

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS E COMPUTAÇÃO**

LEONARDO COSTA FERREIRA

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO
SEM FIO PARA APLICAÇÃO EM FANETS: UMA ABORDAGEM PRÁTICA
EM RÁDIOS LORA E ZIGBEE**

**RIO DE JANEIRO
2022**

LEONARDO COSTA FERREIRA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO
SEM FIO PARA APLICAÇÃO EM FANETS: UMA ABORDAGEM PRÁTICA
EM RÁDIOS LORA E ZIGBEE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Sistemas e Computação do Instituto Militar de Engenharia,
como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre
em Ciências em Sistemas e Computação.

Orientador(es): Paulo Fernando Ferreira Rosa, Ph.D.
Luis Claudio Batista da Silva, D.Sc.

Rio de Janeiro

2022

©2022

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Ferreira, Leonardo Costa.

Avaliação de desempenho de tecnologias de comunicação sem fio para aplicação em FANETs: uma abordagem prática em rádios LoRa e ZigBee / Leonardo Costa Ferreira. – Rio de Janeiro, 2022.

142 f.

Orientador(es): Paulo Fernando Ferreira Rosa e Luis Claudio Batista da Silva.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Sistemas e Computação, 2022.

1. VANT. 2. FANET. 3. Avaliação de desempenho. 4. LoRa. 5. ZigBee. 6. Redes *ad hoc*. i. Rosa, Paulo Fernando Ferreira (orient.) ii. da Silva, Luis Claudio Batista (orient.) iii. Título

LEONARDO COSTA FERREIRA

**Avaliação de desempenho de tecnologias de comunicação
sem fio para aplicação em FANETs: uma abordagem
prática em rádios Lora e Zigbee**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Sistemas e Computação do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Sistemas e Computação.

Orientador(es): Paulo Fernando Ferreira Rosa e Luis Claudio Batista da Silva.

Aprovado em Rio de Janeiro, 19 de janeiro 2022, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Luis Claudio Batista da Silva - D.Sc. do CEFET/RJ - Presidente



Prof. Paulo Fernando Ferreira Rosa - Ph.D. do IME



Prof. Felipe da Rocha Henriques - D.Sc. do CEFET/RJ



Prof^a. Débora Christina Muchaluat Saade - D.Sc. da UFF



Prof. Anderson Fernandes Pereira dos Santos - D.Sc. do IME

Rio de Janeiro

2022

Este trabalho é dedicado à Deus, minha esposa, filho e meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus por me manter com saúde. Em seguida, a minha mãe por ter me criado sozinha com todo esforço e por me orientar e motivar a chegar aonde cheguei. Não posso deixar de agradecer, também, a minha amada esposa e filho por terem serenidade e por terem me proporcionado todo apoio e incentivo necessário para não desistir de um objetivo.

Ademais, à Marinha do Brasil, por oferecer essa oportunidade ímpar de me dedicar a este curso e aos meus professores do IME, em especial ao meu orientador, Professor Paulo Rosa, e ao meu coorientador, professor Luis Silva, pela transferência de conhecimento, paciência, toda orientação e por acreditarem em meu potencial incentivando este trabalho.

Aos demais professores do IME e colegas da Pós-graduação em Sistemas e Computação (PGSC), eu agradeço pela ajuda e sugestões durante essa caminhada e, por fim, um agradecimento especial àqueles que colaboraram muito no incentivo, troca de experiências, apoios logísticos e práticos, que possibilitaram a realização dos diversos experimentos deste estudo, reiterando meu coorientador prof. Luis Silva, além do Ricardo Maroquio e aos Suboficiais da reserva da Marinha do Brasil: Aldo Pereira e Gláucio Ribeiro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 - através do Programa de Cooperação Acadêmica em Defesa Nacional (PROCAD-DEFESA) Edital Nº 15/2019 (Processo Nº 23038.004236/2019-10).

*“Busquem, pois, em primeiro lugar o Reino de Deus e a sua justiça,
e todas essas coisas lhes serão acrescentadas.
(Bíblia Sagrada, Mateus 6:33)*

RESUMO

Este trabalho de dissertação realiza uma análise comparativa das tecnologias de longo alcance e baixo consumo LoRa, através do rádio LoRa RD42C, e ZigBee via rádio XBee-PRO S3B, ambas empregando protocolos de roteamento dinâmicos reativos, em um ambiente computacional similar ao embarcado em um veículo aéreo não tripulado (VANT). Atualmente é exponencial o crescimento do emprego de VANTs em diversas áreas, contudo a capacidade de uma única aeronave de grande porte torna-se limitada em alguns ambientes. Já um VANT menor tem dificuldades relativas à autonomia de voo, capacidade de carga e alcance de comunicação. Com essa premissa, o emprego de redes *ad hoc* aéreas (ou FANET, do inglês *flying ad hoc network*) tende a melhorar o desempenho das missões pretendidas, possibilitando um aumento do alcance das comunicações. Neste contexto, verificou-se que na literatura muitos estudos analisam desempenhos de rádios em aplicações específicas, em sua maioria com uso de topologia ponto a ponto (P2P) em apenas uma tecnologia de comunicação e apenas uma parcela dos trabalhos realizam exames comparativos práticos entre rádios. Com isso, não foi localizado na literatura pontos de análise experimental de performance entre os rádios ZigBee e LoRa dedicados às demandas de uma FANET. Para a análise de desempenho das tecnologias de rádio investigadas foi proposta uma verificação experimental, organizada em dois grupos: os testes de bancada (ou HIL, do inglês *hardware-in-the-loop*) onde foi analisado o consumo dos rádios em diferentes cenários de operação, seguidos de testes de taxa de transferência e entrega no envio de pacotes; e, experimentos em ambiente externo com interação humana (ou HITL, do inglês *human-in-the-loop*) com testes de transmissão síncrona e assíncrona em rede P2P, em simulações discretas de movimento em área urbana aberta. Na sequência, foram comparadas as taxas de envio, entrega e tempo gasto em envios assíncronos, em redes P2P versus *ad hoc* com multissaltos, também com simulações discretas de movimento. Como contribuição deste trabalho, pela análise dos resultados experimentais obtidos, foram elaborados comparativos de diferentes cenários para emprego das tecnologias XBee e LoRa em FANETs, visando a aplicação da tecnologia de comunicação adequada ao propósito de diferentes missões de uma rede aérea de sensores móveis.

Palavras-chave: VANT. FANET. Avaliação de desempenho. LoRa. ZigBee. Redes *ad hoc*.

ABSTRACT

In this dissertation, a comparative analysis of the long range and low consumption LoRa technology via the LoRa RD42C radio and ZigBee technology via the XBee-PRO S3B radio is performed. Both employing dynamic reactive routing protocols, with power and transmission rate comparable to that of an unmanned aerial vehicle (UAV). The use of UAVs in various fields is currently increasing exponentially, but the capacity of a single large aircraft is limited in some environments. A smaller UAV faces challenges in terms of flight autonomy, payload capacity, and communication range. Based on this premise, the use of flying ad hoc networks (FANET), tends to improve mission performance by enabling greater communication range. In this context, it was noted that many studies analyze the performance of radios in specific applications, mostly using point-to-point topology, in only one communication technology, and only a portion of these studies perform practical comparison studies between radios. No experimental performance analysis between ZigBee and LoRa radios for the requirements of a FANET was found in the literature studies. An experimental review was proposed for the performance analysis of the investigated radio technologies, which is divided into two groups: bench tests (or HIL, hardware-in-the-loop) where the consumption of the radios in different operating scenarios was analyzed, followed by tests of the transmission and delivery rates when sending packets; Ground-based experiments (or HITL, human-in-the-loop) with synchronous and asynchronous tests of the transmission and delivery rates in a P2P network in discrete simulations of movement in an open urban area. Then, the transmission and delivery rates and the time required for asynchronous transmission were compared with P2P versus ad hoc networks with multi-hops, also with discrete simulations of movement. As a contribution of this work, through the analysis of the experimental results obtained, comparisons of different scenarios for the use of XBee and LoRa technologies in FANETs have been elaborated with the aim of deploying the appropriate communication technology for the purpose of different missions of an aerial mobile sensor network.

Keywords: UAV. FANET. Performance evaluation. LoRa. ZigBee. Ad hoc networks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Publicações, por ano, na área de desempenho de redes VANT.	22
Figura 2 – Exemplo de uma rede <i>ad hoc</i> aérea.	25
Figura 3 – Classificação das redes <i>ad hoc</i> móveis.	27
Figura 4 – Arquiteturas das redes VANTs.	27
Figura 5 – Um exemplo de aplicação das FANETs.	28
Figura 6 – Técnicas de transmissão de sinal.	29
Figura 7 – Arquitetura da subcamada MAC.	31
Figura 8 – Protocolos de roteamento baseados em topologia para FANET.	32
Figura 9 – Protocolos de roteamento estáticos.	33
Figura 10 – Comparativo de tecnologias de comunicação sem fio.	35
Figura 11 – Topologias do padrão IEEE 802.15.4.	37
Figura 12 – Bandas, frequências e canais do padrão IEEE 802.15.4.	37
Figura 13 – Topologias de rede com ZigBee.	39
Figura 14 – Exemplo da arquitetura estrela, LoRa/LoRaWAN.	39
Figura 15 – Exemplo da arquitetura LoRa em <i>mesh</i>	40
Figura 16 – Modulação LoRa com preâmbulo, SFD e dados codificados.	41
Figura 17 – Exemplo de modulação LoRa.	42
Figura 18 – Estrutura do pacote LoRa.	44
Figura 19 – Exemplo de ToA.	45
Figura 20 – Estrutura da rede ZigBee e LoRaWAN.	48
Figura 21 – Arquiteturas ZigBee e LoRa empregadas.	49
Figura 22 – Confiabilidade em V2V e V2R de acordo com número de veículos.	50
Figura 23 – Estrutura da FANET.	53
Figura 24 – Arquitetura do sistema para coleta de dados de sensores drones com LoRaWAN.	53
Figura 25 – Estrutura da rede VANT.	55
Figura 26 – Estrutura da rede LoRa.	55
Figura 27 – Confiabilidade de rede VANT com LoRa, Wi-Fi e LTE.	57
Figura 28 – Rádio XBee-PRO S3B.	60
Figura 29 – Diagrama de blocos de configuração do XBee-PRO S3B.	61
Figura 30 – Modo de transmissão do rádio XBee-PRO S3B.	62
Figura 31 – Rádio LoRa RD42C.	63
Figura 32 – Diagrama esquemático do experimento HIL-01.	67
Figura 33 – Diagrama de ligação HIL-01 do XBee e LoRa.	68
Figura 34 – Diagrama esquemático do experimento HIL-02.	70
Figura 35 – Ambiente HITL-01.	72

Figura 36 – Conteúdo da <i>case</i> do rádio roteador XBee e LoRa.	72
Figura 37 – Diagrama esquemático para HITL-05.	74
Figura 38 – Ambiente HITL-05.	75
Figura 39 – Conteúdo da <i>case</i> dos rádios intermediários.	76
Figura 40 – Gráficos dos resultados comparativos HIL-01 entre XBee e LoRa, a 9600, 38400 e 57600 <i>bps</i>	78
Figura 41 – PDR x tempo entre envios - rádio XBee e LoRa.	79
Figura 42 – Gráficos dos resultados comparativos HIL-02 de taxa de transferência e PDR entre XBee e LoRa, a 9600, 38400 e 57600 <i>bps</i>	84
Figura 43 – Gráfico do resultado comparativo dos tempos médios de envio do HIL-02 entre XBee e LoRa, nas diferentes taxas de transmissão.	85
Figura 44 – Gráficos dos resultados comparativos HITL-01 de taxa de transferência e PDR entre XBee e LoRa, a 9600, 38400 e 57600 <i>bps</i>	88
Figura 45 – Gráficos dos resultados comparativos dos tempos gastos do HITL-01 entre XBee e LoRa, a 9600, 38400 e 57600 <i>bps</i>	89
Figura 46 – Gráficos dos resultados comparativos HITL-02 do XBee e LoRa, em modo síncrono e assíncrono, quanto a taxa de transferência, PDR e tempo.	94
Figura 47 – PDR do LoRa nos cenários HITL-03, em função dos intervalos entre envios.	97
Figura 48 – PDR do XBee e LoRa, em P2P, nos cenários do HITL-04.	98
Figura 49 – PDR do XBee, em P2P e <i>mesh</i> , nas distâncias do HITL-05.	100
Figura 50 – Tempo médio de envio e recepção do XBee em P2P e <i>mesh</i> , no HITL-05.	101
Figura 51 – PDR do LoRa, em P2P e <i>mesh</i> , nas distâncias do HITL-05.	102
Figura 52 – Tempo médio de envio e recepção do LoRa em P2P e <i>mesh</i> , no HITL-05.	104
Figura 53 – PDR do XBee e LoRa em 1250 <i>m</i> , P2P e <i>mesh</i> , no envio de pacotes de 120 e 232 <i>bytes</i>	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação da camada física do padrão IEEE 802.15.4.	37
Tabela 2 – Valores teóricos de taxa de bits LoRa, em função do BW, SF e CR. . .	44
Tabela 3 – Tabela comparativa dos trabalhos relacionados.	58
Tabela 4 – Comparativo dos rádios XBee-PRO S3B e LoRa RD42C.	65
Tabela 5 – Seleção dos parâmetros dos rádios XBee-PRO S3B e LoRa RD42C. . .	66
Tabela 6 – Descrição do conteúdo da <i>case</i> do rádio 1 (roteador).	71
Tabela 7 – Resumo dos experimentos e configurações, com os cenários analisados.	77
Tabela 8 – Desvio padrão das correntes dos rádios nas taxas de transmissão e cenários do HIL-01.	79
Tabela 9 – Comparativo de consumo do XBee na elevação de potência, em diferentes taxas de transmissão.	80
Tabela 10 – Comparativo percentual de consumo do XBee com a elevação da taxa de transmissão.	80
Tabela 11 – Comparativo de consumo do LoRa nas mudanças dos SFs e potências, em diferentes taxas de transmissão.	81
Tabela 12 – Comparativo percentual de consumo do LoRa com a elevação da taxa de transmissão.	82
Tabela 13 – Comparativo de consumo (mWh) entre XBee e LoRa nas taxas de transmissão.	82
Tabela 14 – Comparativo de correntes de recepção e transmissão do XBee e LoRa, descritas pelo fabricante e obtidas nos experimentos.	83
Tabela 15 – Comparativo das taxas, PDRs e tempos médios do LoRa, nas mudanças dos SFs, em diferentes taxas de transmissão.	85
Tabela 16 – Comparativo percentual de taxa de transferência, PDR e tempo do XBee e LoRa, com a elevação da taxa de transmissão.	86
Tabela 17 – Comparativo de vantagens médias percentuais entre LoRa e XBee, quanto a taxa, PDR e tempo, nas taxas de transmissão.	87
Tabela 18 – Comparativo percentual de taxa de transferência (<i>Kbps</i>) do XBee e LoRa, em diferentes taxas, potências e SFs, nas distâncias.	90
Tabela 19 – Comparativo percentual do PDR do XBee e LoRa, em diferentes taxas, potências e SFs, nas distâncias.	92
Tabela 20 – Comparativo percentual do XBee em modo assíncrono em relação ao síncrono, quanto aos parâmetros nas potências e distâncias.	95
Tabela 21 – Comparativo percentual do LoRa em modo assíncrono em relação ao síncrono, quanto aos parâmetros nas potências, SFs e distâncias.	95

Tabela 22 – Comparativo percentual entre LoRa e XBee no HITL-02, em modo assíncrono, na bancada e a 500 <i>m.</i>	96
Tabela 23 – Análise percentual do PDR LoRa, em virtude da latência no envio P2P assíncrono com SF7 e SF9, em 500 e 800 <i>m.</i>	98
Tabela 24 – Análise de PDR do XBee e LoRa, em modo assíncrono P2P para diferentes distâncias, SF e intervalos de envio.	99
Tabela 25 – Comparativo de performance do PDR do LoRa em relação ao XBee, em modo assíncrono P2P para diferentes distâncias, SF e intervalos de envio.	99
Tabela 26 – Performance PDR da rede XBee P2P e <i>mesh.</i>	100
Tabela 27 – Performance de PDR, entre as distâncias, da rede LoRa em P2P.	102
Tabela 28 – Performance de PDR da rede LoRa P2P e <i>mesh.</i>	103
Tabela 29 – Comparativo de desempenho do PDR LoRa com 120 <i>bytes</i> em relação a 232 <i>bytes</i> , em <i>mesh</i> , a 1250 <i>m.</i>	106
Tabela 30 – Comparativo de desempenho de PDR LoRa em relação ao XBee, nos cenários em rede <i>mesh</i> e com diferentes <i>payloads.</i>	107
Tabela 31 – Sugestão de emprego das tecnologias XBee S3B e LoRa RD42C em cenários e missões de tempo real ou em uso de forma secundária, em P2P e <i>mesh.</i>	109
Tabela 32 – Recomendações de uso do XBee-PRO S3B e LoRa RD42C, com diferentes propósitos de FANET, baseados neste estudo.	109
Tabela 33 – Tempos gastos (em segundos) para cada taxa de transmissão e cenários.	119
Tabela 34 – Comparativo de consumo do XBee em diferentes potências, a 9600 <i>bps.</i>	120
Tabela 35 – Comparativo de consumo do LoRa em diferentes potências e SFs, a 9600 <i>bps.</i>	120
Tabela 36 – Comparativo percentual de consumo entre XBee e LoRa, em 9600 <i>bps.</i>	121
Tabela 37 – Comparativo de consumo do XBee em diferentes potências, a 38400 <i>bps.</i>	122
Tabela 38 – Comparativo percentual de consumo do XBee com a elevação da taxa de 9600 para 38400 <i>bps.</i>	122
Tabela 39 – Comparativo de consumo do LoRa em diferentes potências e SFs, a 38400 <i>bps.</i>	123
Tabela 40 – Comparativo do percentual de consumo do LoRa com a elevação da taxa de 9600 para 38400 <i>bps.</i>	123
Tabela 41 – Comparativo do percentual de consumo entre XBee e LoRa, em 38400 <i>bps.</i>	124
Tabela 42 – Comparativo de consumo do XBee em diferentes potências, a 57600 <i>bps.</i>	125
Tabela 43 – Comparativo do percentual de consumo do XBee com a elevação da taxa de 38400 para 57600 <i>bps.</i>	125
Tabela 44 – Comparativo de consumo do LoRa em diferentes potências e SFs, a 57600 <i>bps.</i>	126

Tabela 45 – Comparativo do percentual de consumo do LoRa com a elevação da taxa de 38400 para 57600 <i>bps</i>	127
Tabela 46 – Comparativo do percentual de consumo entre XBee e LoRa, em 57600 <i>bps</i>	127
Tabela 47 – Comparativo das taxas, PDRs e tempos médios do XBee, em diferentes potências e taxas de transmissão	128
Tabela 48 – Comparativo das taxas, PDRs e tempos médios do LoRa, em diferentes potências e SFs, a 9600 <i>bps</i>	128
Tabela 49 – Comparativo de vantagens médias percentuais entre LoRa e XBee, quanto a taxa, PDR e tempo, em 9600 <i>bps</i>	129
Tabela 50 – Comparativo das taxas, PDRs e tempos médios do LoRa, em diferentes potências e SFs, a 38400 <i>bps</i>	129
Tabela 51 – Comparativo do percentual de taxa de transferência, PDR e tempo entre XBee e LoRa, com a elevação da taxa de 9600 para 38400 <i>bps</i>	130
Tabela 52 – Comparativo de vantagens médias percentuais entre LoRa e XBee, quanto a taxa, PDR e tempo, em 38400 <i>bps</i>	130
Tabela 53 – Comparativo das taxas, PDRs e tempos médios do LoRa, em diferentes potências e SFs, a 57600 <i>bps</i>	131
Tabela 54 – Comparativo do percentual de taxa de transferência, PDR e tempo do XBee e LoRa, com a elevação da taxa de 38400 para 57600 <i>bps</i>	131
Tabela 55 – Comparativo de vantagens médias percentuais entre LoRa e XBee, quanto a taxa, PDR e tempo, em 57600 <i>bps</i>	132
Tabela 56 – Comparativo de taxa de transferência e vantagens percentuais do XBee e LoRa, em diferentes potências nas distâncias, a 9600 <i>bps</i>	133
Tabela 57 – Comparativo de PDR e vantagens percentuais do XBee e LoRa, em diferentes potências nas distâncias, a 9600 <i>bps</i>	134
Tabela 58 – Comparativo de taxa de transferência e vantagens percentuais do XBee e LoRa, em diferentes potências nas distâncias, a 38400 <i>bps</i>	134
Tabela 59 – Comparativo de PDR e vantagens percentuais do XBee e LoRa, em diferentes potências nas distâncias, a 38400 <i>bps</i>	134
Tabela 60 – Comparativo de taxa de transferência e vantagens percentuais do XBee e LoRa, em diferentes potências nas distâncias, a 57600 <i>bps</i>	135
Tabela 61 – Comparativo de PDR e vantagens percentuais do XBee e LoRa, em diferentes potências nas distâncias, a 57600 <i>bps</i>	135
Tabela 62 – Tempo gasto (em segundos) pelo XBee e LoRa, em diferentes taxas, potências e SFs, nas distâncias do HITL-01.	136
Tabela 63 – Resultados e comparativos percentuais do XBee em modo assíncrono em relação ao síncrono, quanto aos parâmetros nas potências e distâncias.	137

Tabela 64 – Resultados e comparativo percentual do LoRa em modo assíncrono em relação ao síncrono, quanto aos parâmetros nas potências, SFs e distâncias.	137
Tabela 65 – Comparativo percentual entre LoRa e XBee no HITL-02, em modo assíncrono, na bancada e a 500 m.	138
Tabela 66 – Performance PDR, nas distâncias, da rede XBee <i>mesh</i> em relação à P2P.	138
Tabela 67 – Performance de PDR, nas distâncias, da rede XBee <i>mesh</i> entre os saltos.	139
Tabela 68 – Taxas de envio XBee (em <i>Kbps</i>) para cada cenário P2P e <i>mesh</i> , em 21 <i>dBm</i>	139
Tabela 69 – Performance de PDR, entre as distâncias, da rede LoRa em P2P.	139
Tabela 70 – Performance de PDR, nas distâncias, da rede LoRa <i>mesh</i> em relação à P2P.	140
Tabela 71 – Performance de PDR, nas distâncias, da rede LoRa <i>mesh</i> entre os saltos.	140
Tabela 72 – Taxas de envio LoRa (em <i>Kbps</i>) para cada cenário P2P e <i>mesh</i> , em 20 <i>dBm</i>	140
Tabela 73 – Comparativo de desempenho do PDR LoRa com 120 <i>bytes</i> em relação a 232 <i>bytes</i> , em <i>mesh</i> , a 1250 m.	141
Tabela 74 – Comparativo de desempenho de PDR LoRa em relação ao XBee, nos cenários de distâncias em rede <i>mesh</i>	141
Tabela 75 – Comparativo de desempenho de PDR LoRa em relação ao XBee, em P2P e <i>mesh</i> , com pacotes de 120 <i>bytes</i>	142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	<i>Application Programming Interface</i>
AODV	<i>Ad-hoc On-demand Distance Vector</i>
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
ACK	<i>Acknowledgement</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CH	<i>Cluster Head</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CR	<i>Coding Rate</i>
DSDV	<i>Destination Sequenced Distance Vector</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
ECS	Estação de Controle em Solo
FANET	<i>Flying Ad hoc Network</i>
FHSS	<i>Frequency-Hopping Spread Spectrum</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
HITL	<i>human-in-the-loop</i>
HIL	<i>hardware-in-the-loop</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MANET	<i>Mobile Ad hoc Network</i>

PL	<i>Power Level</i>
P2P	<i>Peer-to-Peer</i>
PDR	<i>Packet Delivery Ratio</i>
RF	Rádio Frequência
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
RSU	<i>Road Side Units</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
ToA	<i>Time on Air</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
VANET	<i>Vehicle Ad hoc Networks</i>
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i>
V2I	<i>Vehicle-to-Infrastructure</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	21
1.2	CONTRIBUIÇÕES	21
1.3	JUSTIFICATIVA	22
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	REDES <i>AD HOC</i> MÓVEIS	24
2.1.1	REDES <i>AD HOC</i> VEICULARES	25
2.1.2	REDES <i>AD HOC</i> AÉREAS	26
2.2	ESTRUTURA BÁSICA DE UMA REDE <i>AD HOC</i> MÓVEL	29
2.2.1	CAMADA FÍSICA	29
2.2.2	CAMADA DE ENLACE	30
2.2.3	CAMADA DE REDE	31
2.3	TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO PARA FANET	35
2.3.1	TECNOLOGIA ZIGBEE	36
2.3.2	TECNOLOGIA LORA	39
2.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	46
3	REVISÃO DA LITERATURA	47
3.1	TRABALHOS ASSOCIADOS A REDES FIXAS	47
3.2	TRABALHOS ASSOCIADOS A REDES VEICULARES	49
3.3	TRABALHOS ASSOCIADOS A REDES AÉREAS	52
3.4	COMPARATIVO DE TRABALHOS RELACIONADOS	57
3.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	57
4	MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE COMUNICAÇÃO PARA FANET	59
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	59
4.2	MÉTODO PROPOSTO DE AVALIAÇÃO	60
4.2.1	MÓDULO RF XBEE-PRO S3B	60
4.2.2	MÓDULO RF LORA RD42C	63
4.2.3	SÍNTESE DAS TECNOLOGIAS E CONSIDERAÇÕES	64
4.3	PROCESSO EXPERIMENTAL	65
4.3.1	EXPERIMENTOS <i>HARDWARE-IN-THE-LOOP</i>	67
4.3.2	EXPERIMENTOS <i>HUMAN-IN-THE-LOOP</i>	71
4.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	76

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
5.1	RESUMO DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS	77
5.2	RESULTADO DOS EXPERIMENTOS <i>HARDWARE-IN-THE-LOOP</i>	77
5.2.1	HIL-01 - ANÁLISE ENERGÉTICA EM BANCADA	78
5.2.2	HIL-02 - ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA EM BANCADA	83
5.3	RESULTADO DOS EXPERIMENTOS <i>HUMAN-IN-THE-LOOP</i>	87
5.3.1	HITL-01 - ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA	87
5.3.2	HITL-02 - ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA ASSÍNCRONA	93
5.3.3	HITL-03 - ANÁLISE DA LATÊNCIA E PDR ASSÍNCRONOS NO LORA	96
5.3.4	HITL-04 - ANÁLISE DE PDR ASSÍNCRONO	98
5.3.5	HITL-05 - ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA ASSÍNCRONA P2P E <i>MESH</i>	99
5.4	SUGESTÕES DE EMPREGOS DOS RÁDIOS EM FANETS	108
5.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	108
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
6.1	CONCLUSÃO	110
6.2	TRABALHOS FUTUROS	111
	REFERÊNCIAS	113
	APÊNDICE A – DADOS DOS EXPERIMENTOS HIL	119
	APÊNDICE B – DADOS DOS EXPERIMENTOS HITL	133

1 INTRODUÇÃO

Uma rede ou sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (SARP) é composta pela ARP (aeronave remotamente pilotada) e também pela infraestrutura necessária para sua operação em solo. Na presente dissertação, usaremos o termo Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) para englobar os conceitos supracitados, já que são veículos aéreos que possuem sistema embarcado e que podem voar de forma autônoma e independente ou podem ser controlados remotamente por um humano.

Os constantes crescimentos tecnológicos nas áreas de eletrônicos, computação, redução de custos e a miniaturização de equipamentos têm estimulado cada vez mais os avanços nos VANTs e esses têm sido amplamente utilizados nos ramos de entretenimento, militares, comerciais e não comerciais de diferentes interesses. São empregados em vigilância, avaliação de desastres, proteção ambiental, agricultura de precisão e uso em Internet das coisas (ou IoT, do inglês *Internet of Things*), onde esse último utiliza bastante o conceito de redes de sensores sem fio (RSSF, do inglês *wireless sensor network*, ou WSN).

Os VANTs auxiliam no alcance de áreas de difícil acesso, muitas vezes, devido à falta de infraestrutura física, podendo se aproximar de áreas perigosas para coletar informações sem se preocupar com o perigo. Além disso, os VANTs dificilmente precisam de espaço para decolar e assim, conforme (1), diferentemente de aviões e helicópteros, os VANTs têm um baixíssimo custo e podem observar áreas de risco e, também, auxiliar nas operações de resgate e prevenir desastres secundários graças às imagens aéreas. Inicialmente as unidades de VANT eram usadas independentemente; hoje em dia, porém, várias aeronaves sincronizadas costumam realizar operações críticas (2).

