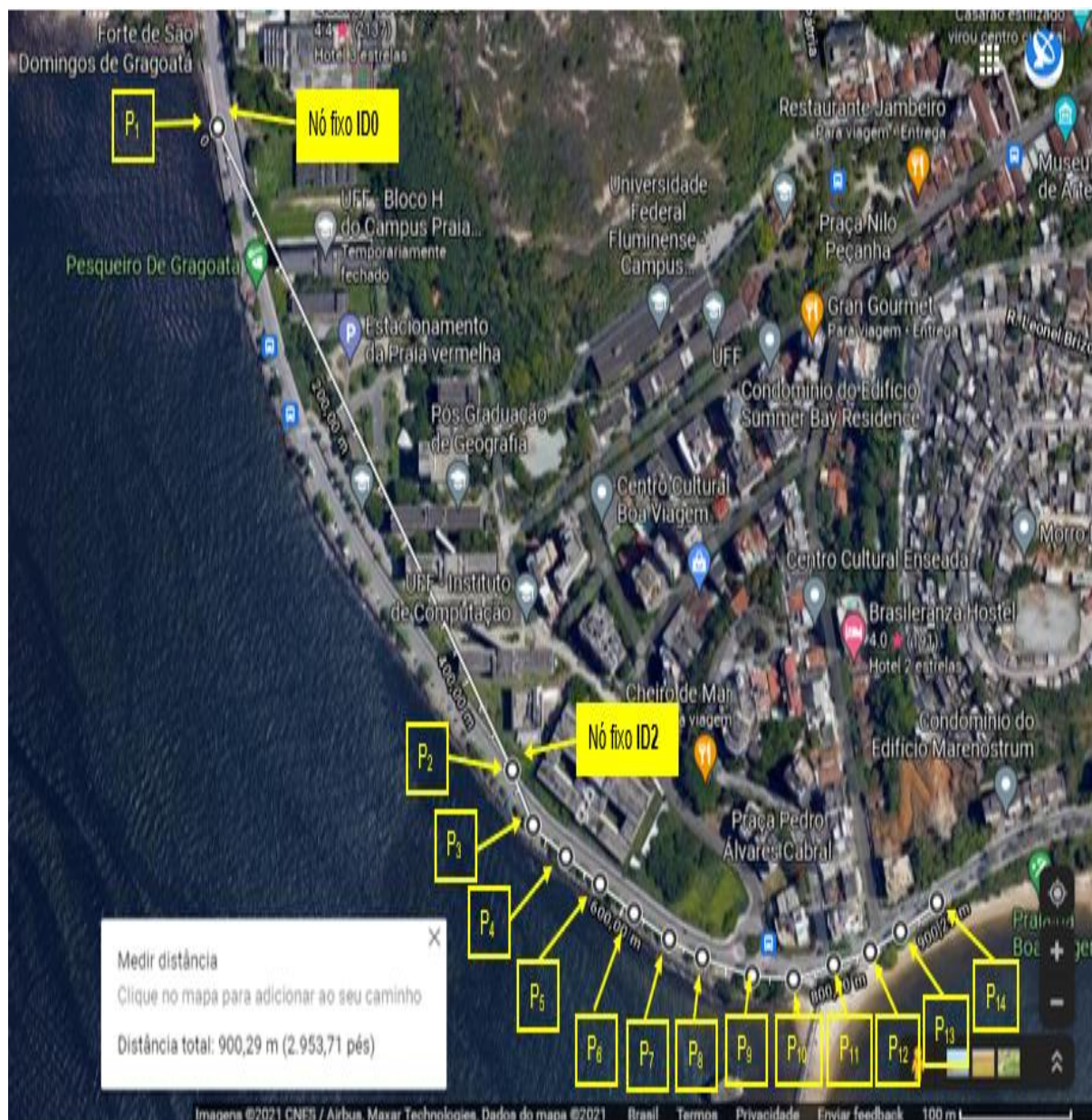


Figura 108. Vista aérea dos pontos da orla da Praia da Boa Viagem nos quais foram fixados os nós ID0 (ponto P₁) e ID2 (ponto P₂), e aqueles por onde o nó ID3 passou por tentativas de comunicação com o nó ID0 (pontos P₃ a P₁₄).

Fontes: Google Maps e o autor.

Então, concluiu-se que o ponto P₁₂ (localizado em frente ao décimo poste depois do que continha o nó fixo ID2), que mantinha uma distância total de 811,69 metros, de ID0 a ID2 e de ID2 a ID3, era aquele o mais afastado possível do nó ID0 que ainda permitia o recebimento de sinais provenientes de ID0 com confiabilidade, e assim, este quarto e último cenário terminou. A seguir, é apresentada, mais uma vez, a Tabela 12, que resume os resultados obtidos neste cenário.

Tabela 12. Resumo das medições de sinal realizadas no cenário externo caracterizado pela orla da Praia da Boa Viagem, em Niterói, RJ.

Posições do nó ID3	Referência	Taxa de quadros recebidos com sucesso por ID0	Taxa de quadros perdidos	Distância ID2-ID3 (m)	Distância Total (ID0-ID2) +(ID2-ID3) (m) Obs.: ID0→ID2 = 466,53 m
Nó móvel ID3 situado em P ₂	Poste em frente àquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	90%	10%	12,00	478,53
Nó móvel ID3 situado em P ₃	<i>Primeiro</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	100%	0%	44,71	511,24
Nó móvel ID3 situado em P ₄	<i>Segundo</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	100%	0%	79,75	546,28
Nó móvel ID3 situado em P ₅	<i>Terceiro</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	100%	0%	106,55	573,08
Nó móvel ID3 situado em P ₆	<i>Quarto</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	100%	0%	141,49	608,02
Nó móvel ID3 situado em P ₇	<i>Quinto</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	100%	0%	179,16	645,69
Nó móvel ID3 situado em P ₈	<i>Sexto</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	100%	0%	206,82	673,35
Nó móvel ID3 situado em P ₉	<i>Sétimo</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	100%	0%	253,57	720,10

Continua.

Continuação da Tabela.

Posições do nó ID3	Referência	Número de quadros recebidos com sucesso por ID3	Número de quadros perdidos	Distância ID2-ID3 (m)	Distância Total (ID0-ID2) +(ID2-ID3) (m) Obs.: ID0→ID2 = 466,53 m
Nó móvel ID3 situado em P ₁₀	<i>Oitavo</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	91,67%	8,33%	284,06	750,59
Nó móvel ID3 situado em P ₁₁	<i>Nono</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	78,57	21,43%	318,22	784,75
Nó móvel ID3 situado em P ₁₂	<i>Décimo</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	68,75%	31,25%	345,16	811,69
Nó móvel ID3 situado em P ₁₃	<i>Décimo primeiro</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	0%	100%	365,56	832,09
Nó móvel ID3 situado em P ₁₄	<i>Décimo segundo</i> poste depois daquele em que foi fixado o nó ID2 (P ₂)	0%	100%	395,32	861,85

Fonte: o autor.