As redes VANTs e mais especificamente as redes *ad hoc* aéreas (ou FANET, do inglês *flying ad hoc network*), que são redes onde os VANTs simplesmente transmitem diretamente uns para os outros, aumentam o alcance da comunicação e a taxa de entrega de pacotes (ou PDR, do inglês *packet delivery ratio*) sem a necessidade de instalar *gateways* adicionais, em contrapartida a uma única aeronave que tem esse recurso minimizado devido à sua limitação da carga útil. A rede *ad hoc* ou rede em malha (do inglês *mesh*) é uma solução para negociação de longo alcance com múltiplos saltos e pode reduzir o número de nós que podem ser atendidos em um determinado período de tempo (3). Com isso, FANET é uma área de pesquisa bastante promissora para comunicações sem fio, onde sua escalabilidade é geralmente mais simples, já que novos VANTs entram e saem da rede em tempo de execução e assim também oferecem maior capacidade de sobrevivência da rede, uma vez que não dependem de uma única aeronave.

Segundo (4), um pequeno VANT, típico de uma FANET, é composto por um

conjunto de sistemas microeletromecânicos, incluindo fuselagens mais acessíveis, baterias de baixa capacidade, microdispositivos de rádio com alcance limitado, microprocessadores e têm capacidade de peso e carga útil limitada. Essas suas restrições podem ser um problema para missões complexas, afetando a capacidade computacional, energética e de rádio de comunicação, que são os fatores-chaves ao sucesso ou não da missão.

De acordo com (4), vários problemas e desafios precisam ser resolvidos antes da implantação de redes FANET para diversas aplicações. As redes VANT variam das tradicionais redes móveis *ad hoc* (ou MANET, do inglês *mobile ad hoc network*) e redes *ad hoc* veiculares (ou VANET, do inglês *vehicle ad hoc networks*), mas a ideia básica é a mesma: a rede de nós móveis de maneira *ad hoc*. Porém existem muitas questões não resolvidas que precisam ser abordadas em diferentes eixos como a comunicação, segurança e modelos de mobilidade.

A escolha do rádio é uma questão crítica e como a comunicação em FANET é orientada para a missão, a seleção da tecnologia sem fio adequada, o protocolo de método de acesso ao meio (ou MAC, do inglês *media access control*) apropriado e os protocolos de roteamento eficientes dependem principalmente da natureza da aplicação, mas também do tamanho da área e da densidade dos VANTs. Dentro dessa vertente, um dos desafios envolvidos no estabelecimento de FANETs está à demanda por comunicações sem fio confiáveis e robustas que enviem e recebam mensagens com menor risco de perda, capazes de sobreviver a imprevistos, como interferências e comunicações fora de alcance. Para (5) e (6), o uso eficiente dos recursos de comunicação é um aspecto essencial e chave nas redes de VANT, e com isso, se torna um fator importante que deve ser considerado para o funcionamento correto de uma FANET. Nesse contexto, a capacidade de sobrevivência e a confiabilidade das comunicações sem fio são importantes desafios de pesquisa para garantir a qualidade da comunicação entre nós que se movem dinamicamente. Segundo (2), pode-se utilizar diferentes canais sem fio e protocolos de rede nessa comunicação e essas circunstâncias dependem da aplicação desejada.

Não há como se definir um cenário comum de simulação baseado em cada tipo de emprego de uma FANET de forma a se fazer testes dessas estruturas de comunicações e seus objetivos. Sendo assim, com base nas especificações de cada tecnologia de comunicação, esta dissertação visa realizar um estudo genérico sobre desempenho de redes que aproxime-se do ambiente FANET multimissão, considerando como requisitos de performance: a taxa de transferência, taxa de entrega das mensagens, o consumo dos rádios e o alcance. Investigando tecnologias de rádio sem fio, quais se comportam mais adequadamente e onde poderão ser empregadas com melhor qualidade na missão, também analisando qual rádio, com seu protocolo de roteamento nativo, permite menor consumo nos VANTs. Sendo assim, ao final, vislumbra-se contribuir para o problema decisório sobre qual tecnologia de comunicação de melhor desempenho para aplicações multimissão de FANET.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar que a utilização de tecnologia de rádio sem fio, em cenários reais de seus empregos, em uma arquitetura de redes VANTs multi-salto, podem gerar melhor qualidade e eficiência na missão pretendida. A verificação do comportamento dos rádios tem com o intuito de selecionar qual enlace de comunicação tem o melhor desempenho em uma missão genérica, dinâmica e adaptativa. Em síntese, para se atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- (a) Analisar o estado da arte dos rádios LoRa e ZigBee, expondo particularidades de suas características e funcionamento;
- (b) Devido a bateria ser um recurso crítico em FANET, primordial para sua autonomia, objetiva-se projetar uma arquitetura e desenvolver experimentos práticos comparativos entre os rádios LoRa e ZigBee em bancada, para avaliar quais rádios geram menores impactos no consumo energético em diferentes cenários de operação;
- (c) Conceber uma estrutura e realizar experimentos práticos de bancada para avaliar quais rádios terão uma melhor performance em relação a taxa de transferência, taxa de entrega de dados e tempo; e
- (d) Desenvolver experimentos práticos em ambiente urbano aberto, em simulações discretas de movimentos em distâncias, buscando aproximar-se da etapa de uma possível FANET, para avaliar quais rádios terão uma melhor performance em relação ao alcance, taxa de transferência e taxa de entrega de dados e consequentemente uma eficiência na missão escolhida.

1.2 Contribuições

As contribuições para este trabalho envolvem em primeiro lugar definir qual rádio, de menor consumo, para utilização em uma FANET e como segunda contribuição, determinar qual rádio é mais adequado para emprego em uma rede FANET multimissão, com base no seu desempenho em experimentos práticos de alcance e taxa de transferência em cenários que assemelham-se às redes *mesh* com VANTs.

Como contribuição científica e técnica busca-se subsidiar, através de resultados experimentais práticos com simulações de movimentos próximos ao de uma FANET, um problema decisório sobre qual tecnologia de comunicação se mostrou mais favorável, de acordo com desempenho, para aplicações diversificadas atribuídas a essas redes *ad hoc* aéreas.

1.3 Justificativa

As vantagens das redes VANT variam, principalmente, quanto ao custo de aquisição e manutenção de pequenos VANTs, que é muito menor do que o custo de um grande VANT (7). Múltiplas aeronaves aumentam, também, a escalabilidade, pois podem estender a amplitude da região da operação facilmente. Além disso, se uma missão for composta de apenas um drone e esse falhar, a operação não poderá prosseguir. Já com multi-VANTs, a operação pode sobreviver com as outras aeronaves.

O interesse de pesquisas na área de desempenho de redes VANT tem apresentado um expressivo crescimento ao longo dos últimos anos. O resultado está expresso no gráfico exposto na Figura 1, filtrando um intervalo recente de 2016 a 2020, tendo como base a plataforma Scopus da Elsevier. Assim, é possível observar e quantificar o interesse de pesquisas em temas relacionados a essa área publicadas em veículos como o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e *Sensors*.

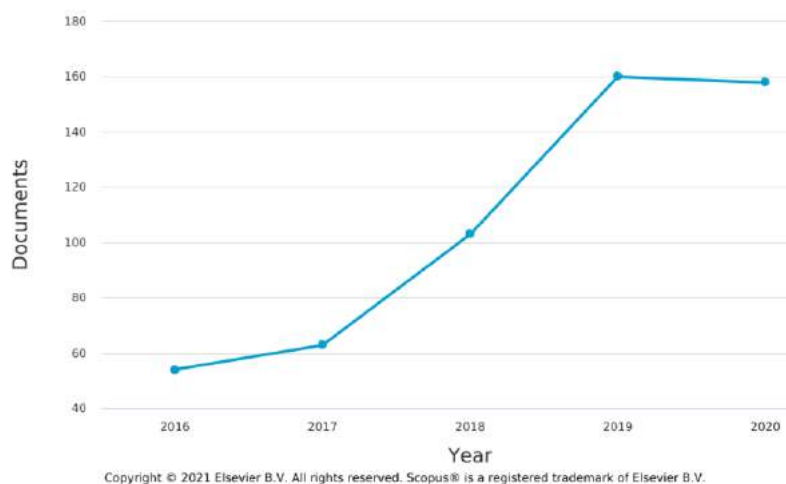


Figura 1 – Publicações, por ano, na área de desempenho de redes VANT.

Este trabalho escolheu as tecnologias ZigBee e LoRa por serem similares quanto à taxa de dados e seu alcance, como será visto no Capítulo 2. Além disso, são amplamente utilizadas em redes VANT de diferentes tipos de missão, conforme trabalhos pesquisados, e salienta-se, também, o fato do LoRa ser um rádio de tecnologia mais recente no mercado e muito utilizado em IoT, tendo como ponto chave seu baixo consumo e grande alcance.

Conforme enfatizado em (8), os rádios escolhidos para análise nesta dissertação são os mais populares em VANTs e se enquadram em tecnologias de médio para baixo custo financeiro geral para toda a infraestrutura e equipamentos necessários, sem dependência de empresas detentoras como no caso de redes e antenas das tecnologias de celular.

1.4 Organização da Dissertação

A dissertação está estruturada de modo a fornecer os conceitos necessários ao entendimento da avaliação de desempenho das tecnologias de rádios em cenários de empregos similares as redes FANET. Para isso, além desta introdução, o Capítulo 2 complementa abrangendo fundamentos teóricos com conceitos básicos de redes de sensores sem fio e tecnologias de comunicação LoRa e ZigBee.

Em complemento à parte introdutória, o Capítulo 3 apresenta uma revisão de literatura expondo os trabalhos mais relevantes em redes fixas, veiculares e aéreas, relacionados a esta dissertação. Já no desenvolvimento do trabalho, o Capítulo 4 apresenta a caracterização do problema, expondo a análise comparativa proposta, as características dos rádios utilizados e detalhes dos experimentos, recursos estruturais e processos adotados nas avaliações desses rádios.

O Capítulo 5 apresenta os resultados dos experimentos realizados, suas considerações e as contribuições deste trabalho. Por fim, o Capítulo 6 destaca e salienta as conclusões do estudo e as sugestões para trabalhos futuros, vislumbrando melhorias e a continuidade da pesquisa em questão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados os principais referenciais teóricos necessários para a análise de desempenho das tecnologias de comunicação de redes de dispositivos móveis, conforme proposta na presente dissertação.

2.1 Redes *Ad Hoc* Móveis

Segundo (9), os nós de um rede sem fio podem estar associados a uma estação-base central, operando em modo de infraestrutura, onde esta estação fornece, por exemplo, atribuição de endereços e roteamento, por outro lado as redes *ad hoc*, os nós não dispõem de infraestrutura e desta forma eles próprios realizam serviços de roteamento, atribuição de endereço e outros. Essa rede de nós móveis é tradicionalmente conhecida como redes móveis *ad hoc* (ou MANET, do inglês *mobile ad hoc network*). Conforme (10), as redes *ad hoc* são diferentes das redes fisicamente conectadas, pois os conceitos de topologias fixas, localização e vizinhos fixos, já conhecidos, são abandonados. Os roteadores mudam suas posições de um momento para outro, assim podem alterar a topologia e os caminhos podem ser modificados de modo espontâneo constantemente.

Uma rede *ad hoc*, diferentemente de uma rede com topologia estrela, permite que qualquer nó da rede transmita ou retransmita para qualquer outro nó que esteja dentro de seu alcance de transmissão de rádio, conforme apresentado na Figura 2. Se algum nó enviar uma mensagem a outro que esteja fora do alcance das comunicações de rádio, ele usa um ou mais nós intermediários, que se tornam elos, chamados de roteadores, para encaminhar a mensagem. Com isso, há a vantagem de redundância e escalabilidade e, em caso de falha de um nó da rede, qualquer nó remoto ainda pode se comunicar com qualquer outro em sua faixa, de modo que a mensagem possa alcançar o nó destino.

As MANETs possuem dentre os tipos existentes um tipo especial chamado de redes de sensores sem fio (RSSF, do inglês *wireless sensor network*, ou WSN) que são um subconjunto das redes *ad hoc* multissalto, que não requerem qualquer infraestrutura central para encaminhamento dos dados, como a estação central das redes com uso de topologia estrela de comunicação convencional. De acordo com (11), as RSSF têm papel importante na computação ubíqua e são formadas por um grande número de dispositivos autônomos chamados de nós sensores, que têm como objetivo principal monitorar o ambiente, normalmente, sem intervenção humana direta.

Diferente das tradicionais redes MANET, onde os dispositivos movimentam-se de forma aleatória, nas RSSF os dispositivos são destinados às aplicações comerciais e

industriais para medir e eventualmente controlar um ambiente. Segundo (12), as diferenças básicas entre RSSF e as MANET são: o número de nós que pode ter ordens de magnitude elevada; a capacidade limitada de processamento e energia; os nós sensores RSSF são mais propensos às falhas; a capacidade de implantar um grande número de nós minúsculos que podem se montar e reconfigurar; e todos os sensores estão de modo geral muito densamente colocados.

2.1.1 Redes *Ad Hoc* Veiculares

Conforme (13), as redes *ad hoc* veiculares (ou VANET, do inglês *vehicle ad hoc networks*) são consideradas como uma forma especializada de MANET, que consistem em uma série de veículos que trafegam nas vias urbanas, capazes de se comunicar entre si sem infraestrutura fixa. Cada nó ou veículo é equipado com um dispositivo VANET para formar uma rede *ad hoc* de comunicação entre eles e, também, interagindo com unidades laterais à pista (placas, sinais, etc), formando um sistema de transporte inteligente, capaz de trocar informações acerca do tráfego e das condições da estrada. De acordo com (14), a VANET objetiva entre outros benefícios trazer melhorias à segurança rodoviária, mais comodidade aos viajantes dos veículos e disseminar informações de tráfego em tempo real.

Ao contrário das MANETs, que movimentam-se de forma aleatória, nas VANETs há uma melhor previsão do posicionamento dos nós na rede, uma vez que veículos devem seguir em ruas, avenidas e rodovias. Salienta-se, também, que ao contrário dos sensores de uma RSSF, devido a maior capacidade das baterias embarcadas nos veículos, a energia não é um fator crítico para a comunicação. Segundo (15), de forma similar às MANETs, os principais problemas enfrentados em VANET estão relacionados ao roteamento, em função do dinamismo dos nós *ad hoc* móveis.

A arquitetura VANET pode ser dividida em três categorias: i) redes locais sem fio (ou WLAN, do inglês *wireless local area network*): quando há comunicação entre os veículos

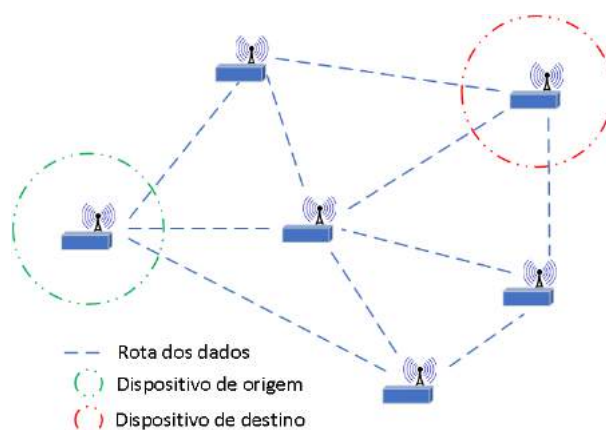


Figura 2 – Exemplo de uma rede *ad hoc* aérea.

e um *gateway* de celular, ponto de acesso ou WLAN; ii) *ad hoc*: somente comunicação entre veículos, sem depender de nenhuma infraestrutura; e iii) híbrida: permite se comunicar com essas infraestruturas de *gateways* ou também podem se comunicar diretamente entre si. Segundo (16), a arquitetura VANET fornece comunicação sem fio entre veículos em movimento usando uma comunicação de curta distância dedicada (ou DSRC, do inglês *dedicated short-range communications*), baseado no padrão IEEE 802.11a. Contudo, em virtude de diversos desafios como o alto tráfego de veículos e a variação de distância na comunicação entre nós, esse padrão foi migrado para operação de baixa sobrecarga chamado de IEEE 802.11p, conhecido como padrão de acesso sem fio em ambientes veiculares (ou WAVE, do inglês *wireless access to vehicular environment*), tendo como objetivo padronizar as comunicações veiculares.

Conforme (17), o veículo pode se comunicar: com outros veículos (ou V2V, do inglês *Vehicle-to-Vehicle*) e com unidades ao lado da estrada (ou RSU, do inglês *road side units*) chamada de comunicação veículo para estrada ou comunicação de veículo para infraestrutura (ou V2I, do inglês *Vehicle-to-Infrastructure*). Os autores em (18) expõem a comunicação entre RSU, chamada de comunicação entre estradas ou infraestrutura para infraestrutura (ou I2I, do inglês *infrastructure to infrastructure*).

2.1.2 Redes Ad Hoc Aéreas

Os VANTs e seu emprego em redes *ad hoc* aéreas (ou FANET, do inglês *flying ad hoc network*), auxiliam no alcance de áreas de difícil acesso, muitas vezes devido à falta de infraestrutura física, podendo se aproximar de áreas perigosas para coletar informações. Inicialmente as aeronaves eram usadas independentemente; atualmente tem crescido a aplicação de multi-VANTS sincronizados no suporte às operações em ambientes críticos (2). As vantagens destes sistemas variam, principalmente, quanto ao custo de aquisição e manutenção de pequenos VANTs que são significativamente menores do que o custo de um VANT de grande porte (7). Os multi-VANTs aumentam, também, a escalabilidade, pois podem estender a amplitude da região da operação; além disso, se um drone falhar a operação pode sobreviver com os outros VANTs. Em (13), os autores deixam claro que a capacidade de um único VANT é limitada e introduzem o conceito FANET, que pode ser considerada como uma forma especializada de MANET e VANET, conforme Figura 3.

A arquitetura de comunicação entre os VANTs pode ocorrer de diversas formas e identifica como será a troca de informações entre a estação base e os VANTs ou entre os VANTs. Segundo (19), as arquiteturas de comunicação são divididas em quatro tipos, conforme Figura 4, onde a infraestrutura requerida se limita a estação de controle em solo (ECS) apenas na Figura 4(a); na Figura 4(b) a infraestrutura de comunicação é baseada em satélites orbitais, e na Figura 4(c) a infraestrutura em solo está distribuída em antenas fixas. Na Figura 4(d), os VANTs podem trocar informações uns com os outros e desta

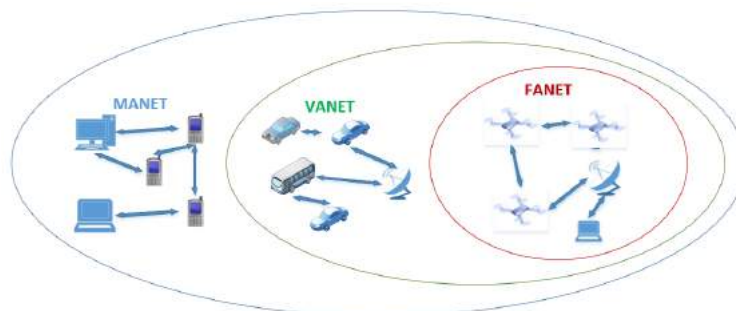


Figura 3 – Classificação das redes *ad hoc* móveis.

forma, caso a ECS perca o contato e alcance de um VANT as outras aeronaves mais próximas da ECS podem ser utilizadas como link, de modo a manter a conectividade da rede para garantia da entrega dos dados sensoriados à estação em solo, liberando a restrição que os VANTS devem manter um link direto com a ECS.

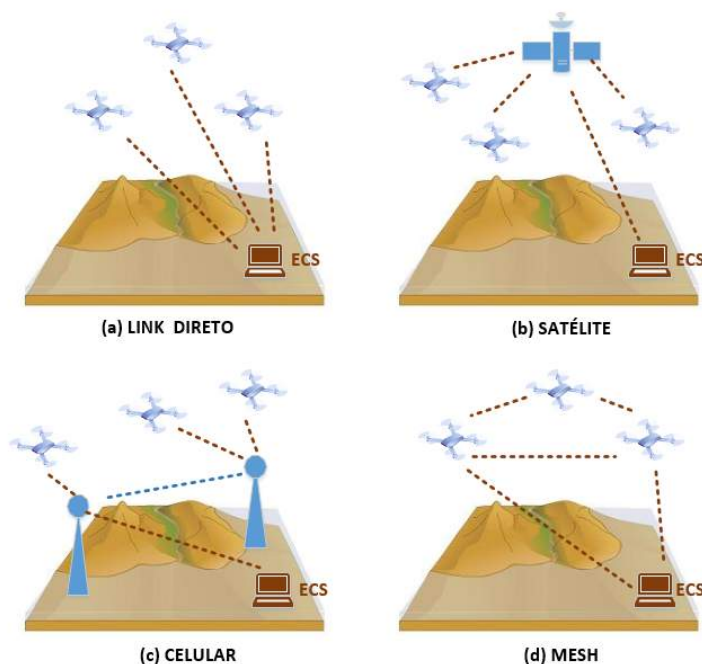


Figura 4 – Arquiteturas das redes VANTS.

Na configuração exposta na Figura 4(a), a comunicação é feita de forma dedicada entre a ECS e cada um dos VANTS, permitindo uma entrega mais confiável e com baixa latência. De acordo com (20), essa disposição possui desvantagem em cenários dinâmicos, devido ao fato da presença de elementos no ambiente, tais como árvores, modificações no terreno, que acarretam interferência do sinal de comunicação entre ECS e o VANT, não sendo essa considerada uma forma de comunicação de uma FANET.

Na configuração exposta na Figura 4(b), o roteamento dos dados da rede VANT ocorre por meio de um sistema centralizado, baseado em uma infraestrutura de comunicação por satélites. Uma desvantagem dessa abordagem é a limitação da banda de transmissão

oferecida pelos satélites com consequente aumento da latência na comunicação. A opção na Figura 4(c) usa redes de telefonia móvel celular e antenas espalhadas para comunicação, melhora a cobertura, redundância e produz vantagens na entrega de dados, porém as antenas de empresas de celular tem um custo alto quanto a sua utilização.

Na Figura 4(d) é apresentada a arquitetura geral das FANETs, na qual a comunicação é descentralizada e o enlace dos VANTs até a ECS pode passar por outras aeronaves. Um exemplo de implementação dessa arquitetura pode ser visto nas seções 3.3 e 4.3.2 desta dissertação. Segundo (4), FANET é um grupo de VANTs que se comunica entre si sem a necessidade de ponto de acesso, porém pelo menos um deles deve estar conectado a ECS. Essa opção tem baixo custo, é dinâmica e sua arquitetura em *mesh* facilita abrangências de grandes áreas, principalmente locais com muitos obstáculos, conforme a Figura 5.

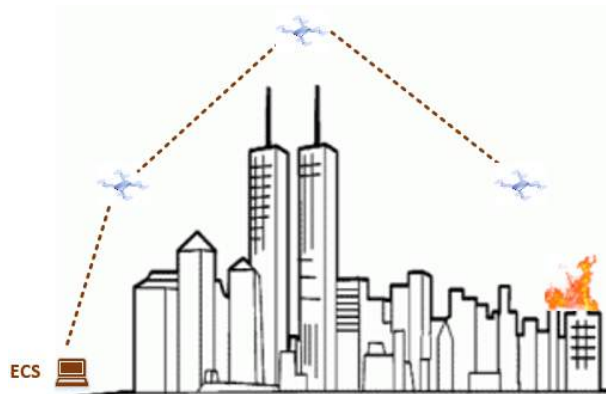


Figura 5 – Um exemplo de aplicação das FANETs.

As FANETs, apesar de serem um subconjunto de MANET/VANET, dispõem de mais desafios atrelados à sua dinâmica complexa, seu alto grau de mobilidade em 3D e a conectividade de rede intermitente. Algumas particularidades são: (i) a mobilidade - comportamento relativo à velocidade e direção de locomoção dos VANTs; (ii) a topologia variável - a topologia atualiza-se muito em função da mobilidade, distância, falhas do link ou inclusão de novas aeronaves à missão; (iii) a latência - o atraso pode variar de acordo com a tecnologia de comunicação empregada, o protocolo de roteamento em uso, o alcance previsto e as antenas utilizadas; e, (iv) o roteamento - com robustez em ter múltiplos caminhos de envio da informação ao destino somados a eficiência na escolha do melhor caminho. Segundo (21), os protocolos de roteamento são categorizados e baseados em:

- **TOPOLOGIAS:** as informações de roteamento do remetente ao destino devem ser obtidas de acordo com as informações topológicas dos nós da rede antes do início da transmissão dos dados. O protocolo de comunicação explora informações de link para rotear os pacotes, sendo capaz de atualizar a tabela de roteamento dinamicamente;
- **GEOGRÁFICOS:** encaminham pacotes usando a posição geográfica dos VANTs, assim usam informações de localização de nós para tomar a decisão de encaminhamento;

- HÍBRIDOS: combinação de roteamento baseado em topologia e geográfico; e
- BIOINSPIRADOS: são inspirados nos fenômenos naturais, por exemplo, de colônias de formigas e abelhas e podem ser categorizados em esquemas de roteamento baseados em topologia com roteamento reativo. Contudo, esses roteamentos usam paradigmas diferentes para construir as métricas de roteamento, com isso, segundo (21), os fazem ser classificados como uma classe distinta.

2.2 Estrutura Básica de uma Rede *Ad Hoc* Móvel

A comunicação básica de uma rede *ad hoc* está ligada às camadas física, de enlace e rede do modelo OSI (do inglês *open systems interconnection*), que descreve toda interconexão de sistemas abertos à comunicação com outros sistemas (10). A seguir, serão descritos alguns detalhes atinentes à comunicação, nessas camadas, em rede *ad hoc* móvel.

2.2.1 Camada Física

Segundo (22), a camada física é responsável por gerenciar o meio no qual as transmissões serão feitas em uma rede *ad hoc*, onde pode-se citar fatores como: a faixa de frequência em que a tecnologia sem fio opera; suas bandas, que definem a largura utilizada na faixa de frequência; a potência do sinal, que define a energia necessária para transmitir a mensagem; a modulação que, segundo (23), é uma técnica responsável por mapear vários bits de informação em símbolos fazendo as formas de ondas para transferência de dados.

Outro ponto importante, de acordo com (25), são as técnicas de transmissão, que podem ser divididas em banda estreita, que usam alta potência do sinal e um espectro de frequência suficiente para carregar o sinal de dados, conforme Figura 6(a), e o espalhamento de espectro, conforme Figura 6(b), que consiste em espalhar um sinal a ser transmitido em uma faixa de frequência mais larga em relação ao que seria necessário e com menor

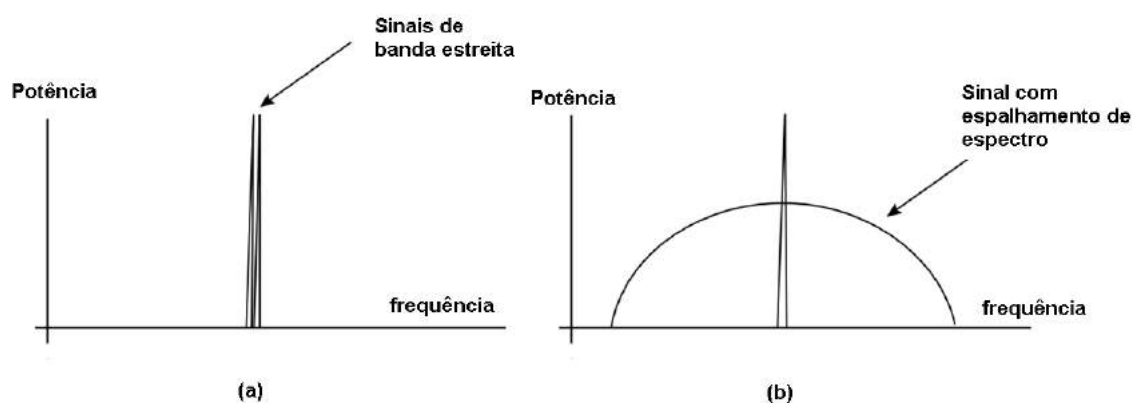


Figura 6 – Técnicas de transmissão: (a) sinal em banda estreita; (b) sinal com espalhamento de espectro. Adaptado de (24).

potência. De acordo com (26), o espalhamento pode ser uma solução para segurança e comunicação confiável, sendo subdividido, por exemplo, em: (a) espalhamento de sequência direta (ou DSSS, do inglês *direct sequence spread spectrum*), onde o espalhamento é obtido multiplicando a fonte por um código de propagação pseudoaleatório, e os dados são espalhados com uma sequência; (b) espalhamento por salto de frequência (ou FHSS, do inglês *frequency hopping spread spectrum*), onde o espalhamento é realizado com saltos na frequência da portadora, de forma pseudoaleatória, entre grandes valores de frequências; (c) espalhamento por salto de tempo (ou THSS, do inglês *time hopping spread spectrum*), onde os bits são transmitidos intermitentemente em um ou mais intervalos de tempo; e (d) chirp modulação de espalhamento espectral (ou CSS, do inglês *chirp spread spectrum*), onde o sinal chamado de chirp amplia ou reduz a frequência com o tempo, possibilitando aumentar o alcance de comunicação com taxa de dados reduzida.

As condições da camada física devem ser bem entendidas, bem como modelos de propagação de rádio, tipos e orientações de antena. Esses são alguns dos principais fatores que afetam o desempenho dessas redes e precisam ser investigados.

2.2.2 Camada de Enlace

Nas redes *ad hoc* a camada de enlace e sua subcamada MAC tem como funções definir o quadro para transmissão de dados e como será o modo de comunicação: *simplex*, que permitem apenas um dispositivo transmita informação, enquanto outro recebe; *half-duplex*, onde a transmissão e recepção de informações devem ocorrer alternadamente; e *full-duplex*, ambos podem transmitir e receber informações entre si simultaneamente.

Essa camada também é responsável pelos métodos de acesso ao meio, que de modo geral se baseiam nos mesmos utilizados no padrão IEEE 802.11. Esses métodos, segundo (27), são expostos na Figura 7, que ilustra as duas funções básicas de coordenação empregadas: a função de coordenação de ponto (ou PCF, *Point Coordination Function*), que é apenas utilizada em redes sem fio com infraestrutura, sem contenção e sem colisão, onde um ponto de acesso oferece uma garantia de ingresso ao meio para as estações. A outra é a função de coordenação distribuída (ou DCF, do inglês *distributed coordination function*), que emprega o protocolo de acesso múltiplo com verificação de portadora com prevenção de colisão (ou CSMA/CA, do inglês *carrier sense multiple access with collision avoidance*), sendo mais empregado nas redes *ad hoc* móveis.

Basicamente a camada MAC com CSMA/CA propõe que sejam evitadas as colisões, de forma que os dispositivos esperam por um canal livre para transmitir e cada estação que deseja transmitir escolhe aleatoriamente um *slot* de tempo para iniciar sua transmissão. Caso o canal esteja ocupado, o dispositivo espera um tempo aleatório chamado de *backoff*, e reinicia o processo de envio após esse tempo, além disso cada quadro transmitido deve ter a confirmação para o transmissor (ACK), caso não ocorra a confirmação o transmissor

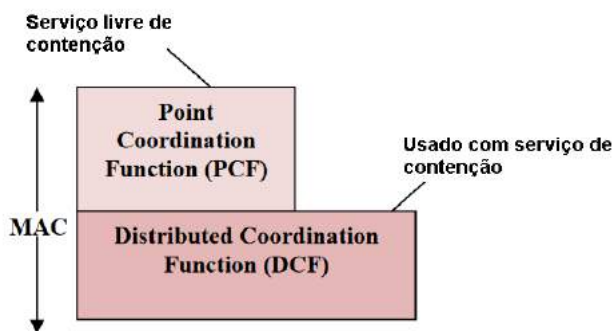


Figura 7 – Arquitetura da subcamada MAC. Adaptado de (27).

também espera *backoff* para fazer a retransmissão. Como nem todas as estações estão dentro do mesmo alcance de rádio e para evitar problemas de colisão com estações “ocultas” o CSMA/CA possibilita implementar o mecanismo de “solicitação para enviar” (ou RTS, do inglês *request to send*), que inclui informações sobre a duração das transmissões subsequentes. Na recepção deste pacote, o destino responde com um pacote “claro para enviar” (ou CTS, do inglês *clear to send*), com isso o remetente iniciará a transmissão dos pacotes de dados ao receber esta confirmação. Cada nó vizinho que escuta a troca destes pacotes está ciente da duração futura da comunicação, portanto, evita tentar acessar o meio durante toda a comunicação.

2.2.3 Camada de Rede

De acordo com (10), a camada de rede está relacionada à transferência de pacotes da origem ao destino, onde chegar ao destinatário pode exigir vários saltos por dispositivos roteadores ao longo do percurso. Existem diversos protocolos de roteamento em redes *ad hoc* sem fio. Em FANETs, esses são agrupados conforme descrito na subseção 2.1.2, e sofrem algumas adaptações, segundo (28), em consequência das peculiaridades de uma rede aérea, como sua mobilidade e consumo energético, que podem prejudicar significativamente a qualidade do link.

Os protocolos de roteamento FANET que exploram informações de topologia, definem endereços para os nós e usam as informações de enlaces existentes na rede para encaminhar pacotes pelo caminho apropriado. Eles são divididos, conforme Figura 8, em:

Protocolos estáticos: a tabela de roteamento é calculada e carregada antes da operação dos nós VANT e não pode ser modificada até o final da operação, não sendo tolerante a falhas (29). Cada VANT se comunica com outro ou com a ECS e armazena apenas suas informações, gerando uma redução do número de links de comunicação. São recomendados para topologias imutáveis e com escolhas de rotas limitadas. Abaixo serão apresentados alguns exemplos de protocolos estáticos descritos em (30):

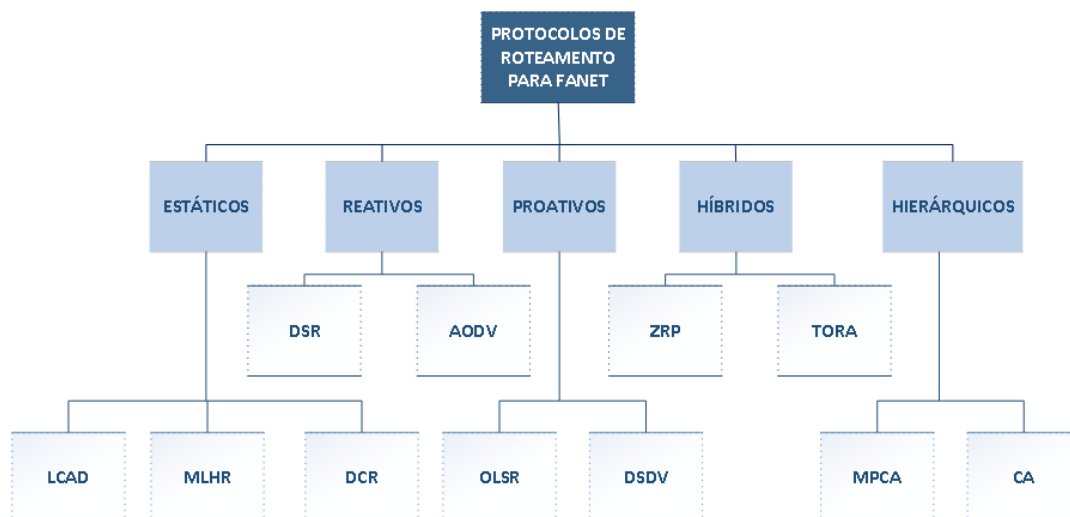


Figura 8 – Protocolos de roteamento baseados em topologia para FANET.

- **LOAD CARRY AND DELIVER ROUTING (LCAD)**: neste protocolo um VANT armazena dados de um nó terrestre de origem, transmite esses para um nó terrestre de destino. O principal objetivo é maximizar a taxa de transferência (do inglês *throughput*), mas sua desvantagem está no aumento das distâncias entre os VANTs que gera atraso de transmissão. Porém, para diminuir esse atraso, várias aeronaves podem ser usadas no mesmo caminho, conforme Figura 9(a).
- **MULTI-LEVEL HIERARCHICAL ROUTING (MLHR)**: foi projetado para lidar com o problema de escalabilidade da rede, muito comum em grandes quantidades de VANTs, onde a rede é agrupada em *clusters*, conforme Figura 9(b), que possuem cabeçalhos de *cluster*, com um VANT líder que está direta ou indiretamente conectado com os VANTs ou satélites da camada superior e inferior. A desvantagem do MLHR é a exigência das informações frequentes desses *clusters*, que em virtude da alta mobilidade dos VANTs exige repetições das informações.
- **DATA CENTRIC ROUTING (DCR)**: neste roteamento, os dados são solicitados e coletados com referência às características e conteúdo dos dados ao invés de remetentes ou IDs de receptores. Utiliza uma estrutura em *cluster* com um modelo de computação distribuída como mostrado na Figura 9(c). As buscas são publicadas e comunicadas para os *clusters* que realizam a entrega das informações através da rede.

Protocolos pró-ativos: segundo (29), os protocolos pró-ativos são dinâmicos e gerenciam todas as tabelas de áreas específicas, e reúnem informações de roteamento em uma rede. Os nós atualizam e compartilham periodicamente entre os vizinhos as tabelas de roteamento de acordo com a mudança na topologia. A principal vantagem é deter todas as informações das rotas atualizadas, porém tem como desvantagens a grande troca de mensagens entre os nós. Exemplo de protocolos de roteamento pró-ativos mais populares descritos em (30):

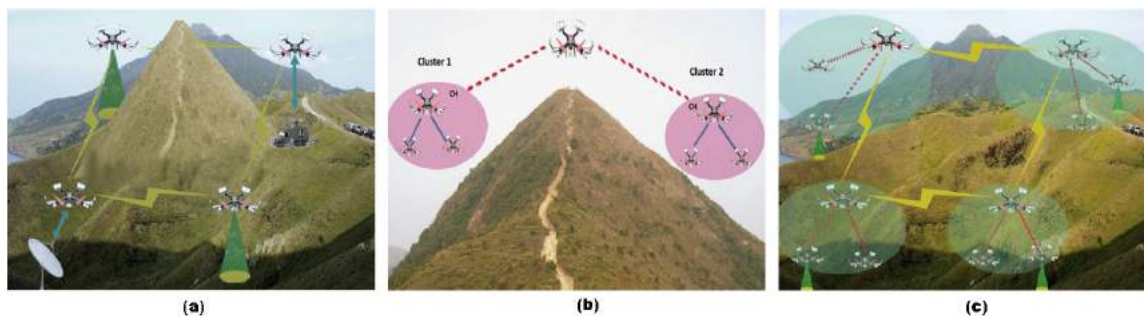


Figura 9 – Protocolos estáticos: (a) LCAD; (b) MLHR; e (c) DCR. Fonte: (30).

- **DESTINATION SEQUENCED DISTANCE VECTOR (DSDV)**: é baseado no algoritmo *Bellman-Ford*, adaptado para rede FANET, onde cada VANT se comporta como um roteador. Nele, a tabela de roteamento é atualizada periodicamente sobre toda a rede, onde cada nó mantém sua tabela, com número de sequência para todos os outros nós, não apenas para os nós vizinhos. Os principais benefícios do DSDV são a simplicidade e o uso dos números de sequência, para evitar *loops* de transmissão. A desvantagem é a atualização periódica da tabela de roteamento, gerando uma sobrecarga na rede.
- **OPTIMIZED LINK STATE ROUTING PROTOCOL (OLSR)**: cada VANT envia regularmente pequenos pacotes para criar um registro vizinho e verificar a conectividade com vizinhos de um salto na faixa de transmissão, vislumbrando sempre determinar a rota rapidamente para todos os destinos possíveis. O espalhamento frequente de informações do OLSR resulta em grande sobrecarga, porém existem nós selecionados como roteador multiponto (ou MPR, do inglês *multi point relay*), usados para reduzir a sobrecarga da rede, onde declara-se um nó MPR na rede e esses são elegíveis apenas para transmissão de dados, reduzindo o espalhamento de mensagens na rede.

Protocolos reativos: de acordo com (21), são aqueles onde o VANT só aciona o processo de descoberta de rota ao destino, quando há necessidade de enviar algo a ele, trabalhando sob demanda. Seu objetivo é reduzir a sobrecarga de rotas que aumentam a banda e o consumo de energia nos protocolos pró-ativos. Neste modelo, existem dois tipos de mensagens: a solicitação de rota para um destino, enviada a todos os vizinhos, e a resposta de rota, com a rota para o VANT desejado. Sua desvantagem é o tempo considerável para encontrar uma rota, que pode gerar uma alta latência.

- **DYNAMIC SOURCE ROUTIN (DSR)**: foi projetado para redes *mesh* sem fio, onde pode haver várias mensagens de solicitação de rota na rede entre vários emissores enviando a seus nós vizinhos. Em função disso, o remetente envia um ID de pedido exclusivo para evitar a mistura com outros nós. Além disso, o nó de origem armazena

toda rota até o destino, caso ele não possa usar essa rota, devido às mudanças de topologia, então o acerto de rota é ativado e com isso ele usará outra rota ao destino.

- **AD HOC ON-DEMAND DISTANCE VECTOR (AODV):** tem as mesmas funções que o DSR, como citado no item anterior, porém no AODV o nó de origem possui apenas uma entrada para cada destino e armazena as informações somente do próximo salto para cada comunicação de dados. Opera em três fases: descoberta de rota, transmissão de pacote e manutenção de rota (em caso de falha de rotas).

Protocolos híbridos: segundo (29), eles visam superar as limitações dos protocolos anteriores de roteamento pró-ativos e reativos. Assim, o roteamento híbrido é dividido em diferentes zonas ou regiões, onde empregam o protocolo pró-ativo, dentro de uma zona, e o protocolo reativo é usado para roteamento entre zonas. São exemplos de protocolos de roteamento híbridos, descritos em (30):

- **ZONE ROUTING PROTOCOL (ZRP):** é baseado no conceito de zonas onde cada VANT tem uma área diferente, e a zona das aeronaves vizinhas se sobrepõem. O tamanho de cada zona é determinado por um raio de comprimento “ R ”, que consiste no número de VANTs em seu perímetro, sendo esse quantitativo regulado pela potência de transmissão das aeronaves. Com isso, se os nós de origem e destino estão na mesma zona, o roteamento é realizado, intrazona, de forma pró-ativa, porém entre zonas diferentes utiliza-se o roteamento reativo para manter e encontrar as rotas ideais.
- **TEMPORARILY ORDERED ROUTING ALGORITHM (TORA):** usa roteamento reativo, mas também usa abordagens proativas em algumas situações. É um protocolo sob demanda altamente adaptável, onde cada VANT apenas atualiza informações de roteamento sobre seus vizinhos. Ele visa construir e manter um grafo acíclico dirigido do VANT de origem ao destino e existem várias rotas entre esses nós, porém ele não se baseia no caminho mais curto, mas sim nas rotas mais longas que são normalmente usadas para minimizar a sobrecarga da rede. O objetivo é limitar a propagação das mensagens de controle, a fim de minimizar reações rápidas a mudanças de topologia.

Protocolos hierárquicos: conforme (29), é baseado na topologia em *cluster*, mas com foco em manter a formação desses *clusters*. Segundo (30), a principal desvantagem deste protocolo inclui a complexidade no esquema de interconexão e a dificuldade da formação do *cluster*. Exemplo de algoritmos de formação de agrupamento, segundo (30), são:

- **MOBILITY PREDICTION CLUSTERING ALGORITHM (MPCA):** foi proposto com base nos atributos dos VANTs, onde o algoritmo trabalha prevendo suas altas mobilidades no tempo de expiração do link entre duas aeronaves, usando informações

de localização. A sua principal vantagem, no ambiente de alta mobilidade, é prever atualizações em relação à topologia vislumbrando minimizar as taxas de atualizações dos *clusters*, gerando atualizações rápidas para o melhor desempenho da rede.

- CLUSTERING ALGORITHM (CA): tem como objetivo superar a dificuldade de gerenciar VANTs fora da linha de visão; consiste em construir *clusters* no solo realizando um plano de agrupamento e calculando, para a seleção, os CH de acordo com as informações geográficas. Em seguida, os CHs são ajustados no espaço, de acordo com a missão, para melhorar a estabilidade e flexibilidade da rede dinâmica.

2.3 Tecnologias de Comunicação para FANET

Segundo (31), as tecnologias de comunicação sem fio fornecem links de comunicação confiáveis e flexíveis para a implantação de redes VANTs. A classificação das redes sem fio, conforme (10), é disposta em: redes pessoais (ou WPAN, do inglês *wireless personal area network*), WLAN, redes metropolitanas (ou WMAN, do inglês *wireless metropolitan area network*) e redes distribuídas (ou WWAN, do inglês *wireless wide area network*). Em (32), esse agrupamento inclui as redes de grande área e baixo consumo (ou LPWAN, do inglês *low power wide area networking*), que é um grupo de tecnologias emergentes que foi criado em função do surgimento da IoT, tendo como objetivo aumentar o alcance das redes. As LPWAN existentes podem ser divididas em três categorias: redes baseadas em infraestrutura celular, redes que usam infraestrutura de terceiros e redes LPWAN autônomas sem qualquer infraestrutura de terceiros (33).

A Figura 10 apresenta uma comparação realizada por (34), quanto a taxa de dados e alcance entre algumas tecnologias de comunicação sem fio, exibindo o mínimo e máximo (com média) para cada métrica de desempenho, incluindo tecnologias ZigBee e LoRa, empregadas nesta dissertação, que são tecnologias de longo alcance e baixo consumo.

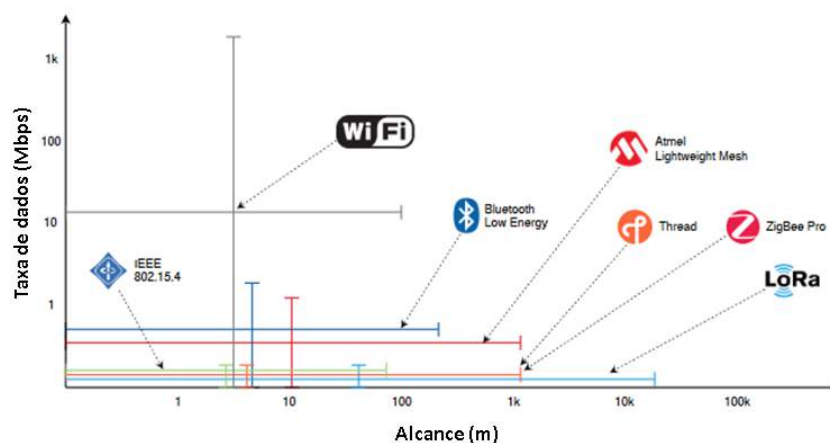


Figura 10 – Comparativo de tecnologias de comunicação sem fio. Adaptado de (34).

2.3.1 Tecnologia ZigBee

O ZigBee tem como foco a comunicação de sensores que lidam com estruturas de dados simples e que permite que objetos inteligentes trabalhem juntos, sendo considerado um subproduto do Wi-Fi de baixo consumo, baixo custo, que pode ser incorporado em diversos cenários, desde eletrodomésticos a sistemas de segurança e aplicações médicas. De acordo com (35), foi pretendido para redes pessoais sem fio de baixa velocidade (ou LR-WPAN, do inglês *low rate wireless personal area network*), sendo um protocolo baseado no padrão IEEE 802.15.4, que implementa a camada física e a subcamada MAC da camada de enlace, enquanto o próprio ZigBee é responsável por implementar as camadas superiores. É um padrão de rede em malha com taxa de dados de até 250 *Kbps*, operando nas faixas de banda de frequências industrial, médica e científica (ou ISM, do inglês *industrial scientific and medical*).

A arquitetura de operação do padrão IEEE 802.15.4 possibilita emprego de topologias estrela ou ponto a ponto (ou P2P, do inglês *peer-to-peer*), conforme Figura 11, e seus nós na rede são classificados de acordo com (36) em:

- COORDENADOR DA REDE DE ÁREA PESSOAL: de acordo com (37), o PAN *coordinator* (do inglês *personal area network coordinator*) fornece sincronização e serviços para outros dispositivos, como: atribuir uma identificação de rede de área pessoal (ou PAN ID), que permite a comunicação entre os membros da rede, e que também é responsável por selecionar a frequência de rádio para a operação.
- DISPOSITIVOS DE FUNÇÃO COMPLETA: o FFD (do inglês *full function device*) faz as funções lógicas de coordenador PAN, roteador ou dispositivo final; e
- DISPOSITIVOS DE FUNÇÃO REDUZIDA: o RFD (do inglês *reduced function device*) é um dispositivo que tem função de entrada/saída, mas sem funcionalidades de coordenação ou roteador, somente podendo executar a função de dispositivo final.

Assim, conforme apresentado na Figura 11, toda PAN é configurada com um FFD e desta forma, um FFD/PAN pode se comunicar com FFD ou RFD podendo implementar todo o padrão, enquanto um RFD trabalha como um dispositivo final e pode se comunicar apenas com FFD/PAN.

O padrão IEEE 802.15.4 emprega como características da camada física o espalhamento DSSS, que especifica suas três faixas de frequência, conforme a Tabela 1, com as regiões de operação, suas taxas de dados, modulação e o número de canais disponíveis. Este padrão emprega a modulação digital por chaveamento de fase (ou BPSK, do inglês *binary phase shift keying*), onde 0 e 1, em uma mensagem binária, são representados por dois estados de fase diferentes no sinal da portadora. Quanto à modulação por chaveamento de

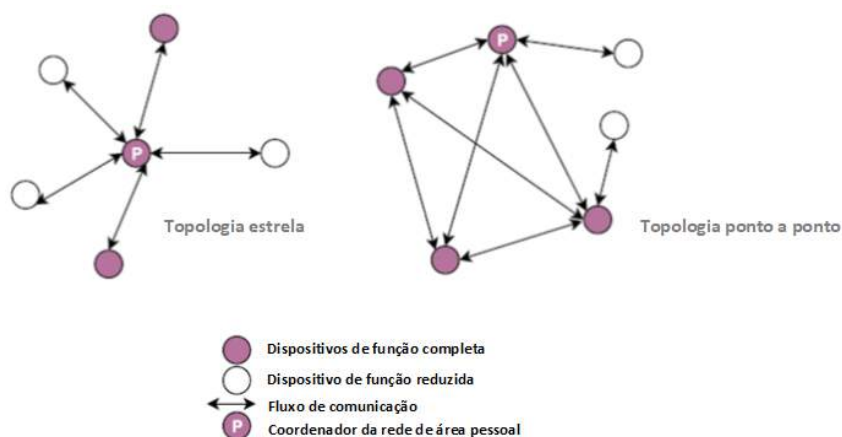


Figura 11 – Topologias do padrão IEEE 802.15.4. Adaptado de (36).

fase com deslocamento de quadratura (ou O-QPSK, do inglês *offset quadrature phase-shift keying*), ele usa quatro fases diferentes em forma de sinalização ortogonal multinível enviando 2 bits por símbolo, que habilita simultaneamente tanto altas taxas de transmissão quanto uma taxa de símbolo baixa.

Tabela 1 – Especificação da camada física do padrão IEEE 802.15.4. Adaptado de (36).

Física (MHz)	Faixa de frequência (MHz)	Modulação	Taxa de dados (Kbps)	Região	Número de canais
868/915	868-868.6	BPSK	20	Europa	1
	902-928	BPSK	40	América do Norte	10
2450	2400-2483.5	O-QPSK	250	Global	16

Quanto à camada de enlace, o padrão IEEE 802.15.4 possibilita o múltiplo acesso por divisão de frequência (ou FDMA, do inglês *frequency division multiple access*), onde multiplexa a frequência de 868 MHz em um único canal, a frequência 915 MHz em 10 canais e por fim a frequência de 2,4 GHz em 16 canais não sobrepostos, conforme exposto na Figura 12, que também apresenta o espaçamento entre os canais em cada banda.

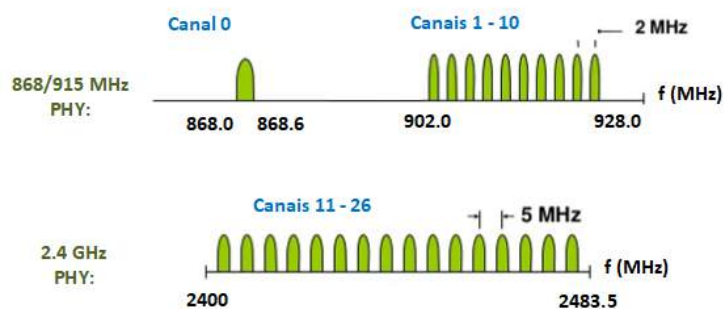


Figura 12 – Bandas, frequências e canais do padrão IEEE 802.15.4.

Segundo (22), os modos de comunicação na subcamada MAC das redes ZigBee podem ser divididos em dois tipos:

- **COMUNICAÇÃO HABILITADA POR BEACON:** o coordenador da rede periodicamente transmite quadros *beacon* as demais estações para confirmar sua presença na rede e mantê-la sincronizada. Utiliza como método de acesso ao meio *slotted CSMA/CA*, onde cada estação que deseja transmitir escolhe aleatoriamente um slot para iniciar sua transmissão; e
- **COMUNICAÇÃO NÃO HABILITADA POR BEACON:** o coordenador envia quadros de *beacon* aleatoriamente de tempos em tempos. Utiliza como método de acesso ao meio *unslotted CSMA/CA*, onde cada vez que um dispositivo deseja transmitir quadros de dados ou comandos MAC, deve aguardar um período aleatório. Se o canal estiver ocioso, após o *backoff* aleatório, o dispositivo deve transmitir seus dados. Se o canal estiver ocupado, após a espera aleatória, o dispositivo deve aguardar outro período aleatório antes de tentar acessar o canal novamente.

As camadas implementadas pelo ZigBee, atuam diretamente nas funções da camada de rede, conforme (35), envolvendo o processo de descoberta e formação da rede; a atribuição de endereços para entrada e saída de nós à rede; o roteamento; e a detecção e notificação de interferências. Adicionalmente na camada de aplicação, há a função de garantir suporte para as diversas aplicações a serem empregadas.

Conforme descrito em (34), o ZigBee é um exemplo importante de protocolo baseado no IEEE 802.15.4, em que o seu alcance aproveita ao máximo do padrão de rádio, descrito na Tabela 1, onde as distâncias de transmissão podem variar: na faixa de 2,4 GHz de 10 m a 100 m e nos canais sub-GHz, até 1 Km. Além disso, possibilita configurar redes auto-organizáveis, tendo como pilar os modos de operação do padrão IEEE 802.15.4 (22), que o permitem implantar as seguintes topologias descritas em (38):

- **ESTRELA:** consiste em um coordenador e vários dispositivos finais, conforme Figura 13(a), onde cada nó final se comunica apenas com o coordenador e qualquer troca de pacotes entre dispositivos finais deve passar por ele. Seu funcionamento pode gerar um “gargalo”, pois a comunicação depende totalmente do coordenador da rede;
- **MALHA (OU MESH):** consiste em um coordenador, vários roteadores e dispositivos finais, onde os pacotes passam por vários saltos para chegar ao seu destino, conforme Figura 13(b). Essa topologia possibilita um maior alcance, além de encontrar um novo caminho para o destino, em caso de falha de rota; e
- **ÁRVORE (OU CLUSTER):** usa roteamento hierárquico, onde o coordenador se comunica com os roteadores e esses com os nós finais, conforme Figura 13(c). Segundo (38), o *cluster* é um caso especial de topologia em árvore em que um roteador pai com seus filhos são chamados de *cluster*, e é identificado por um ID de *cluster*.

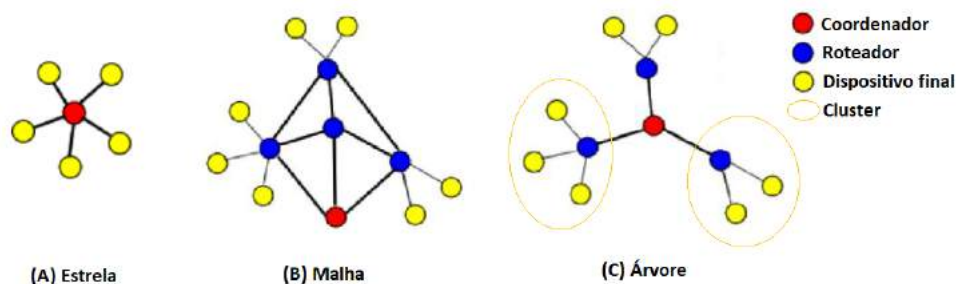


Figura 13 – Topologias de rede com ZigBee.

2.3.2 Tecnologia LoRa

A tecnologia de comunicação de longa distância (LoRa, sigla do inglês) é uma das principais tecnologias usadas em LPWAN, que foi apresentada por (39). Ela atua na camada física e é caracterizada pelo baixo consumo, baixa potência, alta robustez e longo alcance. Segundo (40), LoRa opera nas faixas de frequências ISM, com a taxa de transmissão que pode variar de 0,3 a 37,5 *Kbps* e com alcance de até 5 *km*, em regiões urbanas, e até 15 *km* em áreas rurais.

A arquitetura nativa do LoRa é a topologia estrela, de salto único, onde os *gateways* centrais transmitem e recebem mensagens entre os dispositivos finais. O LoRaWAN, de acordo com (41), é também considerada topologia estrela, acrescentando um terceiro componente aos já citados, que são os servidores de rede. Com isso, nós finais e nós sensores se comunicam com o servidor de rede por meio de *gateways* e a comunicação do nó para *gateway* por modulação LoRa, conforme exemplo da Figura 14.

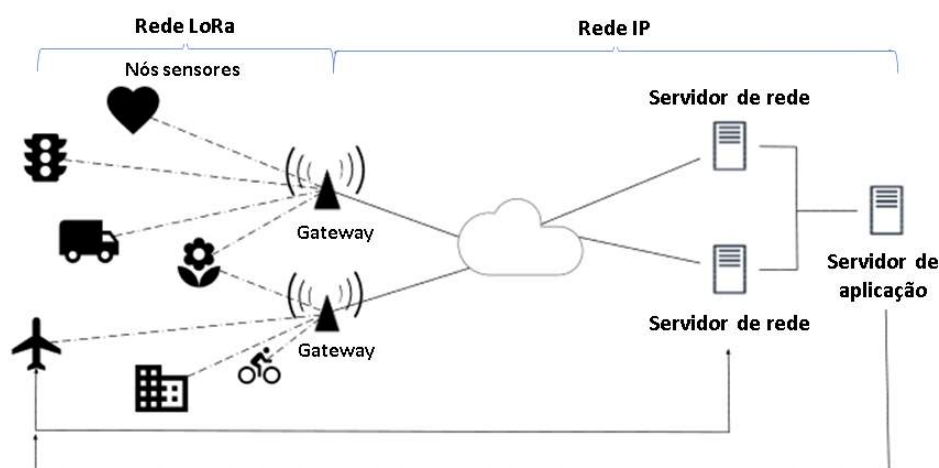


Figura 14 – Exemplo da arquitetura estrela, LoRa/LoRaWAN. Adaptado de (41).

Contudo, os autores de (34) expõem que apesar da capacidade de longo alcance entre nós finais e *gateways* LoRa, pode-se, também, implantar a arquitetura multissalto com “LoRa Mesh”, evitando maiores custos quanto à implantação de um número maior de *gateways*. Esse tipo de topologia em *mesh* pode ser visto, por exemplo, na Figura 15, com

o uso do rádio LoRa *Mesh* (42), que possibilita a comunicação entre dispositivos escravos e o mestre da rede através de N saltos. Essa topologia e equipamentos foram empregados nesta dissertação.

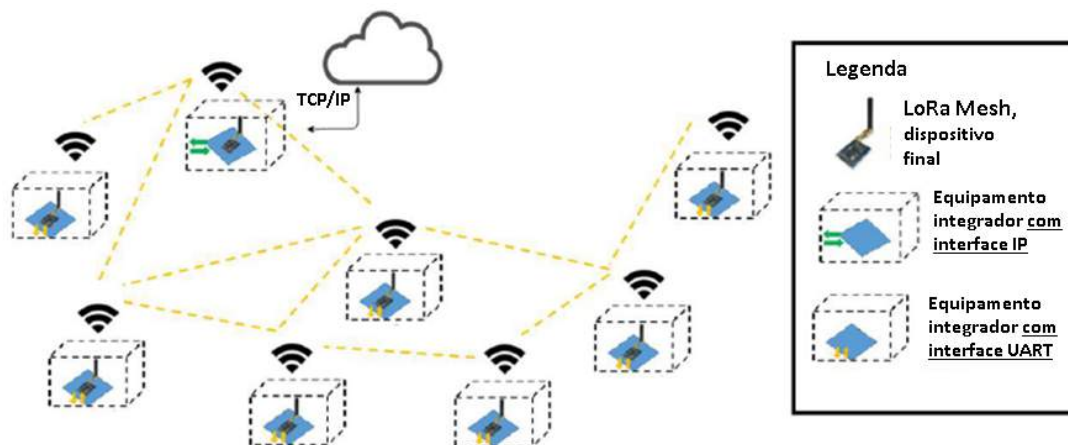


Figura 15 – Exemplo da arquitetura LoRa em mesh. Adaptado de (43).

Segundo (33), a diferença entre LoRa e LoRaWAN está vinculada a camada de atuação, onde LoRa atua na camada física, que é fechada e proprietária, enquanto LoRaWAN, segundo (44), tem especificação de protocolo aberta e denota as comunicações da subcamada MAC, que coordenam o meio e gerenciam a comunicação entre *gateways* LPWAN e os dispositivos de nó final. LoRaWAN, de acordo com (45), define por exemplo, o suporte à comunicação bidirecional, estipula o protocolo de comunicação, a arquitetura do sistema para a rede e a interface de programação de aplicações (ou API, do inglês *application programming interface*). Ainda de acordo com (45) a subcamada MAC do LoRa utiliza o mecanismo de acesso baseados em contenção ALOHA puro, onde os quadros podem ser transmitidos a qualquer momento em tempos totalmente arbitrários e em caso de colisão há uma espera de tempo aleatório para retransmitir.

Nas características da camada física, o LoRa emprega espalhamento CSS, com correção de erros de avanço (ou FEC, do inglês *forward error correction*) integrada e opera na subBanda GHZ das faixas de frequência ISM, de 433/868/915 Mhz . Conforme (44), o CSS tem sido usado na comunicação militar e espacial há décadas devido a seus requisitos de potência relativamente baixos, canal de longas distâncias e robustez à interferência. Contudo, o LoRa é a primeira implementação de baixo custo para uso comercial.

A modulação LoRa, introduzida e mantida por (39), visa reduzir a energia necessária para a transmissão dos bits pelo canal e de acordo com (45), substitui um bit por múltiplos símbolos e chips de informação. Com isso, os dados transmitidos, que são símbolos, serão representados por um sinal *chirp* com uma faixa de frequência que varia continuamente de forma crescente (*up-chirp*) e decrescente (*down-chirp*), mas mantêm a amplitude e continuidade de fase constante durante a transmissão. A Figura 16 ilustra um exemplo de transmissão LoRa com preâmbulo, o delimitador de quadro inicial (do inglês *start-frame-*

delimiter, ou SFD), que antecede os dados, e na sequência os dados codificados, conforme descrito em (46). Tanto o preâmbulo quanto o SFD têm direção oposta de chirp e o SFD tem um comprimento fixo.

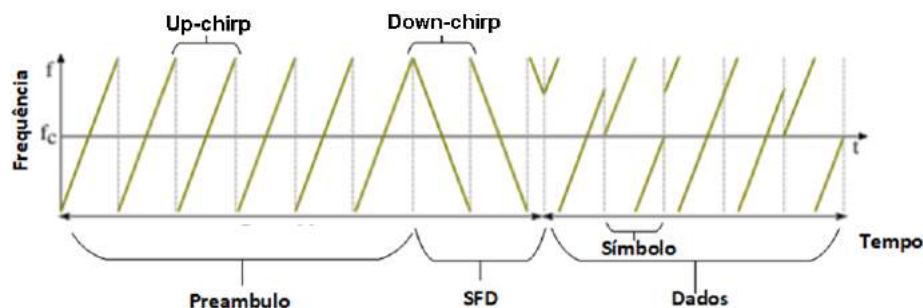


Figura 16 – Modulação LoRa com preâmbulo, SFD e dados codificados. Adaptado de (46).

A taxa de dados de modulação nominal LoRa varia de acordo com a largura de banda de modulação, fator de espalhamento (ou SF, do inglês *spreading factor*) e taxa de código. De acordo com (47), na modulação LoRa, o símbolo pode ser alterado configurando os parâmetros fator de espalhamento e largura de banda, descritos a seguir.

As tecnologias LoRa fornecem registros de memória que podem ser usados para configurar vários parâmetros da camada física. Eles podem ser alterados para determinar o consumo de energia, o alcance, resiliência ao ruído, velocidade e qualidade de serviço em geral. Esses parâmetros, descritos em (47), são:

- **FREQUÊNCIA DA PORTADORA:** vinculada às faixas ISM, porém é homologada conforme a região de operação dos equipamentos, sendo não ajustável pela aplicação.
- **LARGURA DE BANDA:** as bandas (ou BW, do inglês *bandwidth*) do LoRa são configuráveis e diferem de modo geral em: 125 kHz , 250 kHz ou 500 kHz de acordo com a região de operação. Conforme (48), os dados são enviados sempre a uma taxa de chips por segundo (do inglês *chips per second*, ou cps) igual à largura de banda selecionada. Sendo assim, uma largura de banda de 125 kHz corresponde a um taxa de chip de 125 kchips .
- **TAXA DE CODIFICAÇÃO:** a taxa de codificação (ou CR, do inglês *coding rate*) define a correção de erro de encaminhamento, que estipula quantos bits são utilizados para dados de redundância na mensagem, visando recuperar os erros. É utilizada pelo LoRa para lidar com rajadas de interferência, onde quanto maior o CR, mais robustez e proteção podem ser oferecidas, porém prolonga o tempo do sinal no ar. De acordo com (49), LoRa pode ser configurado para uma taxa específica que pode ser: $4/5$, $4/6$, $4/7$ ou $4/8$, e podem ser opcionalmente incluídas no cabeçalho do pacote, como, também, o CR define a taxa de codificação (T_c), conforme Equação 2.1:

$$T_c = \frac{4}{4 + CR}, \text{ onde } CR \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (2.1)$$

- **FATOR DE ESPALHAMENTO:** de acordo com (48), o SF é a razão entre a taxa de símbolo e a taxa de chip, sendo o número de símbolos enviados por bit de informação, onde cada bit de informação na carga útil é representado por múltiplos chips de informação. O SF indica quantos chips são usados para representar um símbolo, variam de 7 a 12 e permitem formar canais ortogonais, fazendo com que enlaces com fatores de espalhamento diferentes não tenham colisões entre si. Assim, por exemplo, se SF é igual a 8 significa que serão usados 2^{SF} (256) chips por símbolo.

De acordo com (41), SF é umas das variáveis fundamentais que garantem a qualidade do serviço, onde utilizando a faixa inferior de valores do SF, a taxa de dados será mais alta, com menos ruído e o tempo de transmissão será baixo. Já os SFs mais altos, mais chips serão usados para representar um símbolo, estendendo o alcance, porém com maior relação sinal-ruído (ou SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*), portanto, maior sensibilidade e intervalo de transmissão do pacote. A Figura 17 ilustra um exemplo da ortogonalidade entre os SF e o tempo necessário para transmitir um símbolo do SF 7 ao SF 12, com largura de banda igual a 125 kHz.

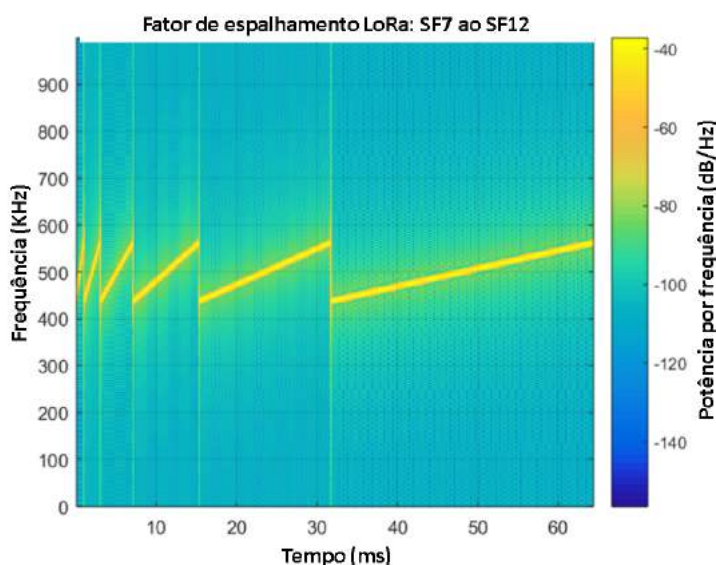


Figura 17 – Exemplo de modulação LoRa do SF 7 ao 12, em 125 KHz. Adaptado de (50).

- **POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO:** suporta potência de transmissão de rádio, conforme (44), de até 27 dBm.

Além disso, segundo (47), é possível com esses parâmetros derivar a taxa de bits, símbolos e chips da modulação LoRa. Desta forma, pode-se definir a taxa de bits de modulação (R_b), sem fatores de correção, com SF e BW pela Equação 2.2. A Equação 2.3 define a taxa de símbolos por segundo (R_s), que é a taxa de disseminação da informação.

$$Rb = SF \frac{1}{\left[\frac{2^{SF}}{BW}\right]} \text{ bps, onde } SF \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\} \quad (2.2)$$

$$Rs = \frac{BW}{2^{SF}} \text{ símbolos/s} \quad (2.3)$$

Segundo (47), a taxa de chip (Rc) é o produto da taxa de símbolo com fator de espalhamento, conforme Equação 2.4. Porém, ao final a taxa de chip (Rc), em chip por segundo (ou *cps*, do inglês *chip per second*), torna-se igual à banda empregada, conforme Equação 2.5, ou seja, *cps* por *Hz* de largura de banda.

$$Rc = Rs * 2^{SF} \text{ cps} \quad (2.4)$$

$$Rc = BW \text{ cps} \quad (2.5)$$

Conforme (47), a modulação LoRa também inclui um esquema de correção de erro variável, descrito anteriormente, que melhora a robustez do sinal transmitido em detrimento da redundância. Incluindo a correção de bits (Tc) descrita na Equação 2.1, com SF e BW pode-se definir a taxa de bits do sinal de dados pela Equação 2.6. Desta forma, a taxa de bits nominal do sinal de dados (Rb) possui valores teóricos expostos na Tabela 2, que variam conforme os parâmetros de BW , SF e CR empregados.

$$Rb = SF \frac{Tc}{\left[\frac{2^{SF}}{BW}\right]} \text{ bps, onde } SF \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\} \quad (2.6)$$

A estrutura do pacote LoRa, de acordo com (41), contém o preâmbulo usado para informar e sincronizar o receptor com os dados de entrada, estabelecendo um mesmo fator de espalhamento para cada pacote enviado. Quanto ao cabeçalho, com formato explícito, o pacote LoRa possui um tamanho curto com informações básicas de *payload* como: comprimento da carga útil (em *bytes*), CR utilizada no pacote e status de verificação cíclica de redundância (ou *CRC*, do inglês *cyclic redundancy check*). O pacote consiste na concatenação das informações contidas na subcamada MAC ao cabeçalho do quadro da camada física, conforme Figura 18. Quanto ao pacote com cabeçalho implícito, ele ocorre quando a taxa de codificação e o *CRC* não são especificados, pois já são conhecidos e seus valores não serão alterados.

O tempo no ar (ou *ToA*, do inglês *time on air*), de acordo com (49), indica o tempo necessário para a transmissão da mensagem LoRa, que representa a ocupação dos canais e pode ser calculado usando a Equação 2.7, com tempo de símbolo (Ts), onde Rs é o resultado da Equação 2.3, e o seu resultado será usado para calcular o tempo de preâmbulo ($T_{\text{preâmbulo}}$); e a Equação 2.8, onde ($N_{\text{preâmbulo}}$) é o número de símbolos no preâmbulo.

$$Ts = \frac{1}{Rs} \quad (2.7)$$

Tabela 2 – Valores teóricos de taxa de bits LoRa, em função do BW, SF e CR. Fonte: (43).

Taxa de dados (bps)		Spreading Factor					
		7	8	9	10	11	12
Largura de Banda (kHz)	125	3418	1953	1098	610	336	183
	250	6836	3906	2197	1220	671	366
	500	13672	7813	4395	2441	1343	732

Coding Rate 4/8

Taxa de dados (bps)		Spreading Factor					
		7	8	9	10	11	12
Largura de Banda (kHz)	125	3906	2232	1256	698	384	209
	250	7813	4464	2511	1395	767	419
	500	15625	8929	5022	2790	1535	837

Coding Rate 4/7

Taxa de dados (bps)		Spreading Factor					
		7	8	9	10	11	12
Largura de Banda (kHz)	125	4557	2604	1465	814	448	244
	250	9115	5208	2930	1628	895	488
	500	18229	10417	5859	3255	1790	977

Coding Rate 4/6

Taxa de dados (bps)		Spreading Factor					
		7	8	9	10	11	12
Largura de Banda (kHz)	125	5469	3125	1758	977	537	293
	250	10938	6250	3516	1953	1074	586
	500	21875	12500	7031	3906	2148	1172

Coding Rate 4/5

$$T_{\text{preambulo}} = (N_{\text{preambulo}} + 4, 25)Ts \tag{2.8}$$

Para calcular o tempo necessário para a transmissão do *payload* deve-se utilizar a Equação 2.9, que expressa o número de símbolos que formam o cabeçalho e o *payload* (N_{payload}), onde a variável *PL* indica o número de *bytes* no *payload*. O *SF* é o fator de espalhamento empregado (7 a 12); o *IH* é um identificador de cabeçalho, onde empregam-se os valores: 0(zero) quando o cabeçalho está habilitado e 1 quando não existe cabeçalho; a variável *CRC* recebe valor 1, quando há *CRC* de 16 *bits* para o *payload* e recebe valor 0(zero), quando não há *CRC*; a variável *DE* recebe valores 1, quando há otimização para

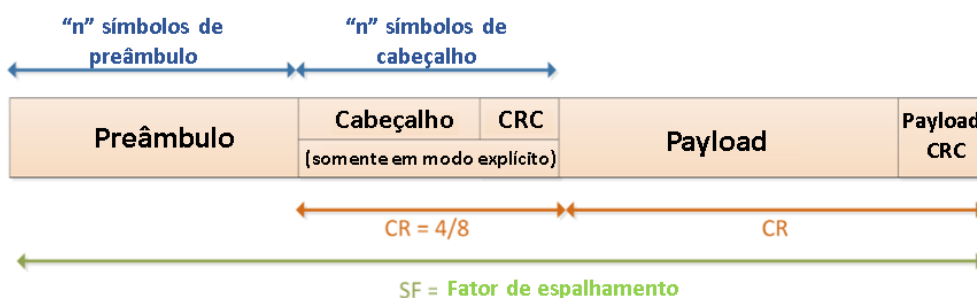


Figura 18 – Estrutura do pacote LoRa. Adaptado de (49).

taxa baixa de dados, e recebe 0(zero) caso não haja otimização de taxa baixa; e CR que indica a taxa de codificação que varia de 1 a 4.

$$N_{\text{payload}} = 8 + \max(\text{ceil}[\frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH}{4(SF - 2DE)}](CR + 4), 0) \quad (2.9)$$

Com o resultado da Equação 2.9, pode-se calcular o tempo de transmissão do *payload* (T_{payload}), pela Equação 2.10. Por fim, conforme (49), com os resultados das equações 2.9 e 2.10, obtemos a Equação 2.11 que indica o ToA do pacote.

$$T_{\text{payload}} = N_{\text{payload}} * Ts \quad (2.10)$$

$$ToA = T_{\text{payload}} + T_{\text{preamble}} \quad (2.11)$$

Desta forma, de acordo com (51), conforme visto na Figura 19, o tamanho do *payload* desempenha um papel importante no ToA, sendo este tempo otimizado pela combinação do aumento da largura de banda a redução do SF.

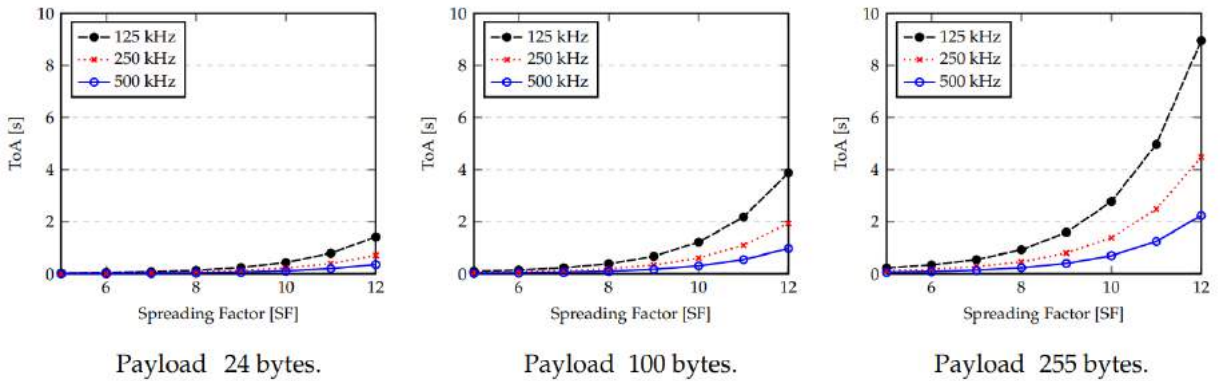


Figura 19 – Exemplo de ToA para *payloads* de 24/100/255 bytes, conforme Largura de banda e Fator de Espalhamento. Fonte: (51).

Por fim, dentre as características do LoRa, de acordo com (46), o ciclo de trabalho (do inglês *duty cycle*) denota a ocupação do canal de frequência usado para transmitir uma mensagem ao longo do tempo, sendo a proporção de tempo que um rádio transmite um sinal em relação a um ciclo de tempo “ligado ou desligado”. Mundialmente existem regras de compartilhamento do canal de comunicação, e assim conforme (52), o intervalo para uso do canal, *duty cycle*, está diretamente relacionado a essas normas e ao ToA, ou seja, com um aumento do ToA existe um aumento do *duty cycle*. Ele é frequentemente regulamentado pelos órgãos governamentais, onde no Brasil, conforme parâmetros regionais da LoRa Alliance (53) e homologados pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) pelo ato nº 14448, de 04 de dezembro de 2017 (54), no uso da faixa $AU915MHz$ da banda ISM para o Brasil e empregada pelos rádios LoRa deste estudo, estipula-se que não há limites de tempo para o ciclo de trabalho e ocupação do canal.

2.4 Considerações Sobre o Capítulo

Este capítulo apresentou conceitos significativos relacionados ao desenvolvimento desta dissertação e que são fundamentais para a compreensão de algumas partes do trabalho. Algumas informações suplementares sobre as tecnologias de rádio empregadas estão presentes nos capítulos de desenvolvimento. O próximo capítulo apresenta uma revisão de literatura que abrange trabalhos com alguma semelhança ao estudo desta dissertação.

3 REVISÃO DA LITERATURA

As diversas tecnologias de comunicação sem fio possuem especificações distintas assim como as redes FANET que também podem ser aplicadas em diversas atividades, sejam elas, vigilância, monitoramento de locais, até o uso para transmissão de informações de sensores em IoT. Todas essas formas de comunicação, além de amplamente usadas em redes fixas, são pilares fundamentais, também usadas em variadas aplicações móveis como VANET e FANET.

Nas redes aéreas, em virtude da alta mobilidade dos VANTs e do ambiente empregado, podem vir a acarretar em valores bem diferentes das especificações previstas pelo fabricante, influenciando na qualidade da missão, em função de baixa taxa de transferência de dados, o alcance reduzido e o aumento do consumo de energia dessas aeronaves, sendo esse último um recurso crítico a uma FANET no que tange a duração do voo de cada aeronave, podem vir a comprometer ainda mais os objetivos propostos a ela.

À medida que a importância da comunicação sem fio vem crescendo, surgiram trabalhos que buscam aplicar essas tecnologias e, também, em paralelo, analisar diversos aspectos dentro do objetivo proposto. Os trabalhos relacionados e apresentados abaixo resumiram-se em três grupos: os de “**redes fixas**”, “**redes veiculares**” e “**redes aéreas**”, em que aplicaram métricas de comparações, de tecnologias sem fio, iguais ou próximas ao trabalho proposto.

3.1 Trabalhos Associados a Redes Fixas

Os trabalhos relacionados abaixo aplicaram métricas de comparações, de tecnologias sem fio, em redes fixas com direções iguais ou próximas ao trabalho proposto.

Em (55), os autores apresentam a avaliação de tecnologias de comunicação para monitoramento em ambientes florestais, comparando tecnologias LoRa, IEEE 802.11g e ZigBee em termos de alcance, potência do sinal, taxa de perda e atraso. Foram realizados experimentos sem linha de visão (ou NLOS, do inglês *non-line-of-sight*) em distâncias de até 200 m, em variações de 50 em 50 m, com pacotes de 47 bytes, onde para o LoRa empregaram CR 4/5, antenas de 7 dBi, largura de banda de 500 kHz com potência de 14 dBm em SF 7, 9 e 11. Quanto ao ZigBee, empregaram rádio com frequência 2.4 GHz, largura de banda de 5 MHz e antena de 1,5 dBi com potência também de 14 dBm.

As comparações feitas mostraram as limitações das tecnologias, que podem influenciar na disseminação de alertas florestais, onde para o LoRa o alcance máximo foi 3 vezes maior do que o Wi-Fi e 6 vezes maior do que o ZigBee. Esse trabalho operou com rádios em diferentes distâncias, em P2P, sem rede *mesh* e também não fez comparações

com relação às taxas de transferência e consumo de energia das tecnologias.

Em (56), o autor apresenta as diferenças de diversas tecnologias sem fio aplicadas na agricultura de precisão e em seguida exibe simulações comparativas de alcance, atraso e taxa de entrega entre tecnologias LoRaWAN em P2P, conforme Figura 20(a), e ZigBee em *mesh* (com protocolos de roteamento AODV e DSDV), conforme Figura 20(b).

O autor simula a comunicação, com intervalos a cada 1 s, em campo aberto com 145 nós, com máxima distância de 430,3 m e mínima 76,4 m, no envio de 60 bytes para *upload* e 20 bytes para *download*. Quanto ao LoRaWAN, utilizou largura de banda de 125 kHz com SF 7. Ao final, sugere uma combinação de tecnologias para atender os requisitos das aplicações. Esse estudo operou de forma simulada com rádios P2P e *mesh*, esse ultimo apenas para ZigBee, e também não fizeram comparações com relação a consumo dos meios.

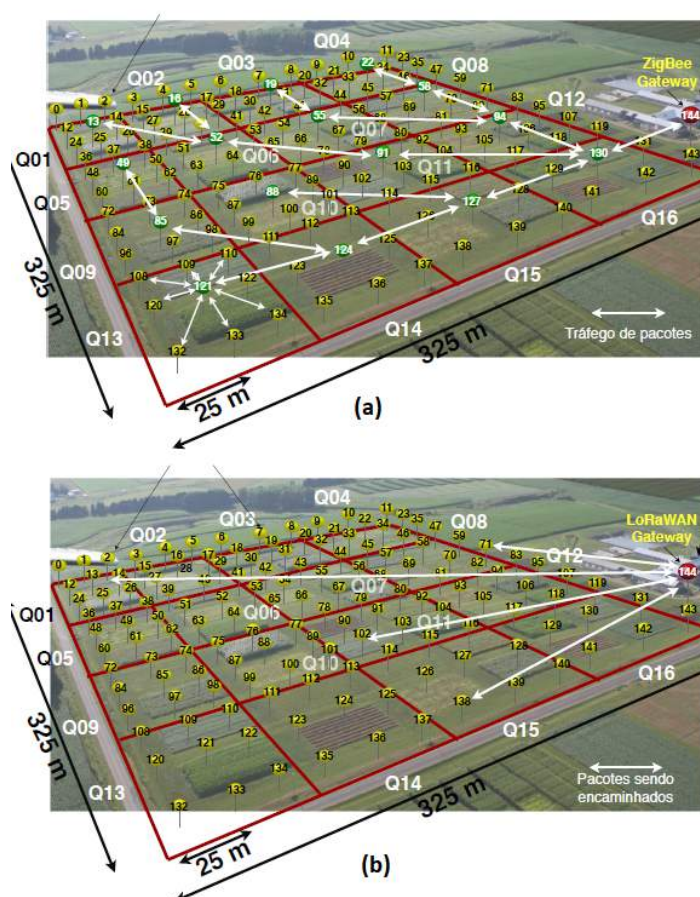


Figura 20 – (a) Estrutura da rede ZigBee (b) Estrutura da rede LoRaWAN. Fonte: (56).

Em (52), os autores realizam uma análise comparativa de LoRa e ZigBee em implantações de IoT, com uso em diferentes quantidades de sensores, em edifícios escolares, cobrindo andares e compartimentos, com cenário de rede ZigBee em *mesh*, conforme exemplo da Figura 21(a), e outro com LoRa em estrela, conforme Figura 21(b).

Os autores empregaram LoRa modelo “chipset 1276” com os seguintes parâmetros:

frequência 868 MHz , potência de 14 dBm em SF 7 com largura de banda de 500 kHz e SF 9 com largura de banda de 125 kHz . Quanto ao ZigBee, utilizaram rádio “XBEE S1 PRO” com frequência de 2.4 GHz e potência de 10 dBm . Sendo realizado comparações de taxa de entrega de pacotes (ou PDR, do inglês *packet delivery ratio*), relação sinal-ruído (ou SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*) e indicador de intensidade do sinal recebido (ou RSSI, do inglês *received signal strength indication*) em ambiente fechado. Eles verificaram que o sinal do LoRa teve alcance de comunicação consideravelmente melhor. Em cenários com menor banda, o LoRa obteve resultados suficientes para competir com ZigBee. O estudo em questão operou com as rádios em P2P no LoRa, em *mesh* com ZigBee e não analisou taxas de transferência, consumo e, também, não divulgou o protocolo de roteamento empregado.

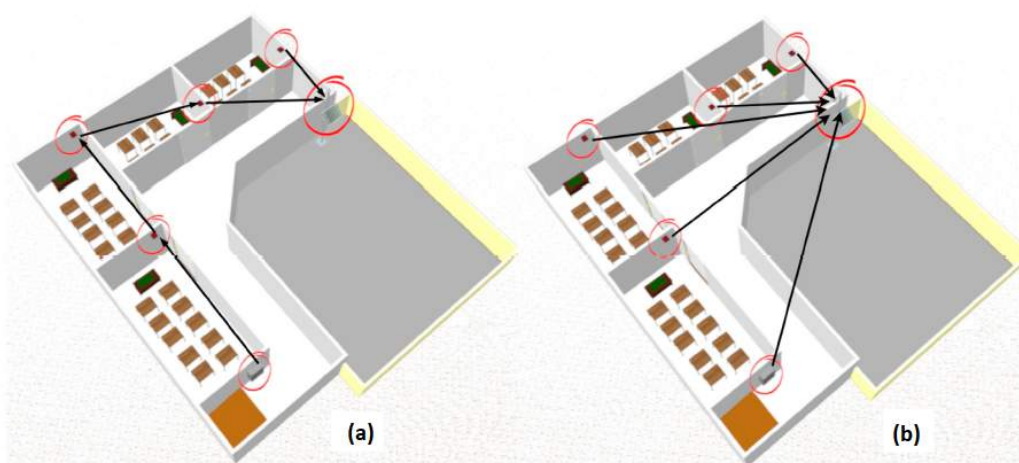


Figura 21 – Exemplo de arquitetura empregada: (a) ZigBee e (b) LoRa. Fonte: (52).

3.2 Trabalhos Associados a Redes Veiculares

Abaixo são expostos alguns estudos que aplicaram métricas de comparações, de tecnologias sem fio em redes veiculares com direções iguais ou próximas ao trabalho proposto, com mobilidade e troca de informações V2V e V2I.

Em (57), os autores analisaram a confiabilidade e conectividade de veículos em redes *ad hoc* e criaram através de simulações uma abordagem heurística baseada na probabilidade mais alta de uso de um determinado caminho ao veículo de destino, por meio do algoritmo *Dijkstra*. Na sequência empregam a abordagem comparando o desempenho da comunicação V2V com ZigBee, Wi-Fi e bluetooth. Simularam uma área de 10 km com pista de 20 m de largura, em mão dupla, onde diferentes quantidades de veículos ($200/400/600$ e 800) em diferentes velocidades realizaram troca de mensagens de informação, de 5 KB , e de emergência, de 64 bytes , incluindo ou não comunicação de veículo com RSU, chamado de

V2R (do inglês *vehicle to roadside*).

Nos primeiros experimentos, observaram que aumentando o número de nós gerou-se uma maior confiabilidade na comunicação V2V, em função de existirem mais rotas. Além disso, sem uso de V2R, conforme Figura 22(a), o bluetooth não transferiu nenhuma mensagem devido ao seu pequeno alcance, o ZigBee variou entre 5% e 38%, e o Wi-Fi variou de 30% a 90%. Com uso de duas RSU, em V2R, conforme Figura 22(b), aumentou-se a confiabilidade, onde o bluetooth obteve entre 16% e 21%, ZigBee atingiu 50% e Wi-Fi atingiu 97,5%.

No experimento seguinte foi simulado ambiente com 500 veículos com ou sem adição de RSU no envio de dois tipos de mensagem, com melhores resultados em rede de V2V com V2R no Wi-Fi, com mensagem de emergência, onde atingiu 96%; para mensagem de informação, esse percentual chegou a 91%. O experimento final, comparou a confiabilidade em diferentes velocidades, 30/50/70 *mph*, com e sem emprego de RSU, onde observaram que veículos mais lentos criam uma conexão mais fácil do que na rodovia em alta velocidade.

Esse estudo verificou que as mensagens menores tiveram maior confiabilidade, além disso, ratificou, que empregando RSU e velocidades mais baixas, a confiabilidade foi aumentada em todos os rádios. Esse trabalho operou em VANET comparando diferentes rádios, porém, não analisou rádios LoRa e não fez análise de alcance, consumo e taxas de transferência dessas tecnologias.

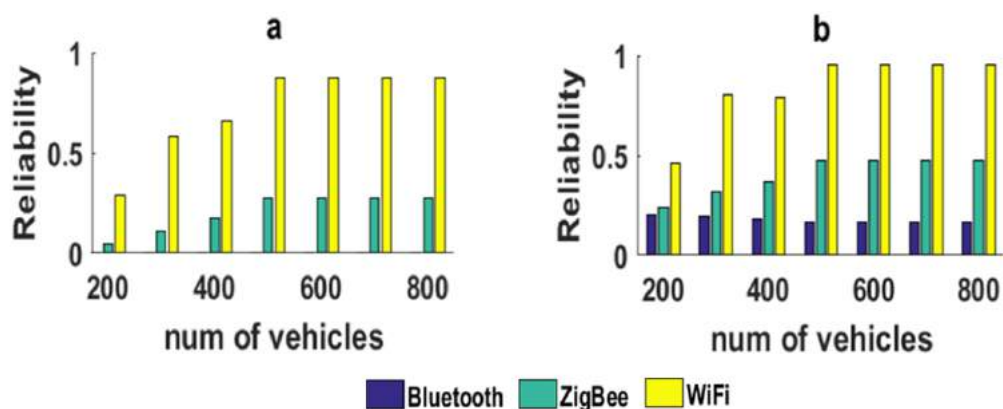


Figura 22 – Confiabilidade com a variação do número de veículos: (a) V2V; (b) V2V com V2R. Fonte: (57)

Em (58), os autores avaliaram o ZigBee para operação com veículos guiados automatizados (ou AVG, do inglês *automated guided vehicle*), utilizados no transporte de contêineres dentro de terminais portuários. O transporte atual emprega Wi-Fi e sofre interferências geradas por estruturas metálicas no local. Sendo assim, para alcançar uma coordenação mais eficaz no terminal, analisaram em ambiente simulado, similar ao terminal portuário, o funcionamento do ZigBee em VANET, empregando 5 rádios, sendo um coordenador fixo, e os demais roteadores. O rádio roteador embarcado no AVG envia

mensagem ao coordenador com a posição, velocidade e direção, *payloads* de 128 *bytes*, a cada 250 *ms*, empregando taxa de 115200 *bps*.

Os experimentos analisaram primeiramente o RSSI da comunicação P2P entre coordenador e um nó roteador no AVG, que moveu-se em uma rota definida. Os resultados mostraram que mesmo se houver um contêiner entre eles, as mensagens enviadas pelo roteador são recebidas pelo coordenador, mas o percentual de perdas devido a interferência foi de 22,13%. No segundo teste, o coordenador fica fixo e o AVG 4 se move em uma rota traçada com os demais nós roteadores desligados, desta forma perceberam que quando havia um navio entre eles o coordenador não recebia mais mensagens. Por fim, na última análise, repetiram o teste anterior com os demais roteadores ligados. Nesse caso, 97,17% das mensagens do AVG 4 foram recebidas pelo coordenador.

Esse estudo verificou que a rede ZigBee é uma boa candidata para comunicação sem fio em AVGs, contudo esse trabalho operou em VANET comparando apenas ZigBee sem especificar protocolo de roteamento e não fizeram análise de consumo, taxas de transferência e alcance prático do rádio.

Em (59), os autores avaliaram de forma simulada o uso de LoRa e Wi-Fi para estabelecer ligações V2V, onde um veículo $V1$ transmite uma mensagem $M1$ para $V2$ e $V2$ após um tempo encaminha a $V3$. Inicialmente analisaram em área de 1 Km^2 , com tráfego simulado de veículos, o PDR quanto ao envio de pacotes de 1 KB enviado a cada hora, 1 MB a cada 18 h e 10 MB a cada 96 h . Assim observaram que quanto maior o tempo de vida do pacote (ou TTL, do inglês *time to live*) maior a melhora do LoRa perante o Wi-Fi, quanto a entrega de mensagens.

Na sequência comparam as tecnologias quanto à latência e alcance, onde LoRa obteve menores latências e, com maior TTL, obteve um alcance de até 1300 m . Enquanto o Wi-Fi só chegou a 100 m no mesmo intervalo. Esse trabalho operou em VANET comparando LoRa com Wi-Fi, mas não divulgou quais parâmetros LoRa foram empregados, além de não realizar análise em relação ao consumo e taxa de transferência desses rádios.

Em (60), os autores empregaram e avaliaram o LoRa, em P2P, para uso em sistemas de localização de bicicletas com um módulo de posicionamento global (ou GPS, do inglês *global positioning system*) e o rádio LoRa. Os experimentos empregaram 1 *gateway* LoRaWAN, instalado no topo de um edifício, para receber coordenadas de GPS enviadas a cada 3 s pelo rádio LoRa das bicicletas, utilizando os seguintes parâmetros: frequência de 868 MHz , potência de 14 dBm , largura de banda de 125 MHz , CR 4/5 e SF 12.

Os experimentos práticos analisaram apenas o RSSI em uma área de 50 Km^2 . Os resultados mostram que a cobertura é muito limitada em áreas urbanas, com “buracos” fora da linha de visão. Por outro lado, distâncias de quase 8 km podem ser alcançadas, quando o *gateway* estiver em visibilidade direta com dispositivo final. Sendo assim, os autores salientam que o posicionamento do *gateway* é crítico e deve ser estudado para uma cobertura ideal. Esse trabalho operou em redes móveis veiculares apenas com o rádio

LoRa, sem *mesh*, investigando somente potência dos sinais recebidos em SF 12. Não houve análise de PDR, consumo e taxas de transferência.

3.3 Trabalhos Associados a Redes Aéreas

Os trabalhos relacionados abaixo aplicaram métricas de comparações, de tecnologias sem fio, em redes aéreas com direções iguais ou próximas ao trabalho proposto. A seguir, resumiram-se os mais relevantes, que de fato analisaram desempenho individual dos rádios e aqueles que compararam dois ou mais rádios em redes VANTs.

Em (61), o autor propôs uma FANET para varredura da área de impacto de foguetes, onde foram propostas duas estratégias diferentes para a varredura, e na sequência foram analisadas as características das redes para sistemas multi VANTs mais adequadas a essas estratégias, de forma a fazer uma análise comparativa entre as mesmas e definir uma arquitetura apropriada para a aplicação.

A comparação das estratégias foi realizada com emprego de tecnologias ZigBee empregando o Rádio XBee S3B Pro 900HP, com antena de 1.9 *dBi*, para experimentos em um cenário P2P e em rede *mesh*, conforme Figura 23.

Foram empregados multi VANTs com *baud rate* de 38400 *bps* e 115.200 *bps*, a 80 *m* de altura, em redes *mesh* a distâncias máximas entre 900 e 1100 *m* com uso de VANT intermediário entre 400 a 600 *m* e, também, cenários P2P a distâncias entre 700 e 800 *m*. Para realizar os testes de análise de desempenho, de alcance, RSSI, taxa de transferência e latência, foi utilizada a ferramenta XCTU (62), através do envio de 500 pacotes de 256 *bytes* por 72 vezes. O autor não divulgou potência empregada, os intervalos de envio e o tempo de espera para as confirmações de entrega (ou ACK, do inglês *acknowledgement*).

Para cada cenário analisou-se o desempenho da rede na transmissão de uma imagem de 100 *KB*, onde a rede apresentou comportamento estável ao transmiti-la, com *baud rate* de 115.200 *bps* em um intervalo de tempo médio de 67 *s*. O autor deixa exposto que diversas tecnologias e os protocolos de redes podem melhor se adaptar ao projeto e cita: Wi-Fi, com sua alta taxa de transferência, e LoRa/LoRaWAN, em virtude do seu alcance. Esse trabalho utilizou e mediu essa tecnologia de comunicação na missão proposta, porém não comparou com outros rádios e não mediu consumo de energia.

Em (63), os autores propuseram uma análise de desempenho da coleta de dados aéreas de redes de sensores externos usando ZigBee. Utilizaram uma base externa, examinando fatores como orientação da antena, altitude, posicionamento da antena e obstruções que afetam a intensidade do sinal e a taxa de recepção dos pacotes. Esse estudo empregou rádios XBee3 de 2.4 *GHz*, com 8 *dBm* de potência no envio de 23 *bytes* em intervalos de 0,5 *s*, analisando o desempenho em altitudes que variaram de 15 a 120 *m* em distâncias de 250 a 300*m*, com VANT em velocidade de cerca de 7,2 *Km/h*.

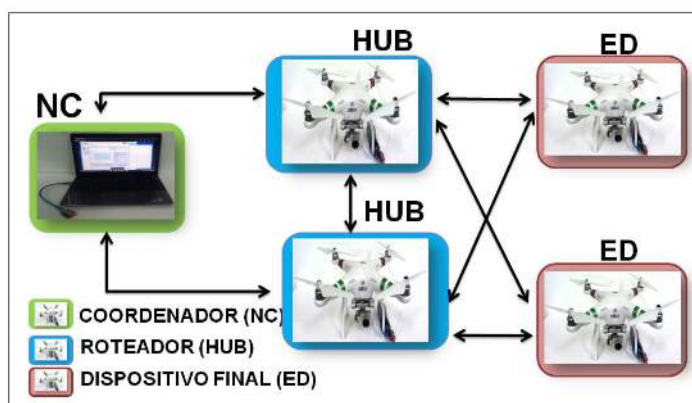


Figura 23 – Estrutura da FANET. Fonte: (61).

Os autores observaram que altitudes de 45 a 75 *m* são ideais, onde o RSSI diminuiu com o grande aumento da altitude do VANT. Também puderam verificar que grandes alturas forneceram melhor conectividade em maiores deslocamentos porque forneceram um ângulo mais acentuado entre o VANT e o transmissor no solo, o que pode ajudar a reduzir o bloqueio do sinal por obstáculos. Adicionalmente, a orientação do transmissor não teve um impacto significativo na recepção e o alcance nominal do rádio XBee utilizado é de 1200 *m*, porém o alcance real do estudo só foi capaz de capturar pacotes a uma distância total máxima de 297 *m*. Esse trabalho não mediu consumo de energia do rádio e usou somente um VANT, não fazendo comparação com outras tecnologias de rádios sem fio.

Em (46), os autores propuseram e analisaram o uso de LoRaWAN como sistema de comunicação de telemetria secundária para uso em VANTs de entrega. A estrutura é composta de um VANT, com um módulo LoRaWAN SX1276 com antena de 2 *dBi*, que se comunica com a estação em terra, composta de um *gateway* LoRaWAN com antena de 3 *dBi* e um servidor LoRaWAN, que coleta e controla as informações, conforme Figura 24.

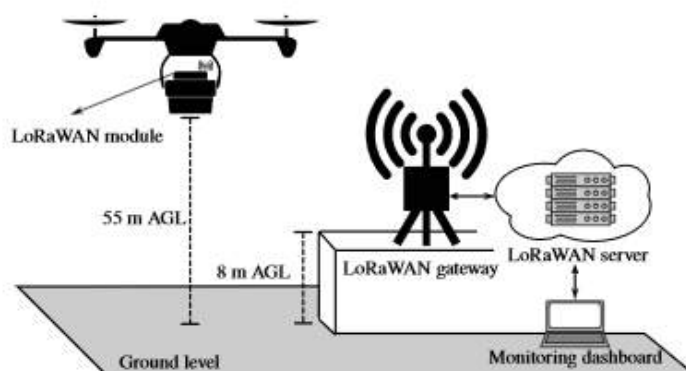


Figura 24 – Arquitetura do sistema para coleta de dados de sensores drones enviados através do módulo LoRaWAN. Fonte: (46).

A avaliação empregou velocidade média de 53 Km/h , altitude cerca de 50 m , em frequência LoRa de 923 MHz , com banda de 125 kHz , CR 4/5, potência em 16 dBm e *payload* que variou de 10/20 *bytes*. Intervalos de envio foram empregados de acordo com as regras de *duty cycle* da região e as distâncias variaram de 100 a 1600 m . Assim, nesses parâmetros, fizeram análise de distância, SNR, taxa de perda e RSSI para diferentes SFs, de 7 ao 12.

Os resultados finais desse estudo mostraram que o LoRaWAN pode ser usado para fins de telemetria de horário semi-real, como uma comunicação de backup para os VANTs, por ser capaz de enviar *payloads* de 10 a 20 *bytes* regularmente com intervalo mínimo de 2 e 3 s . Além disso, em termos de cobertura, os autores deixam exposto que o sistema pode atingir até 8 km em área urbana, utilizando o menor SF, tendo perda de pacotes tolerável de até 5% nesta configuração. Nesse trabalho, houve operação de apenas um VANT, sem emprego de rede LoRa *ad hoc*, não realizando análise de consumo e desempenho com outras tecnologias de rádio.

Em (64), os autores propuseram o uso de tecnologias LoRa combinada a VANT para melhorar a eficiência energética de coleta de dados de 250 sensores em solo. Empregaram um *gateway* baseado em VANT, onde verificaram de forma simulada a taxa de entrega e consumo do rádio LoRa entre a ECS (chamado de *gateway*) e os dispositivos finais e em seguida o mesmo cenário com um VANT (que opera como *gateway* secundário). A aeronave se move, com uma velocidade constante, ao longo de uma órbita circular, de raio de 4 a 6 km , com isso houve o aumento do número de dispositivos finais atendidos pelo *gateway* principal, conforme Figura 25. Foram empregados nesse trabalho simulado, velocidades médias de voo que variaram de 5 a 80 Km/h , frequência do rádio de 868 MHz , banda de 125 kHz , fator SF 7, potência de 14 dBm e *payload* de 8 *bytes*, sem divulgar intervalos de envio dos pacotes. Ao final dos experimentos, os autores mostram que um VANT utilizado como *gateway* secundário permite reduzir o consumo médio de energia para comunicação na rede em até 59%. Porém, dependendo da velocidade do VANT, o desempenho de comunicação em termos de PDR pode aumentar ou diminuir. Nesse trabalho não houve aplicação de multi-VANT *ad hoc*, não analisaram taxa de transferência e não realizou-se comparação de desempenho com outros rádios.

Em (65), os autores apresentaram um estudo de caso de um sistema integrado VANT-LoRa empregado no monitoramento da qualidade do ar em ambiente simulado. Nesse trabalho, foi utilizado um rádio LoRa para sensor do ar e um para comunicação. Testaram oito modelos de mobilidade existentes para investigar o desempenho de cada um deles. Assim, o estudo deu ênfase ao efeito que o número de VANTs e sua velocidade de voo tem no desempenho do sistema. Fizeram simulações, onde o cenário era composto por um *network server*, quatro *gateways* LoRa para cobrir a área completa (40 Km^2), e um número variável de nós LoRa na rede, entre cinco a vinte, conforme Figura 26. Foram empregadas velocidades de 10, 25 e 50 Km/h , em distâncias de 1000 a 1200 m , com banda LoRa de

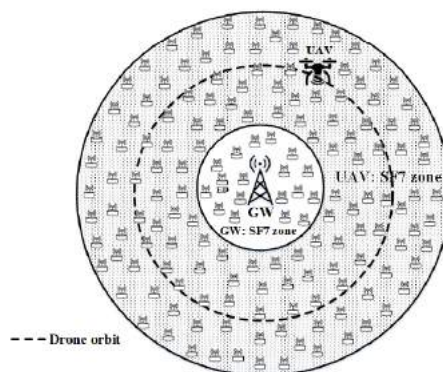


Figura 25 – Estrutura da rede VANT. Adaptado de (64).

125 kHz , com CR 4/5, SF de 7 ao 12, intervalo entre a transmissão de cada pacote de 100 s e com potências que variaram de 2 a 14 dBm . Para os autores a combinação de tecnologias, como VANT e LoRa, é uma tendência atual com maior impacto nos serviços inteligentes do futuro. Esse trabalho concluiu que o melhor modelo foi o “RDmobility”, que minimiza as métricas de rede, como: atraso, jitter e taxa de entrega de pacotes. Nesse estudo em topologia estrela com VANTs, não foi medido alcance dos rádios, consumo de energia e não houve comparação com outras tecnologias de rádios sem fio.

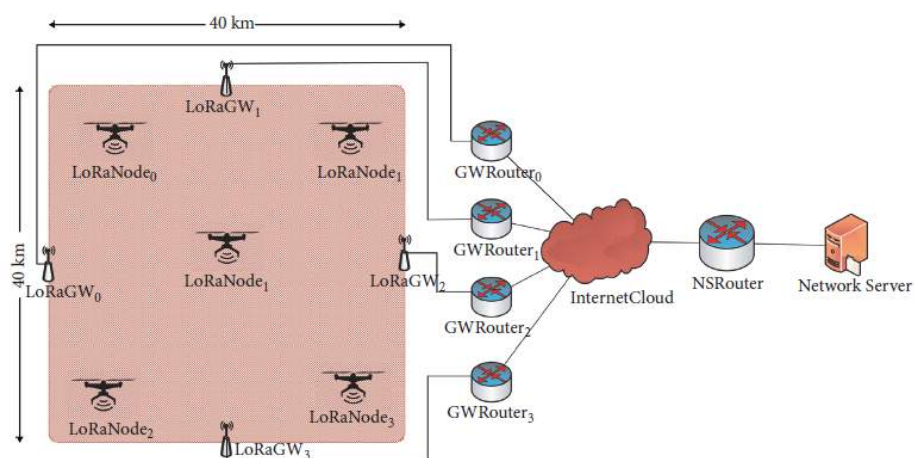


Figura 26 – Estrutura da rede LoRa. Fonte: (65).

Em (66), os autores tiveram como objetivo analisar o desempenho das comunicações FANET com IEEE 802.11n x IEEE 802.15.4, onde inicialmente foi realizada apenas uma breve validação em voo real FANET com 2(dois) VANTs em distância máxima de 2000 m da ECS, a uma altura de 345 m em velocidade de 45/50 Km/h , onde foram analisados tráfego, atraso médio e perda de pacotes com *payloads* que variavam de 54 a 1400 *bytes* (para tráfego de vídeo e comando/control). Os rádios empregados foram o XBee para controle, em faixa de frequência de 900/868 MHz , e Wi-Fi 802.11n para vídeo. Na validação inicial notaram uma grande perda de pacote de controle e conseqüente perda e fragmentação de pacotes de vídeo em virtude da falta de rotas ao destino.

Como experimento principal, analisaram o desempenho das comunicações FANET em ambientes simulados com 16, 32, 64 e 128 VANTs, com duas velocidades (25 e 50 m/s) operando em estrela e em *mesh*, com uso do protocolo AODV, comparando sucesso da transmissão dos pacotes e atrasos até o destino. Esse estudo verificou que a rede em estrela é afetada pela alta densidade e velocidade dos VANTs, que impactam negativamente na taxa de entrega de pacotes e no atraso. Assim, a rede em estrela usou mais recursos e ocorreram mais colisões; já em *mesh* com IEEE802.11n foi mais confiável nas rotas e entrega do que em estrela e, adicionalmente, apresentaram que o desempenho do IEEE 802.15.4 não foi tão melhor quanto o IEEE 802.11n na topologia *mesh*. Esse trabalho não comparou tecnologias LoRa e não fez análise de consumo e alcance dos rádios. Os autores sugerem que topologia *mesh* seja objeto de estudo futuro em IEEE 802.15.4, devido ao baixo custo, baixo consumo de energia e alta conectividade.

Em (6), os autores examinaram comunicações IoT ultra confiáveis com enxame de VANTs, onde foram realizadas análises de confiabilidade, na entrega de pacotes, para avaliar a qualidade das comunicações VANT LoRa e VANT Wi-Fi em cenários rurais e VANT com uso de rede LTE (do inglês *long term evolution*), em área urbana. O primeiro experimento qualificou a confiabilidade do link único de LTE, LoRa e Wi-Fi, com um único VANT que voa para longe da antena LTE em seguida do *gateway* LoRa e do Wi-Fi, separadamente, em distâncias de 10 a 2500 m , a 100 m de altura e em velocidade de cerca de 10,8 Km/h . O segundo experimento analisou o atraso da comunicação entre 10 VANTs, em topologia estrela, conectados via LoRa, Wi-Fi e LTE.

A Figura 27 apresenta os resultados do primeiro experimento, onde observou-se que 100% de confiabilidade é alcançada até 320 m e 40 m para LoRa e Wi-Fi, respectivamente. Em um único VANT conectado via LTE, os resultados mostram que LTE na área urbana oferece comunicações ultra confiáveis, de 100%, dentro de 2500 m . Nos resultados do segundo experimento, os VANTs conectados via LTE fornecem um menor atraso em comparação com LoRa e Wi-Fi, com latência média de 19 ms . Os autores descobriram que o alcance do LoRa é oito vezes maior que Wi-Fi, porém mostram que LTE oferece melhor confiabilidade em comparação com o LoRa e Wi-Fi.

Como trabalhos futuros os autores sugerem a análise em rede *ad hoc*, pois geram caminhos e evitam quebras de links. Esse estudo realizou comparações entre três rádios com topologia estrela, sem emprego de redes *mesh*, e não expuseram os parâmetros LoRa utilizados. Adicionalmente também não analisaram o consumo entre os rádios, suas taxas de transferência e não investigaram tecnologias ZigBee.

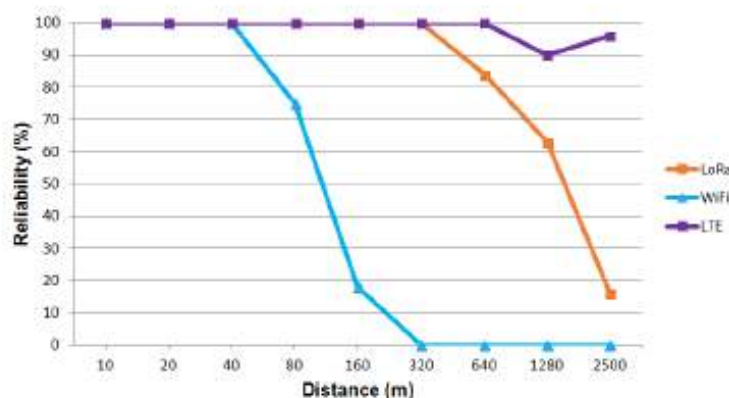


Figura 27 – Confiabilidade de rede de um VANT via LoRa, Wi-Fi e LTE. Fonte: (6).

3.4 Comparativo de Trabalhos Relacionados

Os trabalhos citados mostram que uma tecnologia apropriada deve ser selecionada de acordo com cada objetivo, buscando qualidade e projetando um esquema de comunicação de longo alcance, baixo consumo e boa capacidade de transmissão, além de diversas outras métricas. Sejam em redes fixas ou móveis, avaliar o desempenho da rede após ela ser projetada é um aspecto muito importante de acordo com os trabalhos relacionados.

Com a pesquisa bibliográfica realizada foi possível identificar que muitos estudos apontam diferentes formas de análise das performances de rádios em redes fixas, veiculares e redes aéreas, contudo fazem análise em aplicações específicas, sendo que poucos fazem análise prática comparativa entre rádios ou mesmo estes aplicados a ambientes similares a redes VANTs *ad hoc*. Alguns trabalhos como (37), (67) e (68), embora de interesse desta dissertação apresentaram contribuições pontuais e por questões de pouca similaridade não foram expostos. A Tabela 3, apresenta uma comparação dos trabalhos evidenciados com a abordagem proposta na presente dissertação.

3.5 Considerações sobre o Capítulo

Este capítulo apresentou uma revisão da literatura relacionada ao tema desta dissertação, onde autores analisaram os desempenhos dos rádios deste estudo de variadas formas em diferentes tipos de redes, com métodos de trabalhos semelhantes ao aqui proposto. O capítulo seguinte apresenta uma descrição formal do problema alvo deste trabalho, definindo o domínio da avaliação e delimitando o escopo do trabalho.

Tabela 3 – Tabela comparativa dos trabalhos relacionados.

	LoRa				ZigBee				Rede						
	Alcance ¹	Taxa de traf ²	Consumo ³	Outros ⁴	Alcance ¹	Taxa de traf ²	Consumo ³	Outros ⁴	Rede FIXA-P2P	Rede FIXA-AD HOC	Rede VEICULAR-P2P	VANET	Rede VANT-P2P	FANET	Divulgou prot. roteamento
(55)*	•	•		•	•	•		•	•						
(56)	•	•		•	•	•		•	•	•					•
(52)	•	•		•	•	•		•	•						
(57)*						•		•				•			•
(58)						•		•			•	•			
(59)	•	•		•								•			•
(60)	•			•							•				
(61)					•	•		•					•	•	•
(37)						•		•					•		
(63)					•	•		•					•		
(67)	•	•											•		
(68)	•	•		•									•		
(46)	•	•		•									•		
(64)	•	•	•	•									•		
(65)		•		•									•		
(66)*						•		•					•	•	•
(6)*	•			•									•		
Este trabalho	•	•	•	•	•	•	•						•	•	•

Redes: Fixas Comunicação veicular Comunicação aérea Esta dissertação

- 1 **Alcance** – executou análise da distância em que a comunicação com o rádio chegou.
- 2 **Taxa de transferência** -fez análise da quantidade de bits enviados ou da taxa de entrega ou falha dos dados.
- 3 **Consumo** – analisou o consumo de energia da tecnologia de comunicação empregada.
- 4 **Outros** – fez análise por meios de outras métricas como, por exemplo RSSI, SNR e outros.
- * Compara desempenho da tecnologia de comunicação exposta com outras não especificadas.

4 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE COMUNICAÇÃO PARA FANET

Neste capítulo, é apresentado o enunciado do problema, que consiste na identificação das características de comunicação relevantes para as redes aéreas móveis, com emprego potencial em diferentes missões em FANET. Na sequência, é exposta a avaliação proposta com os rádios ZigBee ou LoRa empregados, suas especificações e quais parâmetros foram selecionados, em ambos os rádios, de forma a equiparar os processos experimentais que foram detalhados e expostos ao final do capítulo.

4.1 Caracterização do Problema

Para (8), a seleção da tecnologia de comunicação deve ser feita levando-se em consideração cada objetivo a ela destinado tendo como base um equilíbrio de variáveis como largura de banda, alcance, requisitos de energia, velocidade, compatibilidade, carga útil e custo. De acordo com os trabalhos pesquisados diversas tecnologias de comunicação podem ser empregadas em diferentes demandas em FANET, ao contrário das redes fixas e comparando-se com as MANET, as FANET possuem uma dinâmica complexa e com características específicas como: alta mobilidade em 3D, baixa densidade dos VANTs, conectividade de rede intermitente, que trazem desafios ao processo de comunicação. Também, fruto dessa complexidade, o desempenho das comunicações tende a destoar das especificações previstas pelo fabricante das tecnologias de rádio, impactando no desempenho da missão.

De acordo com (65), ainda não existe um padrão para avaliar o desempenho dessas tecnologias ou combinação delas e, com isso, a escolha da tecnologia de comunicação sem fio a ser empregada pode ocasionar em um maior ou menor consumo de energia, propagação do rádio, alcance, banda de dados entre outros pontos que afetarão aos objetivos previstos de uma FANET, gerando diversificadas combinações, como aumento da capacidade de transferência na rede, mas reduzindo o alcance e aumentando o consumo de energia. Ao contrário da avaliação do desempenho de rádios em objetivos específicos tanto para redes fixas, quanto veiculares, como para redes aéreas, a avaliação de desempenho proposta objetiva comparar, em ambientes próximos a uma FANET, as tecnologias LoRa e ZigBee, visando proporcionar, com base em resultados práticos, o processo de escolha de quais rádios poderão ser empregados para diferentes missões nessas redes *ad hoc* aéreas, com seus ganhos e melhorias no desempenho em relação à determinadas métricas como um maior alcance, menor consumo e taxa de entrega de dados adequada ao cumprimento do propósito de diferentes missões com emprego de uma FANET.

4.2 Método Proposto de Avaliação

Para a análise de desempenho das tecnologias de rádio investigadas foi proposto um conjunto de experimentos práticos para avaliar o consumo, taxa de transferência, taxa de entrega e tempo gasto, em bancada e em ambiente externo, sendo esses organizados e descritos na seção 4.3. A intenção foi comparar e avaliar o uso dessas tecnologias em ambientes próximos a uma FANET multimissão, que podem incluir controle e telemetria ou outros como o envio de dados de sensoriamento. Para esse estudo, foram empregadas tecnologias de rádios ZigBee e LoRa, que possuem similaridades em relação ao seu baixo consumo, taxa de transferência e alcance, sendo elas: XBee-PRO S3B e LoRa RD42C.

4.2.1 Módulo RF XBee-PRO S3B

São módulos de rádio baseados no padrão ZigBee, IEEE 802.15.4, com suporte a redes *mesh*, sendo homologados no Brasil pela Anatel. Segundo (69), esse rádio exposto na Figura 28, possibilita o emprego do protocolo proprietário *DigiMesh*, empregado neste estudo, onde cada nó coopera na transmissão de informações sendo baseado em protocolos dinâmicos reativos AODV como descrito na subseção 2.2.3. Esses rádios operam de forma *half-duplex* e suas principais especificações são expostas na subseção 4.2.3. Abaixo, são apresentadas características relevantes deste rádio, que complementam a base teórica apresentada na subseção 2.3.1.



Figura 28 – Rádio XBee-PRO S3B (modelo XBP9BDMWT-012), com antena omnidirecional *wire* de 1.9 *dBi*. Fonte: (69).

Fator de espalhamento: embora utilize como base o padrão IEEE 802.15.4, que tem como fator de espalhamento o DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), o rádio XBee-PRO S3B utiliza o fator de espalhamento FHSS (*Frequency-Hopping Spread Spectrum*).

Modulação: ao contrário do BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), em que a amplitude e a frequência permanecem constantes, a modulação deste rádio é por chaveamento de frequência (ou FSK, do inglês *frequency shift keying*), também chamada de modulação por chaveamento de frequência binária (ou BFSK, do inglês *binary frequency shift keying*). Conforme (70), é uma das formas mais simples de modulação digital, com a variação da

frequência do sinal transmitido em um pulso do relógio indicando um símbolo. A modulação atribui frequências diferentes para a portadora em função do bit que é transmitido.

Arquitetura de operação: segundo (69), o XBee-PRO S3B usa uma base de *firmware* em várias camadas para ordenar o fluxo de dados, dependendo da configuração de hardware e software escolhida. A Figura 29 apresenta o diagrama de blocos de configuração, com a interface serial do *host* como o ponto de partida físico e a antena como o ponto final físico para os dados transferidos. A interface serial do rádio faz ligação com um dispositivo *host* por meio de uma porta serial, que poderá ser conexão UART (*universal asynchronous receiver/transmitter*), ou por meio da interface SPI (*serial peripheral interface*).

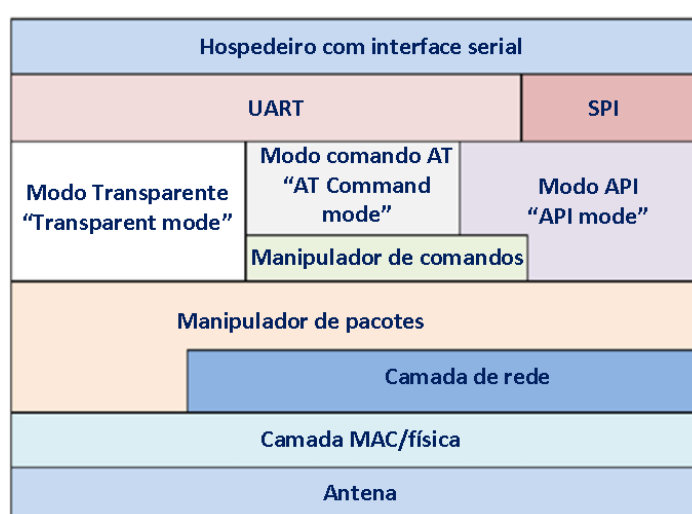


Figura 29 – Diagrama de blocos de configuração do XBee-PRO S3B. Adaptado de (69).

De acordo com (69), os modos de operação do XBee (descritos na Figura 29) são:

- MODO TRANSPARENTE (*TRANSPARENT MODE*): modo padrão, no qual o dispositivo enfileira os dados recebidos via entrada serial para envio por radiofrequência (RF). Por outro lado, quando recebe dados via RF, os envia através da interface serial;
- MODO COMANDO AT (*AT COMMAND MODE*): é um modo no qual o *firmware* interpreta os caracteres de entrada como comandos, possibilitando que sejam feitas modificações de configuração do dispositivo usando parâmetros (definidos como *AT*);
- MODO API (*API MODE*): permite o gerenciamento de redes maiores, sendo mais apropriado para coletar dados de vários locais ou controlar vários dispositivos remotamente; permite comunicações estruturadas com dispositivos seriais. Segundo (69), pode ser utilizado em combinação com dispositivos no modo transparente.

Ainda conforme os blocos da Figura 29, o MANIPULADOR DE COMANDOS processa os comandos AT ou as informações do modo API e também age em comandos de rádios

remotos e comandos AT remotos. Já o MANIPULADOR DE PACOTES é responsável por encaminhar os pacotes à camada de rede para descoberta de rotas em caso de emprego de protocolo *DigiMesh* ou, em caso de outro protocolo, encaminhar o pacote diretamente à camada MAC, sendo ela responsável por enviar e receber quadros RF. Por fim, a CAMADA FÍSICA define as características físicas e elétricas da rede, gerenciando a modulação e demodulação dos bits de RF para transmissão pela antena.

Modo de operação: de acordo com (69), quando o rádio não está recebendo ou transmitindo, o dispositivo está no MODO DE ESPERA, onde “escuta” os dados válidos nas portas RF e seriais. Em operação, o dispositivo dispõe dos seguintes modos: (i) MODO DE TRANSMISSÃO - quando um dado é recebido no *buffer* de entrada serial, o manipulador de pacotes faz o empacotamento para transmissão ao destino; (ii) MODO DE RECEPÇÃO - padrão para o módulo XBee-PRO S3B, quando não está transmitindo via RF, assim, se um nó de destino recebe um pacote de RF válido, o transfere para seu *buffer* de transmissão serial; e (iii) MODO DE COMANDO - não transmite dados, espera uma sequência de comandos para realizar alguma configuração no módulo (não disponível em SPI). O modo de operação em transmissão empregando o protocolo *DigiMesh* segue o fluxograma descrito na Figura 30, tendo como base o protocolo AODV, onde os dados serão transmitidos uma vez que uma rota seja estabelecida, ou descartado caso não encontre uma rota.

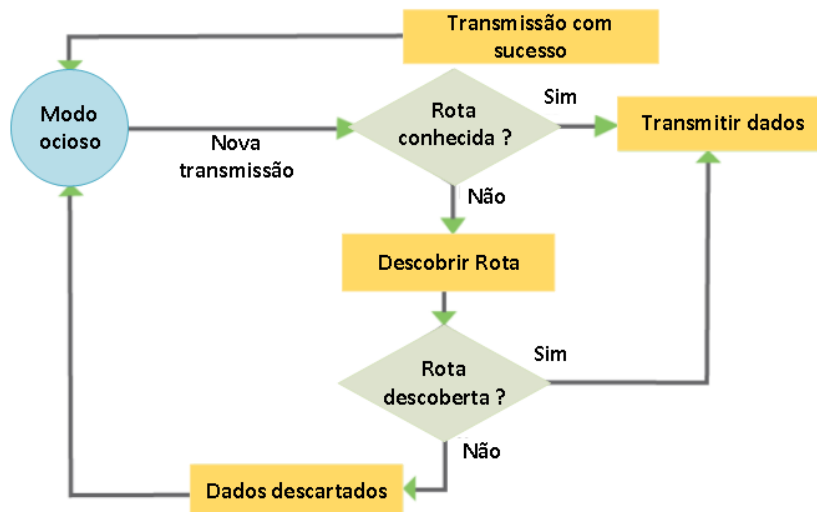


Figura 30 – Modo de transmissão do rádio XBee-PRO S3B com protocolo *DigiMesh*. Adaptado de (69).

Características empregadas: para esta avaliação, foram empregados 4 rádios XBee-PRO S3B operando com protocolo *DigiMesh*, onde o rádio 0 “coordenador”, presente na ECS foi configurado, via software XCTU (62), para “API mode”, sendo responsável por transmitir ao roteador um pacote do tipo “*transmit Request*”, via código Python rodando em uma unidade de processamento similar a de um VANT. Os demais rádios “roteadores” foram configurados em “*transparent mode*” e, quando recebem pacotes do “coordenador”, em transmissão síncrona, os respondem com “ACK”, através de um pacote “*received packet*”,

também via código Python embarcado. Esses processos serão vistos com mais detalhes nas seções seguintes. A partir deste ponto, esse rádio será referenciado como XBee.

4.2.2 Módulo RF LoRa RD42C

O módulo LoRa RD42C (42), que utiliza chipset LoRa SX1276 (49), é um rádio baseado na tecnologia LoRa que implementa a arquitetura *mesh*, homologado no Brasil pela Anatel. Esse rádio herda as características descritas anteriormente na subseção 2.3.2, como por exemplo a largura de banda ajustável, fatores de espalhamento selecionáveis, que variam do SF7 ao SF12, com potência de transmissão, que podem chegar até 20 *dBm*, conforme especificado na Tabela 4 da subseção 4.2.3. Segundo (43), esse rádio apresentado na Figura 31 utiliza o protocolo de roteamento proprietário *LoRaMesh*, empregado neste estudo, baseado em protocolos dinâmicos reativos AODV. Esses rádios trabalham de forma *half-duplex* e operam em faixa de frequência de 902 a 928 *MHz*, não ajustável, com taxa de dados de até 21,9 *Kbps*. Além disso, utiliza 2 classes de economia de energia: classe A, onde o módulo opera com baixo consumo de energia e não participa da rede *mesh*; e Classe C, onde o módulo não economiza energia e participa da rede *mesh* ativamente.



Figura 31 – Rádio LoRa RD42C, com antena omnidirecional de 2.15 *dBi*. Fonte: (43).

Características empregadas: para este estudo foram empregados 4 rádios deste modelo, todos operando com protocolo *LoRaMesh* em Classe C, sendo o rádio 0 “coordenador”, presente na ECS, configurado, via software *LoRaMesh-6R12* (42), com a identificação de rádio 0, conforme (43). Salienta-se, como descrito para o XBee na subseção anterior, que esse “coordenador” também será responsável por transmitir, via código Python, rodando em uma unidade embarcada, com 232 *bytes* de *payload*, que é o máximo de *payload* permitido neste rádio. Os dados são transmitidos por meio de um pacote chamado de “transparente”, conforme (43), que envia os dados para a interface serial transparente do rádio destino. Os demais rádios, “roteadores”, foram configurados com números sequenciais

e, também quando necessário, respondem ao “coordenador” com pacotes “ACK”. Os outros parâmetros desse rádio, empregados nesta dissertação, foram expostos na subseção 4.2.3. A partir deste ponto, esse rádio será referenciado como LoRa.

4.2.3 Síntese das Tecnologias e Considerações

A Tabela 4 apresenta características dos rádios empregados nesta avaliação quanto à especificação dos fabricantes do rádio XBee-PRO S3B (69) e LoRa RD42C (43). Visando equiparar ou aproximar as condições de análise de ambos os rádios, a Tabela 5 apresenta os parâmetros, de forma geral, empregados nos experimentos expostos nas próximas seções. Foram realizadas investigações com taxa de transmissão de 9600, 38400 e 57600 *bps*, *payload* de 232 *bytes*, visando igualar com o carga máxima suportada pelo LoRa (43).

Para o XBee foram selecionadas potências em PL0, menor deste rádio, com valor aproximado de +7 *dBm*, e PL3, de +21 *dBm*, utilizando protocolo *DigiMesh*, e além disso, o uso da banda de 400 *kHz*, não ajustável, bem como o SF e CR, não configuráveis. Para o LoRa foram realizadas análises mantendo a potência semelhante à utilizada no XBee, utilizado +7 *dBm* e +20 *dBm*, sendo esta última a potência máxima suportada por este rádio. Alguns parâmetros não puderam ser equiparados, sendo eles: CR, ajustável no LoRa, sendo empregado 4/5; e fatores de espalhamento, em virtude da impossibilidade de configuração do SF nos rádios XBee, foram então utilizados 2 fatores, o menor disponível, SF7, e um fator mediano, SF9, ambos com uso de banda próxima a do XBee, de 500 *kHz*.

De acordo com as fórmulas LoRa observadas na subseção 2.3.2, este estudo empregou para SF7 e SF9, 8 símbolos de preâmbulo, CRC habilitado e ocupando a faixa central “AU915 MHz”, homologada para o Brasil e utilizando o *payload* máximo de 232 *bytes*. Com esses parâmetros e utilizando a calculadora *LoRa Modem calculator Tools*, do *chipset* do rádio (71), os dados foram inseridos e os resultados estimados calculados, para SF7, da taxa de bits teórica e ToA foram respectivamente: 21875 *bps* e 90,94 *ms*. Enquanto o uso dos mesmos parâmetros supracitados com uso do SF9, os resultados de taxa de bits e ToA foram respectivamente: 7031 *bps* e 286,98 *ms*.

Considerações sobre a avaliação proposta: o objeto desse estudo foi a verificação do desempenho das tecnologias supracitadas aplicadas a ambientes bastante similares ao de redes FANETs. Contudo não foram contemplados nesta avaliação nenhum dos fatores que influenciam a comunicação digital, apenas os resultados das interações dos rádios nos diversos cenários planejados. Logo, não é possível construir hipóteses, neste estudo, acerca de tais fatores e sobre as respectivas influências no canal utilizado para estabelecer as comunicações. Salienta-se, também, que os experimentos expostos nas próximas seções foram realizados separadamente para cada rádio, com a intenção de evitar possíveis interferências quanto à faixa de frequência similar de ambos os rádios.

4.3 Processo Experimental

Os experimentos foram organizados para obter resultados parciais de desempenho prático de cada rádio, XBee e LoRa, quanto à corrente e consumo energético, suas taxas de transferência, PDR (*Packet Delivery Ratio*) e os seus alcances em diferentes cenários. Inicialmente, foram realizados experimentos em bancada (ou HIL, do inglês *hardware-in-the-loop*) em P2P com diferentes taxas de transmissão e potência. Na sequên-

Tabela 4 – Comparativo dos rádios: XBee-PRO S3B e LoRa RD42C, segundo os respectivos fabricantes. Fonte: (69) e (43).

	XBee PRO S3B	LoRa RD42C
Protocolo de Roteamento	DigiMesh	LoRaMesh
Banda (Khz)	400*	125 / 250 / 500
Faixa de frequência (Mhz)	902 a 928	902 a 928
Fator de Espalhamento	FHSS*	CSS (SF7 ao SF12)
Modulação	FSK	LoRa
Coding Rate	-	4/5 , 4/6, 4/7 e 4/8
Taxa de transmissão de RF (Kbps)	200	até 21,9 ¹
Potência de transmissão (dBm/mW)	PL0: +7 / 5 PL1: +15/ 32 PL2: +18 / 63 PL3: +21 / 125 PL4: +24 / 250	1 a 20/ 100(máximo)
Alcance interno/área urbana	305m	O fabricante não informa.
Alcance externo	Até 6.5Km ²	O fabricante não informa.
Tensão de alimentação (V)	2,1 a 3,6	1,8 a 12 (com regulador) / 1,8 a 3,6 (sem regulador) / normal 3.3.
Corrente de transmissão (mA)	PL4: 215 padrão - 290 máx. PL3: 160 PL2: 120 PL1: 95 PL0: 60	111
Corrente apenas alimentado (mA)	29 a 35	O fabricante não informa.
Corrente de recepção (mA)	29 a 35	20
Interface de comunicação	UART e SPI	UART
Taxa de transmissão serial (bps)	2400 4.800 9.600 19.200 38.400 57.600 115.200 230.400	9.600 38.400 57.600
Taxa de transferência (Kbps)	Digimesh ³ : unicast, 1 salto: 91,0 unicast, 3 saltos: 32,5 unicast, 6 saltos: 16,7	O fabricante não informa.
Antena empregada (dBi)	Wire integrada omnidirecional: 1,9	Angular omnidirecional: 2,15
Criptografia	<i>Advanced Encryption Standard</i> (AES) de 128bits ou sem.	uso de senha ou sem ⁴

Legenda:

* Não configurável.

1 Não configurável, porém varia conforme banda, SF e CR; taxa máxima para 500Khz, em SF7 e CR 4/5.

2 Estimativa com antena de 2,1dBi, em terreno livre com linha de visada e fontes limitadas de interferência.

3 Medições com transferências sem criptografia, com taxa de transmissão de 115200 bps com envio de 100 KB.

4 Fabricante recomenda a criptografia por aplicação.

Tabela 5 – Seleção dos parâmetros dos rádios, XBee-PRO S3B e LoRa RD42C, empregados neste estudo.

	Taxa transmissão (bps)	Larg. banda (KHz)	Potência (dBm)	Protocolo	SF	Payload (bytes)	CR	Tensão (V)	Interface
XBee PRO S3B	9600 38400 57600	400 ¹	PL0: +7 PL3: +21	DigiMesh	1	232	1	3.3	UART
LoRa RD42C	9600 38400 57600	500	+7 +20(max.)	LoRaMesh	SF7 SF9	232	4/5	3.3	UART

Legenda:

1 Não configurável.

cia, foram realizados testes em ambiente externo com interação humana (ou HITL, do inglês *human-in-the-loop*) para investigar as taxas de transferência, PDR e tempo de envio dos rádios em área urbana aberta, com simulações discretas de movimento de até 500 m, em topologia P2P operando de forma síncrona e assíncrona quanto ao envio de pacotes e sua confirmação de recebimento. Por fim, foi empregada a avaliação dos rádios em modo assíncrono em P2P e em rede *mesh*, com simulações discretas de movimento de 500 até 1250 m, buscando aproximar-se da etapa de uma possível FANET. Os experimentos são descritos resumidamente a seguir:

Experimentos *Hardware-in-the-Loop*:

- **HIL-01:** para análise das médias de corrente e consumo dos rádios em bancada, P2P, em diferentes potências e taxas de transmissão, em cenários, com o rádio apenas alimentado, de envio, recepção e ambas as operações enviando e esperando pacote de confirmação de entrega; e
- **HIL-02:** para análise da taxa de transferência, PDR e tempo em bancada, P2P, utilizando envio síncrono, com “ACK”, com diferentes potências e taxas de transmissão.

Experimentos *Human-in-the-Loop*:

- **HITL-01:** análise de forma síncrona, em ambos os rádios, da taxa de transferência, PDR e tempo em ambiente externo, P2P, com variações de distâncias em área urbana aberta, para diferentes potências e taxas de transmissão;
- **HITL-02:** experimentos com ambos os rádios em modo assíncrono em P2P, com a análise de entrega dos pacotes realizada no rádio de destino, apenas em distâncias limítrofes;
- **HITL-03:** analisar a latência e PDR, apenas do rádio LoRa, de forma assíncrona em P2P nas distâncias de 500 e 800 m, empregando diferentes intervalos de envio e analisando os respectivos PDRs obtidos, empregando 57600 bps;

- **HITL-04:** teve a finalidade de analisar ambos os rádios de forma assíncrona em P2P, quanto ao PDR, com potências e cenários equiparados a 57600 *bps*; e
- **HITL-05:** investigar os rádios de forma assíncrona quanto ao PDR, taxas de envio, tempo de envio e recepção dos pacotes em simulações discretas de movimentos em distâncias utilizando rede P2P e rede *mesh*, com 1 a 2 nós intermediários, todos a 57600 *bps*, com potências e cenários equiparados.

4.3.1 Experimentos *Hardware-in-the-Loop*

HIL-01 - Análise Energética em Bancada

OBJETIVO: analisar em bancada as médias de corrente e consumo de energia dos rádios quando estão apenas alimentados, transmitindo, recebendo e realizando ambas operações empregando os rádios com as taxas e parâmetros descritos na subseção 4.2.3.

ESTRUTURA NECESSÁRIA: para a análise proposta foram empregados os seguintes hardwares, conforme diagrama esquemático da Figura 32: 2 rádios XBee-PRO S3B com antena *Wire* de 1.9 *dBi*; 2 rádios LoRa RD42C com antena de 2.15 *dBi*; fontes de alimentação externas; 1 medidor de corrente DC INA219 I2C; 1 Arduino nano; 1 notebook; e computadores Raspberry Pi3 Model B, semelhante a unidade de processamento empregada em VANTs.

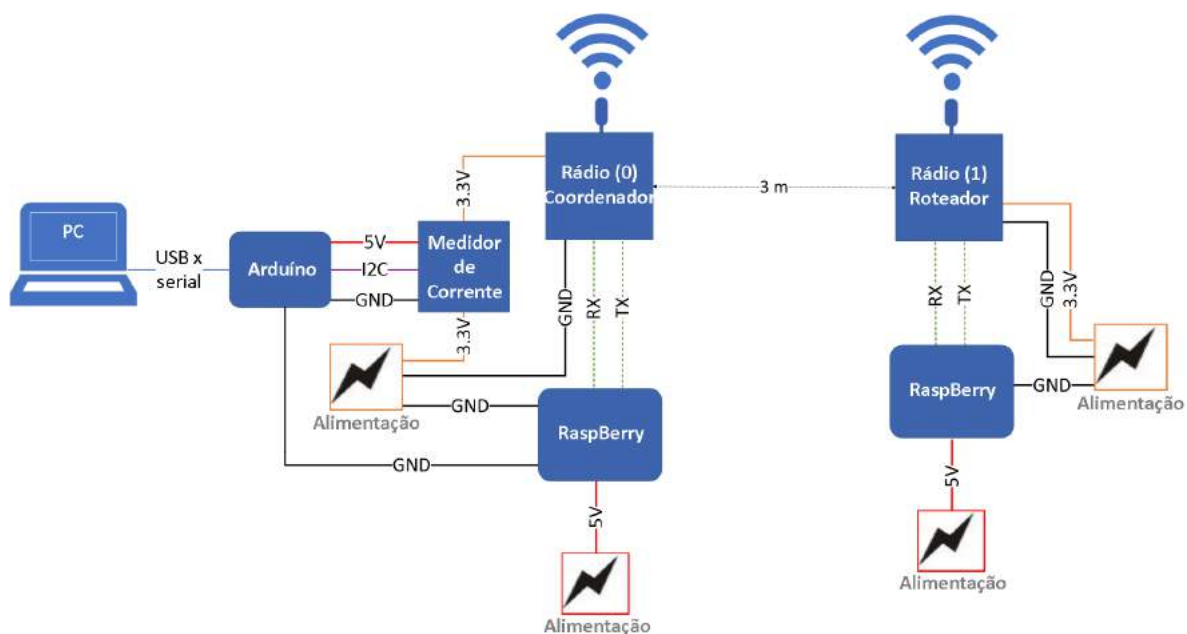


Figura 32 – Diagrama esquemático do experimento HIL-01.

Para os dois rádios, os pacotes de dados gerados pela execução do código Python no Raspberry Pi são enviados a interface UART TX do rádio 0 “coordenador” e assim são

transmitidos ao destino, *rádio* 1 “roteador”, enquanto a recepção tem o processo inverso, os dados oriundos do *rádio* 1 são repassados a UART RX do Raspberry e lidos pelo código Python em execução. As análises foram realizadas separadamente para cada tecnologia e o esquema detalhado de ligação foi similar para ambos, com diferenças apenas associadas às conexões dos rádios à GPIO (do inglês *general purpose input/output*) de alimentação/GND e UART RX/TX do Raspberry Pi3 Model B, conforme explanadas em detalhes das ligações do XBee e LoRa, em conjunto, na Figura 33. O medidor INA219 tem o papel de interceptar as correntes e tensões remetidas aos rádios e repassá-las ao Arduino Nano, utilizando conexões de dados seriais, que tem o papel de receber esses dados e repassar ao notebook, via cabo USB x serial à taxa de transmissão de 57600 *bps*. O Raspberry Pi3 Model B realiza o processamento e execução dos códigos Python de transmissão, recepção e ambas as atividades dos rádios, para que o Arduino inicie e pare as medições de corrente e consumo.

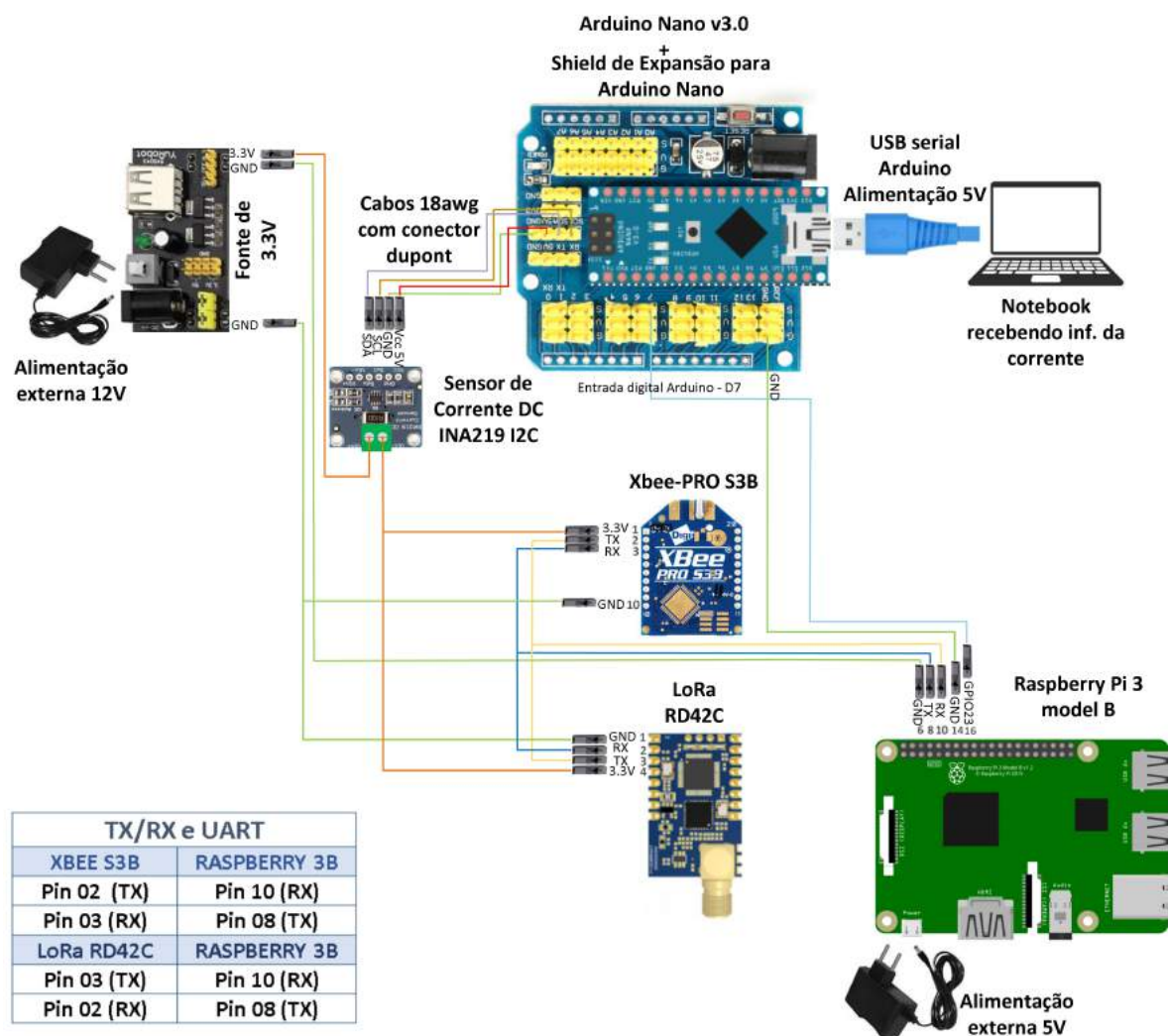


Figura 33 – Diagrama de ligação HIL-01, do *rádio* 0 (coordenador), XBee e LoRa.

Os códigos de envio e recepção, em Python, foram iguais para ambos os rádios, com pequenas adaptações conforme as particularidades dos quadros de cada rádio. Quanto

às taxas de transmissão, foram realizados os testes de corrente e consumo em diferentes velocidades: 9600, 38400 e 57600 *bps*, sendo esta última mais comum no emprego da comunicação com a controladora de voo do VANT.

DESCRIÇÃO DO PROCESSO: inicialmente, as medições ocorreram com os rádios apenas “alimentados”, chamados de *cenário 0*. Para tal, não foi utilizado nenhuma interação com códigos Python no Raspberry, apenas foi carregado um outro código fonte no Arduino para obter, em ambos os rádios, 250 medições de correntes e tensões que passam pelo sensor INA219 conectado aos rádios, uma medição a cada 200 *ms*, sem estes estarem realizando qualquer atividade de TX ou RX.

Quanto aos cenários em operação, o Arduino interagindo com os códigos Python no Raspberry faz a leitura das correntes e tensões que passam pelo sensor INA219 e as repassa para processamento a cada 13,5 *ms*. Os rádios ficaram a distâncias de cerca de 3 *m* cada, com visada direta, sendo utilizados *payloads*, iguais, de 232 *bytes*, conforme descrito na subseção 4.2.3. Além disso, ainda na configuração inicial para os experimentos, o rádio LoRa apresentou uma maior discrepância de latência no envio dos pacotes em relação ao rádio XBee. Para normalizar os resultados, com foco na avaliação de consumo, apenas para o LoRa nos cenários 1 e 2, foi definido um intervalo de 0,5 *s* entre cada pacote enviado. Um experimento, apresentado nos resultados, avaliou essa restrição do rádio LoRa quanto aos intervalos de envio e PDR.

Os cenários foram realizados separadamente em cada taxa de transmissão, analisando as corrente e consumo, dentro dos tempos gastos por cada rádio empregando os parâmetros expostos na Tabela 5 (vide subseção 4.2.3). Primeiramente, os 2 rádios XBee e 2 LoRa foram configurados, conforme descrito nas características empregadas na subseção 4.2.1 e 4.2.2, respectivamente, em seus *rádios 0* como “coordenadores” e os *rádios 1* como “roteadores”, conforme Figura 32. Na sequência, os cenários empregados foram:

- **Cenário 0 - média de corrente e consumo de energia apenas alimentado:** neste cenário, foi monitorado o *rádio 0* “coordenador”, XBee ou LoRa, estando esses apenas alimentados, sem nenhuma operação de TX/RX;
- **Cenário 1 - média de corrente e consumo de energia no envio de pacotes:** foi monitorado o *rádio 0* “coordenador” enviando 50 pacotes ao *rádio 1* “roteador”;
- **Cenário 2 - média de corrente e consumo na recepção:** monitoramento no *rádio 0* “coordenador” recebendo 50 pacotes oriundos do *rádio 1* “roteador”; e
- **Cenário 3 - média de corrente e consumo em atividades de envio e recepção:** monitoramento onde o *rádio 0* faz o envio de 50 pacotes ao *rádio 1* e espera a recepção dos pacotes “ACK”, de 9 *bytes*, gerados no *rádio 1*. O tempo máximo de espera da resposta “ACK” foi estipulado em até 1 *s*.

HIL-02 - Análise de Transferência em Bancada

OBJETIVO: analisar em bancada, em P2P com modo de envio síncrono, as taxas de transferência, PDR e tempo gasto pelo XBee e LoRa com configurações similares de parâmetros de potência e taxas de transmissão predefinidas anteriormente.

ESTRUTURA NECESSÁRIA: a estrutura utilizada foi similar à empregada no HIL-01 desta subseção, porém para a análise de taxa de transferência, PDR e tempo no envio de determinadas quantidades de pacotes, foram empregados hardwares, conforme Figura 34. Neste experimento o *rádio 0* foi conectado a um adaptador USB, que permitiu alimentar e conectar a TX/RX, XBee ou LoRa, diretamente ao Notebook, sem a necessidade de ligações a UART ou alimentações externas. O *rádio 0* enviou e recebeu os pacotes através do código Python e, também, passou por análise, realizada no mesmo código, de taxa de transferência, sobre o *payload*, PDR e tempo de ida e volta dos pacotes e suas confirmações de entregas, ao mesmo tempo em que o *rádio 1*, ficou alimentado por uma fonte externa e ligado ao Raspberry, pela interface TX/RX de dados, quando recebeu pacotes endereçados a ele e os respondeu com envios de pacotes “ACKs”.

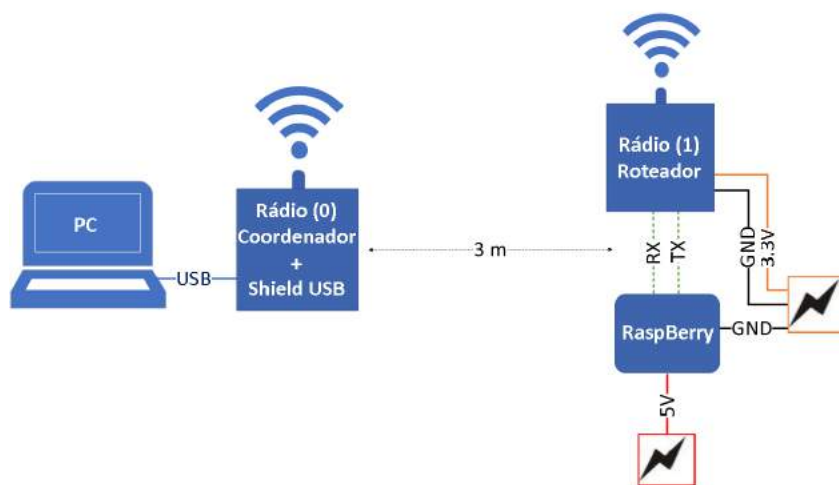


Figura 34 – Diagrama esquemático do experimento HIL-02.

DESCRIÇÃO DO PROCESSO: nesta segunda etapa do HIL, quanto à taxa de transferência e PDR, a investigação transcorreu em três cenários com envio de 50, 200 e 500 pacotes de 232 bytes, para cada rádio, analisando os resultados de acordo com alteração de diferentes taxas de transmissão, potência e fator de espalhamento destes. Apesar da precisão dos rádios, cada cenário de envio: de 50, 200 e 500 pacotes foi realizado 5 vezes, com intervalo de 8 s entre cada novo envio. Ao final de cada cenário foi calculada a média e o desvio padrão e, em seguida, foi computada a média global em todos os contextos das taxas de transferência, PDR e dos tempos de ida e volta.

Primeiramente, os 2 rádios XBee e rádios LoRa mantiveram as mesmas configurações de parâmetros e ajustes descritos no HIL-01, desta subseção. Assim, esta etapa analisou o

desempenho do *throughput* quanto ao envio de quantidades definidas de pacotes para cada rádio, similar à realizada nos rádios XBee pela ferramenta XCTU (62), sendo realizado o monitoramento local da taxa de transferência, PDR e tempo dos rádios coordenadores, XBee e LoRa, enviando pacotes, via código Python, ao rádio 1 “roteador” e monitorando o PDR, no rádio 0, através do “ACK” de 9 bytes, gerados e enviados pelo rádio 1 ao rádio 0. Assim como no HIL-01, para ambos os rádios, o tempo máximo de espera da resposta “ACK” de um pacote enviado foi estipulado em 1 s.

4.3.2 Experimentos *Human-in-the-Loop*

HITL-01 - Análise de Transferência Síncrona

OBJETIVO: analisar de forma síncrona, em diferentes taxas de transmissão em P2P, as taxas de transferência, PDR e tempo de forma similar à realizada em bancada no HIL-02, porém analisando o comportamento dos rádios em variadas distâncias em ambiente externo.

ESTRUTURA NECESSÁRIA: foi também similar à empregada no experimento HIL-02 como descrita na Figura 34, com o emprego dos mesmos parâmetros, porém com simulação discreta de movimentos, não contínuos, variando as distâncias de 100 em 100 m até o limite de 500 m, em área urbana aberta, conforme Figura 35(a). O rádio 0, na ECS, ficou posicionado sobre uma mesa a 70 cm do solo, conforme exposto na Figura 35(b), e o rádio 1 posicionado sobre uma haste a 2 m do nível do solo, como exposto na Figura 35(c). A Figura 36, exibe o conteúdo da *case* empregada para o rádio 1, sendo exposto na Tabela 6 detalhes de cada equipamento empregado. Além disso, quanto à taxa de transmissão dos rádios, foram realizadas estas investigações em 9600, 38400 e a 57600 bps.

Tabela 6 – Descrição do conteúdo da *case* do rádio 1 (roteador).

Item	Equipamento	Função
1	Raspberry Pi3 model B	RX/TX dados, via Python, ao rádio pela UART.
2	Power Bank 10000 mAh	Alimentação 5 V para Raspberry.
3	Bateria Li-Po 8.4 V 3000 mAh 2 células	Alimentação da fonte 3.3 V.
4	Fonte de Alimentação 3.3 V	Converter tensão da bateria ao rádio.
5	Rádio LoRa RD42C	TX/RX dados via rádio LoRa.
6	Rádio XBee-PRO S3B	TX/RX dados via rádio XBee.

DESCRIÇÃO DO PROCESSO: na etapa externa HITL-01, a investigação transcorreu de maneira similar à realizada em bancada HIL-02, com os mesmos SF e potências definidas, porém a análise foi realizada durante o envio de apenas 50 pacotes de 232 bytes, totalizando o envio 11,6 Kbytes, mantendo a repetição deste cenário 5 vezes com intervalo de 8 s entre cada novo envio. Ao final, foi calculada a média dos 5 envios quanto às taxas de transfe-

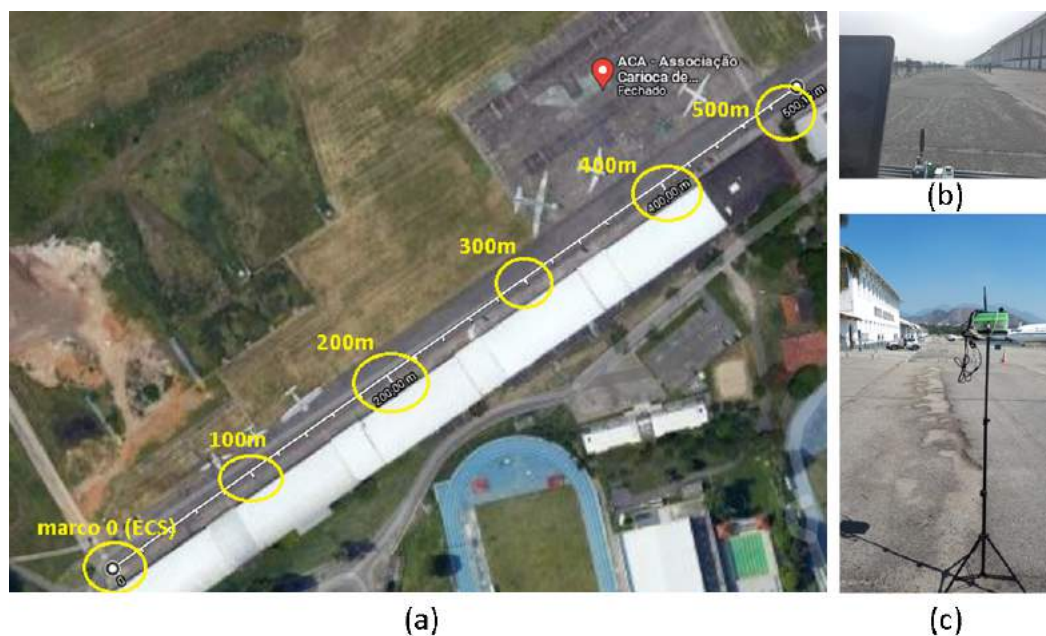


Figura 35 – Ambiente HITL-01: (a) distâncias, até 500 m; (b) mesa com ECS e rádio coordenador; (c) haste de 2 m com *case* do rádio roteador.

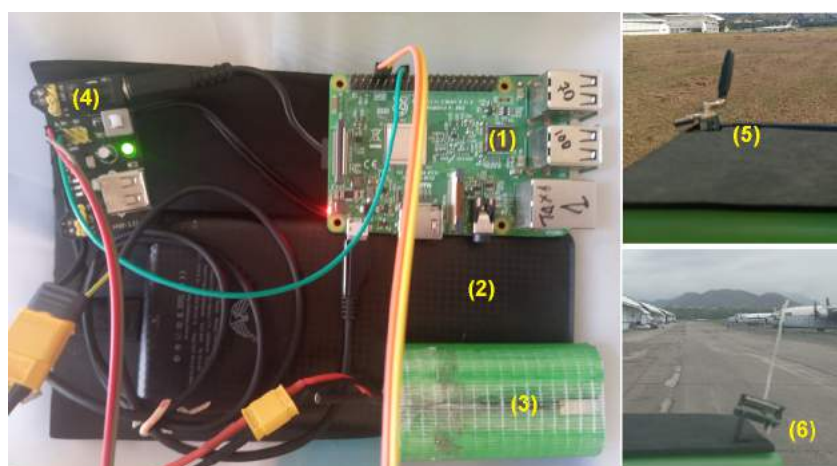


Figura 36 – Conteúdo da *case* do rádio roteador: (1) Raspberry; (2) *Power Bank*; (3) Bateria Li-Po; (4) Fonte de Alimentação; (5) Rádio LoRa; (6) Rádio XBee.

rência, PDR e dos tempos em cada distância analisada, com seus respectivos desvios padrão.

HITL-02 - Análise de Transferência Assíncrona

OBJETIVO: analisar se o envio em modo assíncrono, sem o recebimento de “ACK” na origem, produz melhores resultados na transferência de pacotes.

ESTRUTURA NECESSÁRIA: foi a mesma empregada no experimento HITL-01, ambas com emprego dos mesmos parâmetros dos rádios, contudo analisando de forma assíncrona a taxa de envio, PDR e tempo a 57600 *bps*.

DESCRIÇÃO DO PROCESSO: em HITL-02, a investigação transcorreu similar à realizada

no HITL-01, porém sem a necessidade de espera de 1 s pela confirmação de entrega, realizando apenas envio dos pacotes e checando o PDR no rádio destino. Como exposto nos testes HIL-01 no *cenário 1*, este rádio LoRa não possibilita o envio dos pacotes em rajada, sendo necessário para o envio assíncrono um intervalo entre as transmissões. Desta forma, o HITL-02 usou o mesmo intervalo, de 0,5 s, usado no HIL-01 em ambas as potências e SFs analisados, onde para ambos os rádios em bancada as distâncias mantiveram-se em 3 m, com visada direta. Em ambiente externo, as distâncias limites comparadas com HITL-01 no XBee foram de 200 m, para PL0 (7 dBm), e 500 m, para PL3 (21 dBm), enquanto que para o LoRa, conforme resultados do HITL-01, em ambas as potências e SFs, a distância foi de 500 m.

HITL-03 - Análise da Latência e PDR Assíncronos no LoRa

OBJETIVO: o experimento buscou investigar no LoRa, de forma assíncrona em 57600 bps P2P, quais possíveis intervalos ideais entre as transmissões de cada novo pacote, onde haja uma melhora no PDR nos diferentes SF analisados.

ESTRUTURA NECESSÁRIA: similar ao HITL-02, no mesmo cenário da Figura 35(a), porém apenas analisando de forma assíncrona a latência e o PDR obtido no LoRa, em 20 dBm com SF7 e SF9, nas distâncias de 500 m, analisada no HITL-02, e 800 m.

DESCRIÇÃO DO PROCESSO: o monitoramento foi similar ao HITL-02, porém investigando o LoRa a 20 dBm, que foi a potência empregada nos próximos experimentos descritos neste capítulo. Dessa maneira, foram alterados os 5 testes com envios de 50 pacotes cada por 5 envios de 50 pacotes em cada intervalo a analisar. Com isso, o primeiro teste iniciou-se com intervalo entre cada pacote transmitido de 0,5 s, sendo os demais testes acrescidos de 0,5 s até o intervalo final de 2,5 s. Ao final, foi calculado o PDR no rádio LoRa de destino para os 5 intervalos empregados. Além dos pacotes recebidos corretamente no destino, foram computados também a quantidade de pacotes perdidos e os truncados ou incompletos.

HITL-04 - Análise de PDR Assíncrono

OBJETIVO: analisar o desempenho de PDR dos rádios, de forma assíncrona em P2P, nas mesmas distâncias do HITL-01, porém utilizando apenas as potências e taxas de transmissão maiores analisadas neste trabalho, que são de modo geral empregadas em voo.

ESTRUTURA NECESSÁRIA: a estrutura necessária foi também similar à empregada no experimento HITL-02, considerando o mesmo local, porém apenas analisando de forma assíncrona o PDR dos rádios XBee em PL3, 21 dBm, e LoRa em 20 dBm, ambos a 57600 bps.

DESCRIÇÃO DO PROCESSO: a investigação transcorreu de maneira similar à realizada no

HITL-02 em P2P, porém analisando somente o PDR em envio assíncrono dos rádios em bancada e nas mesmas distâncias empregadas no experimento síncrono HITL-01, de 100 a 500 m , onde o rádio XBee manteve-se sem alterações. Mas quanto aos rádios LoRa, com base nos resultados do experimento de latência, HITL-03, foram utilizados intervalos de transmissão entre cada pacote de 0,5 e 1 s , para SF7, e 0,5 e 2 s para SF9.

HITL-05 - Análise de Transferência Assíncrona P2P e *Mesh*

OBJETIVO: o objetivo deste experimento foi analisar o desempenho assíncrono dos rádios em distâncias maiores aos testes já realizados, empregando rede P2P e *mesh*, com 1 e 2 nós intermediários, realizando as investigações apenas nas potências e taxa de transmissão mais altas utilizadas neste estudo.

ESTRUTURA NECESSÁRIA: a estrutura empregada inicialmente analisou os rádios em P2P, nas distâncias d , conforme diagrama esquemático exposto na Figura 37(a), e na sequência com emprego de rede *mesh* nas distâncias d , acrescentado 1 e depois 2 nós intermediários, sendo as distâncias divididas, respectivamente, em $d/2$, conforme Figura 37(b), e $d/3$,

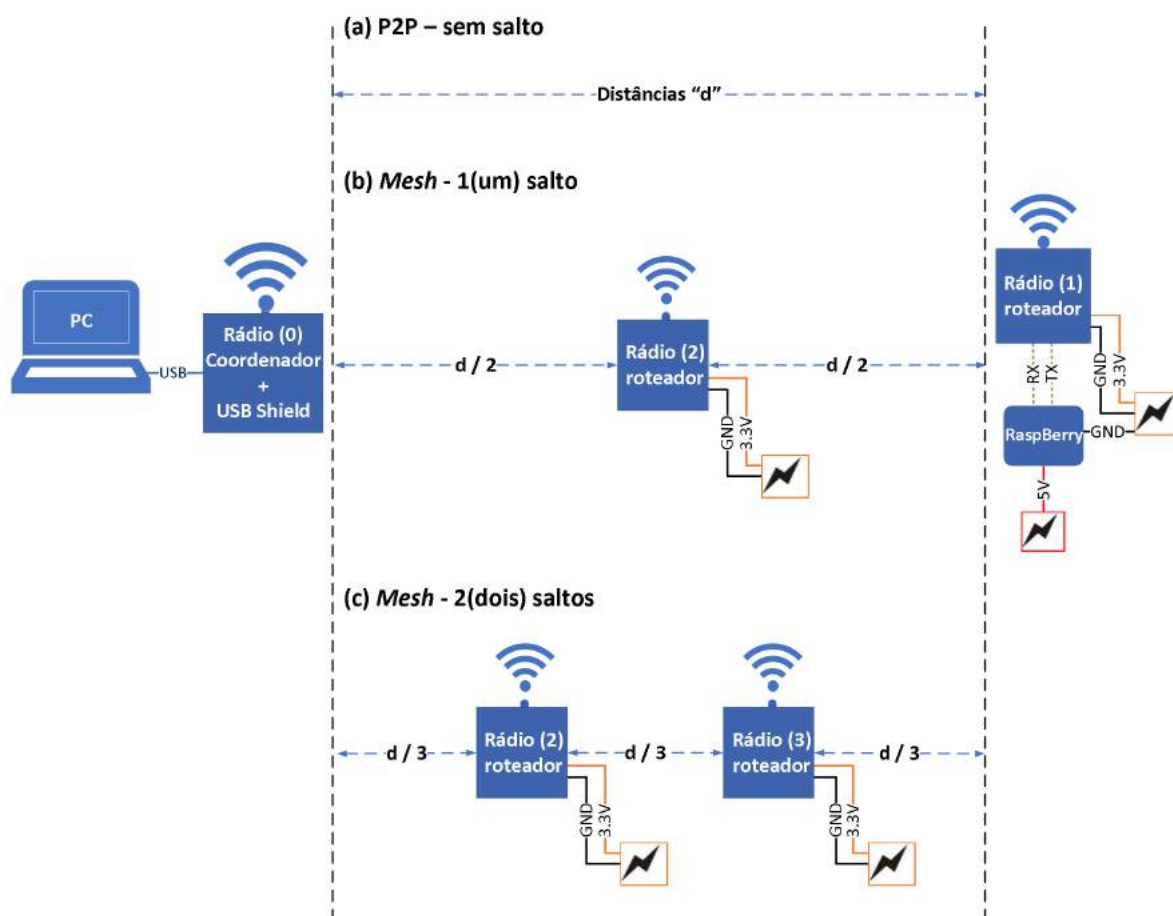


Figura 37 – Diagrama esquemático para HITL-05: (a) em rede P2P, sem salto; (b) em rede *mesh*, com 1 salto; (c) em rede *mesh*, com 2 saltos.

conforme Figura 37(c). Para ambos os rádios, o destino *rádio* 1 ficou a distâncias d que variaram de 500, 750, 850, 1000 e 1250 m do *rádio* 0, da ECS, em um novo local menos urbanizado, conforme Figura 38(a).

O *rádio* 0, na ECS, ficou posicionado sobre uma mesa a 70 cm do solo, conforme Figura 38(b), e o rádio destino e intermediários sobre hastes a 3 m do nível do solo, sem variações de altura, conforme Figura 38(c). O conteúdo da *case* do *rádio* 1 (roteador) de destino, foi o mesmo empregado nos experimentos anteriores e descrito no HITL-01 desta subseção. Os *rádios* 2 e 3 (intermediários), ficaram apenas alimentados operando na rede *mesh* como possíveis rotas alternativas ao *rádio* 1, onde a *case* desses nós interpostos pode ser vista na Figura 39. Todo o experimento foi similar ao realizado no HITL-02, com a estrutura do *rádio* 1 (destino), apenas analisando de forma assíncrona o PDR dos rádios XBee em PL3, 21 dBm , e LoRa em 20 dBm , ambos a 57600 bps .

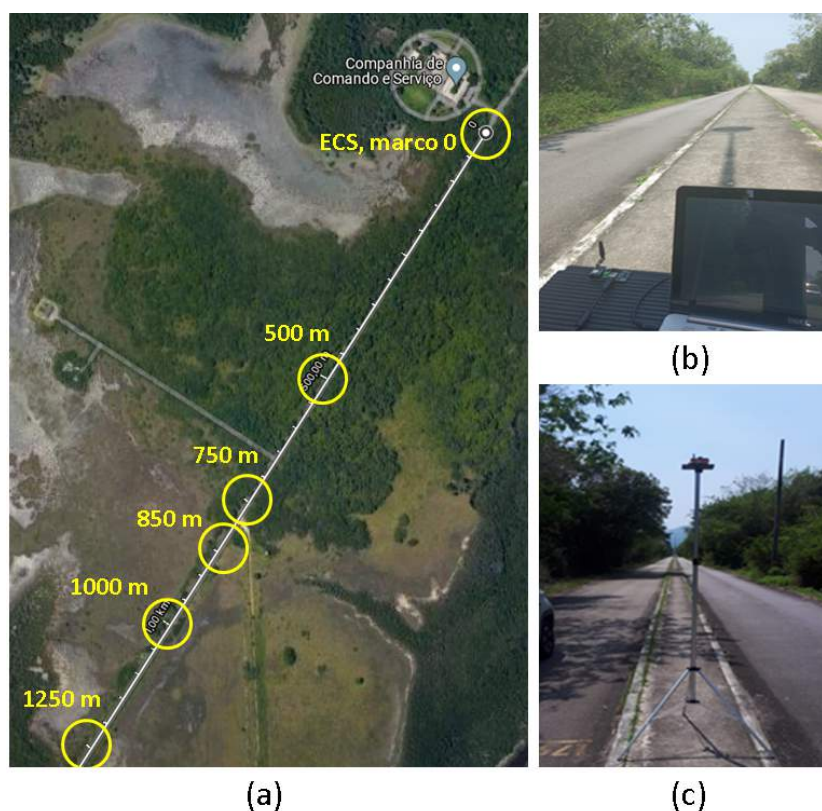


Figura 38 – Ambiente HITL-05: (a) Distâncias, com até 1250 m ; (b) mesa com ECS e *rádio* 0 (coordenador); (c) haste de 3 m com fonte e rádio roteador.

DESCRIÇÃO DO PROCESSO: na etapa externa HITL-05, a investigação transcorreu similar à HITL-02, porém empregando rede P2P e *mesh* nas distâncias, taxa de transmissão e potências supracitadas na estrutura do experimento. Para os rádios LoRa, foram utilizados no *rádio* 0, com base nos resultados da análise de latência HITL-03 da subseção 5.3.3, intervalos de transmissão entre cada pacote de 0,5 s e 1 s , para SF7, e apenas 2 s em SF9.



Figura 39 – Conteúdo da *case* dos rádios intermediários: (1) Fonte de Alimentação; (2) Bateria Li-Po; (3) Rádio LoRa; e (4) Rádio XBee.

4.4 Considerações Sobre o Capítulo

Este capítulo abordou de forma conceitual o problema referente à qualificação e seleção de tecnologias ZigBee e LoRa aplicadas a cenários factíveis a redes FANET, apresentando uma descrição do problema, expondo a análise comparativa proposta e as características dos rádios XBee e LoRa utilizados. Por fim, foram detalhados os experimentos, recursos estruturais e processos adotados nas avaliações dos rádios. O capítulo a seguir expõe os resultados obtidos em todos os experimentos aqui descritos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados para avaliar os rádios XBee e LoRa nos diferentes cenários, com testes em bancada e em ambiente externo com simulações de movimento em rede P2P e *mesh*, buscando aproximar-se de um ambiente FANET, expondo os valores alcançados, considerações em cada etapa e ao final sugestões de empregos desses rádios em FANETs. Além disso, os resultados aqui expostos em Tabelas comparativas percentuais, foram considerados similares quando tiveram diferenças de até 1% para mais ou para menos.

5.1 Resumo dos Experimentos Realizados

Com base nas configurações definidas para os rádios, relatadas na subseção 4.2.3, e detalhes das análises apresentadas na seção 4.3, a Tabela 7 apresenta um resumo dos experimentos realizados para ambos os rádios, com exceção do HITL-03 que foi realizado apenas no LoRa em virtude de sua latência, expondo as taxas de transmissão e potências utilizadas, bem como os cenários e indicadores que foram analisados em cada investigação.

Tabela 7 – Resumo dos experimentos e configurações, com os cenários analisados.

Exp.	Desc. (subs.)	Taxa (bps)	Pot. ¹ (dBm)	Modo ²	Rede ³	Consumo	Taxa transf.	PDR	Tempo	
HIL-01	4.3.1	9600, 38400 e 57600	7 e 20/21	A / S	P2P	X				
HIL-02				S				X	X	X
HITL-01	4.3.2	9600, 38400 e 57600	7 e 20/21	S	P2P		X	X	X	
HITL-02							X	X	X	
HITL-03		57600	20	A				X		
HITL-04									X	
HITL-05			20/21			P2P e <i>mesh</i>	X	X	X	

- 1 Potências empregadas, conforme detalhes na subseção 4.2.3.
- 2 Modo de comunicação empregado: A = assíncrona / S = síncrona.
- 3 Análise de rede em: P2P / *mesh*.

5.2 Resultado dos Experimentos *Hardware-in-the-Loop*

Esta seção apresenta as análises de bancada deste estudo, descritas em detalhes na subseção 4.3.1, onde foram analisados os desempenhos dos rádios XBee e LoRa quanto a eficiência energética e transferência síncrona de dados.

5.2.1 HIL-01 - Análise Energética em Bancada

Abaixo serão expostos os resultados comparativos dos rádios em 9600, 38400 e 57600 *bps*, estando esses apenas alimentados e operando de forma assíncrona e síncrona através dos cenários 0, 1, 2 e 3, conforme descrito na subseção 4.3.1, com os consumos obtidos, dentro dos tempos totais gastos, conforme a Tabela 33 do Apêndice A, onde salienta-se que nos cenários 0, “apenas alimentados”, os tempos foram fixos de cerca 50,6 *s*. As Figuras 40(a), (c) e (e) exibem, para as taxas de transmissão, o comparativo de corrente média entre o XBee, em 7 e 21 *dBm*, e LoRa, em 7 e 20 *dBm* com SF7 e SF9, nos 4 cenários analisados. Enquanto as Figuras 40(b), (d) e (f) apresentam os gráficos comparativos dos consumos, nas mesmas taxas, parâmetros e cenários.

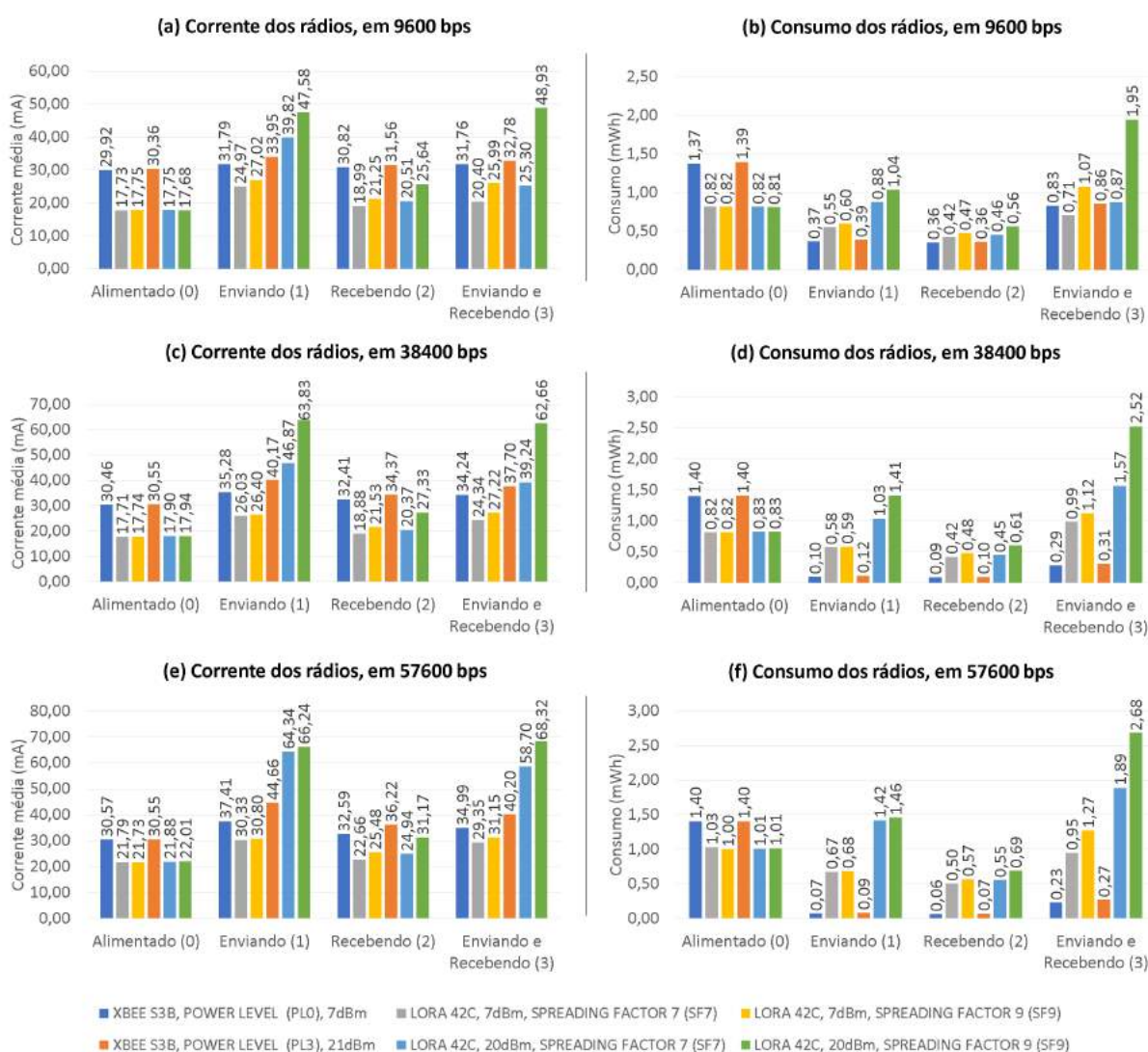


Figura 40 – Gráficos dos resultados comparativos HIL-01 entre XBee e LoRa, a 9600 *bps*: (a) corrente média e (b) consumo; nos cenários a 38400 *bps*: (c) corrente média e (d) consumo; e a 57600 *bps*: (e) corrente média e (f) consumo.

O desvio padrão das correntes obtidas para cada rádio nos cenários e taxas de transmissão são apresentados na Tabela 8, onde destacam-se desvios padrões bem elevados

principalmente no XBee e LoRa nas potências mais altas analisadas em todos os cenários, exceto cenário 0. Sendo assim, em virtude desses valores elevados os experimentos foram repetidos no mesmo ambiente, mas mantiveram a similaridade com os resultados expostos e assim nota-se que este foi o real comportamento dos rádios.

Tabela 8 – Desvio padrão das correntes dos rádios nas taxas de transmissão e cenários do HIL-01.

Rádio	Potência (dBm)	SF	9600 bps				38400 bps				57600 bps			
			Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
XBee	7	-	0,53	4,58	2,58	4,62	0,27	8,04	5,48	7,32	0,22	9,00	5,75	7,78
XBee	21	-	0,43	11,34	6,57	8,62	0,24	17,10	11,45	14,63	0,24	19,10	13,24	16,89
LoRa	7	SF7	1,99	9,33	3,94	6,95	1,99	9,68	3,97	9,58	1,77	8,66	3,42	8,66
LoRa	7	SF9	1,99	9,31	5,24	9,16	1,94	8,64	5,73	9,18	1,96	8,05	4,82	8,27
LoRa	20	SF7	2,00	27,61	11,75	19,06	2,03	32,57	11,15	30,54	2,00	41,51	13,11	41,26
LoRa	20	SF9	2,00	31,32	18,56	31,85	2,03	44,19	23,55	44,23	2,07	41,33	21,88	41,06

- não configurável 0 - alimentado 1 - enviando 2 - recebendo 3 - enviando e recebendo

A Figura 41 exibe a restrição do LoRa comparado ao XBee, no envio assíncrono de 50 pacotes (11,6 KB), para diferentes intervalos de envio de cada pacote quanto ao PDR no destino. Foram feitos testes e os PDRs mantiveram-se equivalentes quanto às mudanças de taxa de transmissão e aumento da quantidade de pacotes. Desta forma, foram empregados valores de 0,5 s nos intervalos de envio de cada pacote nos experimentos assíncronos dos cenários 1 e 2 no LoRa.

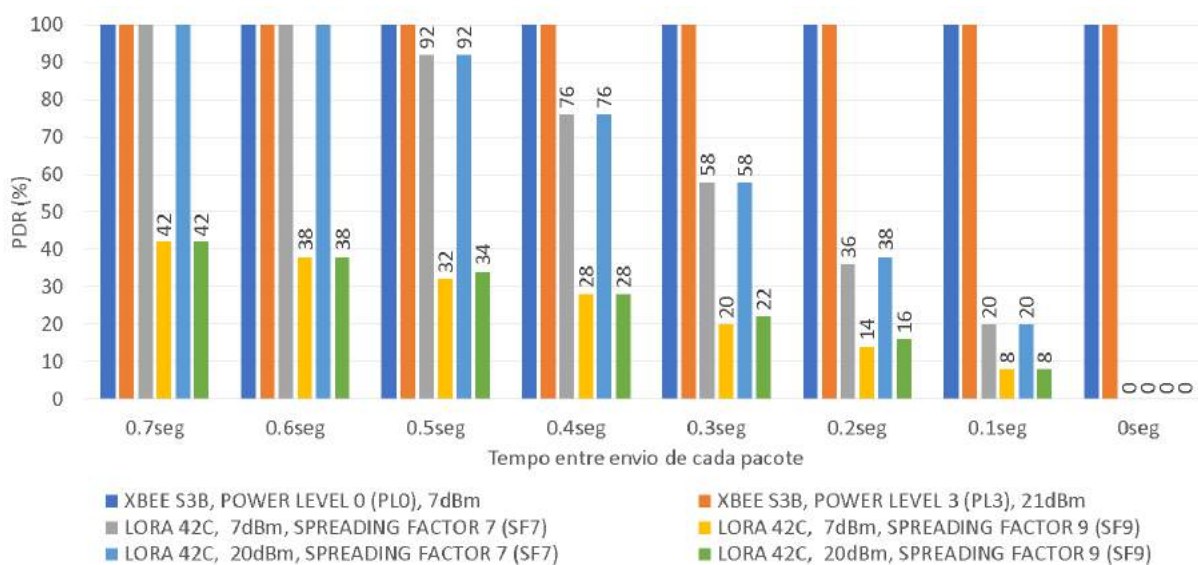


Figura 41 – PDR x tempo entre envios - rádio XBee e LoRa.

Considerações sobre corrente e consumo do XBee: segundo os comparativos de correntes médias do XBee, notou-se que a alteração de 7 dBm para 21 dBm gerou um aumento de corrente em todas as taxas de transmissão e cenários, exceto cenários 0

“apenas alimentado”, que se mantiveram iguais. Em ambas as potências, os *cenários* 1 tiveram correntes superiores aos demais cenários. Quanto ao consumo, a Tabela 9 exibe uma síntese percentual de consumo, quanto à elevação da potência, de 7 para 21 *dBm*, nas taxas de transmissão analisadas, onde nota-se, de forma geral que a elevação de potência gerou aumentos de consumo nos cenários, com exceção do *cenário* 0 que ficou com consumos similares em ambas as potências. Comparando o comportamento do consumo com o aumento das taxas de transmissão, a Tabela 10 apresenta uma consolidação percentual dessas elevações, onde nota-se que de modo geral nos cenários, com exceção do *cenário* 0 que ficou similar, que apesar do aumento das correntes com a elevação das taxas de transmissão, o XBee nestas ascensões foi progressivamente mais ágil na conclusão das operações, reduzindo o consumo comparado as taxas inferiores. Mais detalhes são apresentados na seção “HIL-01 - Dados de Consumo Energético” do Apêndice A.

Tabela 9 – Comparativo de consumo do XBee na elevação de potência, em diferentes taxas de transmissão.

Consumo (mWh) na elevação da potência do XBee				
Taxa de transmissão	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
9600	≈	↑ 5,4%	≈	↑ 3,6%
38400	≈	↑ 20,0%	↑ 11,1%	↑ 6,9%
57600	≈	↑ 28,6%	↑ 16,7%	↑ 17,4%

↓ 1 21 *dBm* inferior a 7 *dBm* enviando ↑ 2 21 *dBm* superior a 7 *dBm* recebendo ≈ 3 similar enviando e recebendo 0 alimentado

Tabela 10 – Comparativo percentual de consumo do XBee com a elevação da taxa de transmissão.

Consumo (mWh) do XBee na elevação de taxa de transmissão					
Potência (dBm)	Na elevação de taxa (bps)	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
7	9600 para 38400	↑ 2%	↓ 73%	↓ 75%	↓ 65%
	38400 para 57600	≈	↓ 30%	↓ 33%	↓ 21%
21	9600 para 38400	≈	↓ 69%	↓ 72%	↓ 64%
	38400 para 57600	≈	↓ 25%	↓ 30%	↓ 13%

↓ 1 inferior à taxa anterior enviando ↑ 2 superior à taxa anterior recebendo ≈ 3 similar enviando e recebendo 0 alimentado

Considerações sobre corrente e consumo do LoRa: segundo os comparativos de correntes médias do LoRa, notou-se em todas as taxas analisadas um aumento de corrente nos cenários com SF9 comparados ao SF7, possivelmente em virtude das peculiaridades atreladas a este SF, exceto o *cenário* 0 que se manteve similar mesmo com a troca do SF. Quanto a alteração de potência para 20 *dBm*, em cada SF, produziu maiores correntes comparadas a 7 *dBm* em todos os cenários, exceto as correntes no *cenário* 0 que ficaram sempre similares mesmo com a mudança de potência no mesmo SF. Por outro lado, em relação ao consumo do LoRa, a Tabela 11(a) e (b), exibe, respectivamente, uma síntese percentual de consumo quanto à mudança do SF7 para SF9 e o comportamento na elevação de potência, de 7 para 20 *dBm*, dentro do mesmo SF, nas taxas de transmissão analisadas.

Desta forma, de modo geral, constatou-se que, com exceção do *cenário* 0 que obteve tempos e consumos similares em ambas às potências e SFs, a alteração do SF7 para SF9, na mesma potência, gerou um aumento de consumo em todos os cenários, onde o *cenário* 3, de envio síncrono com recepção de ACK, obteve maiores consumos em ambas as potências, fruto de maiores correntes e tempos do SF9 comparados ao SF7. Quanto à elevação de potência de 7 para 20 *dBm*, em ambos SFs, foi similar no *cenário* 0 e aumentou de consumo comparado a 7 *dBm*, nos *cenários* 1, 2 e 3, contudo, esse aumento, de modo geral, manteve maior superioridade em SF9, nos *cenários* 1 e 3. Por fim, a Tabela 12, expõe uma consolidação percentual quanto ao comportamento do consumo com o aumento das taxas de transmissão, onde nota-se, de modo geral, que o aumento de 9600 para 38400 *bps*, com exceção do *cenário* 0, cresceu consideravelmente o consumo principalmente com 20 *dBm*, em SF7 e SF9, enquanto que de 38400 para 57600 *bps*, também produziu um aumento de consumo, porém ampliado a todos os cenários. Mais detalhes deste experimento também são apresentados na seção “HIL-01 - Dados de Consumo Energético” do Apêndice A.

Tabela 11 – Comparativo de consumo do LoRa nas mudanças dos SFs e potências, em diferentes taxas de transmissão.

(a) Consumo (mWh) na alteração do SF7 para SF9.

Potência (dBm)	Taxa de transmissão (bps)	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
7	9600	≈	↑ 9,1%	↑ 11,9%	↑ 51,5%
	38400	≈	↑ 1,7%	↑ 14,3%	↑ 13,1%
	57600	↓ 2,9%	≈	↑ 14,0%	↑ 33,7%
20	9600	≈	↑ 18,2%	↑ 22,8%	↑ 124,1%
	38400	≈	↑ 36,9%	↑ 35,5%	↑ 60,5%
	57600	≈	↑ 2,8%	↑ 25,5%	↑ 41,8%

↓ SF9 inferior ao SF7 enviando 1
 ↑ SF9 superior ao SF7 recebendo 2
 ≈ similar 3
 0 alimentado enviando e recebendo

(b) Consumo (mWh) na elevação de 7 para 20 *dBm*.

SF	Taxa de transmissão (bps)	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
7	9600	≈	↑ 60,0%	↑ 9,5%	↑ 22,5%
	38400	≈	↑ 77,6%	↑ 7,1%	↑ 58,6%
	57600	↓ 1,9%	↑ 111,9%	↑ 10,0%	↑ 98,9%
9	9600	≈	↑ 73,3%	↑ 19,1%	↑ 82,2%
	38400	≈	↑ 139,0%	↑ 27,1%	↑ 125,0%
	57600	≈	↑ 114,7%	↑ 21,1%	↑ 111,0%

↓ 20 *dBm* inferior a 7 *dBm*
 ↑ 20 *dBm* superior a 7 *dBm*
 ≈ similar

Considerações gerais sobre corrente e consumo entre ambos os rádios: quanto aos comparativos de corrente média entre o XBee e LoRa, pode-se verificar, independente da taxa de transmissão que: EM POTÊNCIAS BAIXAS, o XBee em 7 *dBm* teve correntes superiores ao LoRa na mesma potência com SF7 e SF9, em todos os cenários; e EM POTÊNCIAS ALTAS, o XBee em 21 *dBm*, de modo geral teve correntes inferiores no *cenário* 1 e *cenário* 3 quando comparado ao LoRa com 20 *dBm* em ambos SFs. Nos demais cenários, o LoRa em SF7 e SF9 tiveram menores correntes. Em relação ao consumo entre o XBee e LoRa, dentro dos tempos gastos, a Tabela 13 expõe um comparativo

Tabela 12 – Comparativo percentual de consumo do LoRa com a elevação da taxa de transmissão.

Consumo (mWh) do LoRa na elevação de taxa de transmissão						
Potência (dBm)	SF	Na elevação de taxa (bps)	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
7	7	9600 para 38400	≅	↑ 5%	≅	↑ 39%
		38400 para 57600	↑ 26%	↑ 16%	↑ 19%	↓ 4%
	9	9600 para 38400	≅	↓ 2%	↑ 2%	↑ 5%
		38400 para 57600	↑ 22%	↑ 15%	↑ 19%	↑ 13%
20	7	9600 para 38400	≅	↑ 17%	↓ 2%	↑ 80%
		38400 para 57600	↑ 22%	↑ 38%	↑ 22%	↑ 20%
	9	9600 para 38400	↑ 2%	↑ 36%	↑ 9%	↑ 29%
		38400 para 57600	↑ 22%	↑ 4%	↑ 13%	↑ 6%

↓ inferior à taxa anterior 1 enviando ↑ superior à taxa anterior 2 recebendo ≅ similar 3 enviando e recebendo 0 alimentado

consolidado do percentual de consumo entre ambos os rádios nas taxas de transmissão analisadas, onde notou-se que, independente da taxa analisada, o XBee em relação ao LoRa, com as mesmas potências, obteve de modo geral menores consumos em quase todos os cenários. Apenas no *cenário 0*, em todas as taxas, em ambas potências e SFs, o LoRa obteve menor consumo que o XBee em 7 dBm e 21 dBm. Desta forma, pode-se concluir que LoRa, mesmo com correntes inferiores ao XBee em alguns de seus parâmetros e cenários, obteve, nas taxas analisadas, tempos elevados fruto do intervalo entre os envios dos pacotes na conclusão da maioria dos cenários, contribuindo para seu expressivo consumo final. Detalhes desta análise são expostas na seção “HIL-01 - Dados de Consumo Energético” do Apêndice A.

Tabela 13 – Comparativo de consumo (mWh) entre XBee e LoRa nas taxas de transmissão.

Comparativo	Potência (dBm)	Taxa transm. (bps)	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
LoRa SF7 x XBee	7	9600	↑ 67,9%	↓ 32,5%	↓ 14,2%	↑ 16,9%
		38400	↑ 70,7%	↓ 82,8%	↓ 78,6%	↓ 70,7%
		57600	↑ 35,9%	↓ 89,5%	↓ 88,0%	↓ 75,8%
	20/21	9600	↑ 69,5%	↓ 55,4%	↓ 21,7%	≅
		38400	↑ 68,7%	↓ 88,3%	↓ 77,8%	↓ 80,2%
		57600	↑ 38,6%	↓ 93,7%	↓ 87,3%	↓ 85,7%
LoRa SF9 x XBee	7	9600	↑ 67,1%	↓ 38,9%	↓ 23,4%	↓ 22,4%
		38400	↑ 70,7%	↓ 83,0%	↓ 81,2%	↓ 74,1%
		57600	↑ 40,0%	↓ 89,7%	↓ 89,5%	↓ 81,9%
	20/21	9600	↑ 71,7%	↓ 62,3%	↓ 35,2%	↓ 55,9%
		38400	↑ 68,7%	↓ 91,5%	↓ 83,6%	↓ 87,7%
		57600	↑ 38,6%	↓ 93,8%	↓ 89,8%	↓ 89,9%

↓ XBee inferior ao LoRa 1 enviando ↑ XBee superior ao LoRa 2 recebendo ≅ similar 3 enviando e recebendo 0 alimentado

Considerações sobre as correntes descritas pelos fabricantes, XBee e LoRa, e as correntes obtidas nos experimentos realizados: a Tabela 14 apresenta uma comparação das correntes de recepção e transmissão do XBee e LoRa expostas por seus fabricantes, conforme subseção 4.2.3, e as correntes obtidas nos experimentos deste estudo. Inicialmente pode-se verificar que ambos os fabricantes não informam as suas correntes em função das taxas de transmissão. Desta forma, na análise comparativa do XBee, os cenários

de corrente de recepção, em todas as taxas e ambas as potências, ficaram similares ao previsto pelo fabricante. A corrente de envio, em 9600 *bps*, foi inferior em cerca de pouco mais da metade da corrente do fabricante em PL0 (7 *dBm*), mantendo essa inferioridade nas demais taxas, mas sofrendo moderados aumentos. Na transmissão em PL3 (21 *dBm*), as correntes foram inferiores em cerca de quase um quinto em 9600 *bps*, e nas demais taxas as correntes foram inferiores em cerca de um quarto do valor do fabricante. Quanto ao LoRa, até 38400 *bps*, nota-se corrente de recepção de modo geral similar ao fabricante, em ambas as potências e SFs. Por outro lado, em 57600 *bps*, a corrente de recepção foi discretamente superior ao descrito pelo fabricante em ambas as potências e SFs. A corrente de transmissão foi inferior em ambos os SFs e taxas, sendo cerca de um quarto menor em 7 *dBm* e variando entre um terço e a metade em 20 *dBm*.

Tabela 14 – Comparativo de correntes de recepção e transmissão do XBee e LoRa, descritas pelo fabricante e obtidas nos experimentos.

Rádio	Operação	Potência (dBm)	SF	Fabricante (mA)	Experimentos de corrente (mA)		
					9600 bps	38400 bps	57600 bps
XBee	Recepção	7	–	29 a 35	≈ 31	≈ 32	≈ 33
		21	–	29 a 35	≈ 32	≈ 34	≈ 36
	Transmissão	7	–	60	↓ 32	↓ 35	↓ 37
		21	–	160	↓ 34	↓ 40	↓ 45
LoRa	Recepção	7	7	20	≈ 19	≈ 19	↑ 23
			9		≈ 21	≈ 21	↑ 25
		20	7		≈ 20	≈ 20	↑ 25
			9		↑ 26	↑ 27	↑ 31
	Transmissão	7	7	111	↓ 25	↓ 26	↓ 26
			9		↓ 27	↓ 26	↓ 26
		20	7		↓ 40	↓ 47	↓ 64
			9		↓ 48	↓ 64	↓ 66

↓ corrente inferior ao fabricante ↑ corrente superior ao fabricante ≈ corrente similar ao fabricante
 – não configurável

Considerações finais do HIL-01 entre os rádios: nas análises pode-se perceber que os rádios XBee, em relação ao LoRa, obtiveram menores consumos que decaíram conforme o aumento das taxas de transmissão, pois estes crescimentos proporcionaram uma redução nos tempos em cada cenário. O rádio LoRa, apesar de apresentar menores correntes em boa parte dos parâmetros e cenários analisados, deixou a desejar quanto ao consumo, sendo superado pelo XBee na grande maioria dos cenários em virtude dos intervalos entre os envios do LoRa, inseridos para suprir a latência apresentada por ele. Este fato dependeu mais tempo para o rádio concluir as operações e assim elevou o seu consumo final.

5.2.2 HIL-02 - Análise de Transferência em Bancada

Abaixo são expostos os comparativos e considerações dos rádios em bancada, em modo síncrono de envio para diferentes quantidades de pacotes, quanto à taxa de transferência, PDR e tempo de ida e retorno do “ACK”, nos cenários e parâmetros descritos na subseção 4.3.1 para transmissão em 9600, 38400 e 57600 *bps*. As Figuras 42(a), (c) e (e) exibem, para as taxas de transmissão, os comparativos entre XBee e LoRa quanto as

taxas de transferências médias de pacotes, em *Kbps*, já as Figuras 42(b), (d) e (f) exibem os comparativos dos PDRs entre os rádios. Quanto ao tempo de envio, em *s*, observou-se um crescimento linear do tempo de acordo com o aumento da quantidade de pacotes dos cenários, com isso a Figura 43 exibe o gráfico comparativo apenas dos tempos médios de envio entre os rádios, respectivamente nas mesmas taxas supracitadas. O desvio padrão dos cenários foi expresso por linhas verticais sobre as barras nos gráficos.

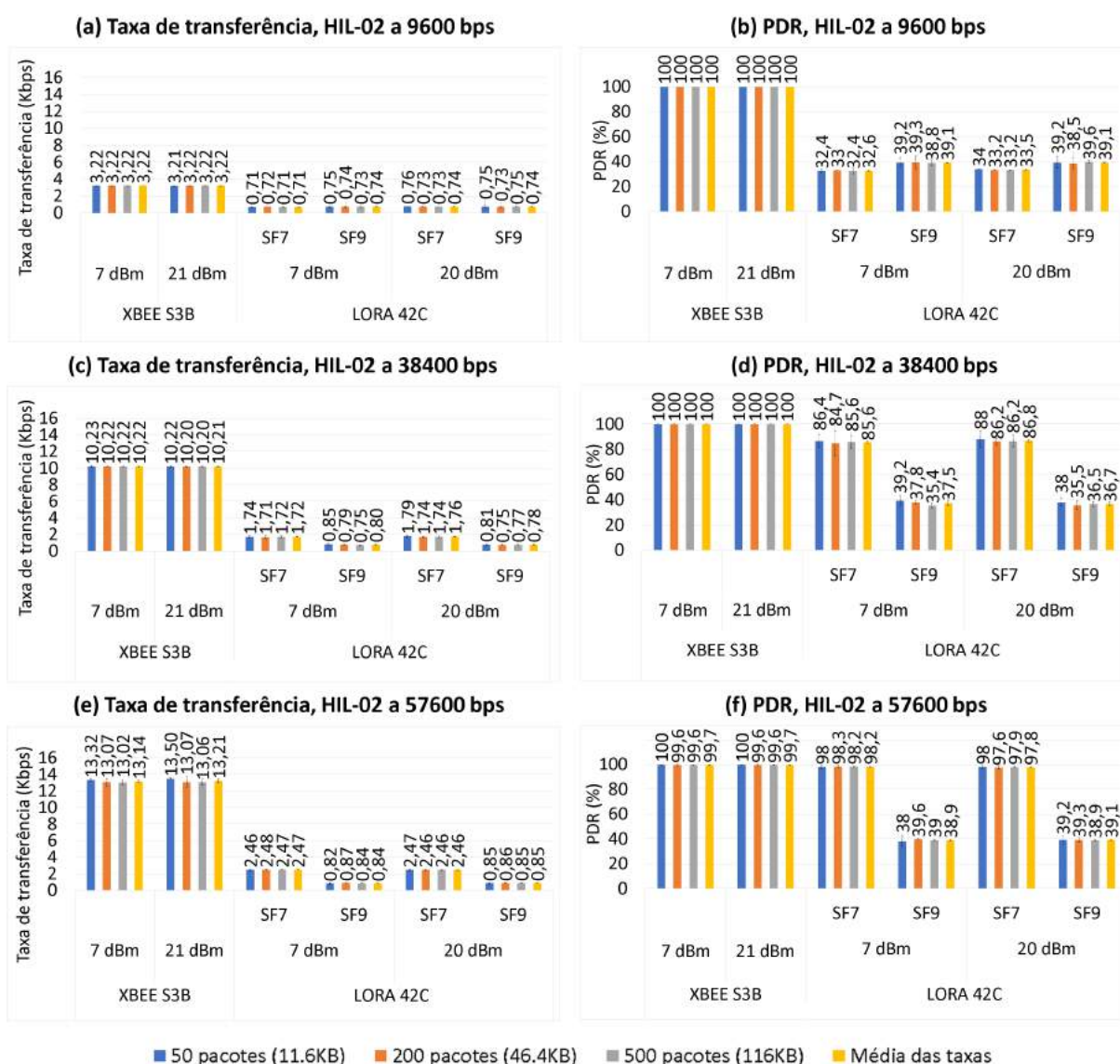


Figura 42 – Gráficos dos resultados comparativos HIL-02 entre XBee e LoRa, a 9600 *bps*: (a) taxa de transferência e (b) PDR; nos cenários a 38400 *bps*: (c) taxa de transferência e (d) PDR; e a 57600 *bps*: (e) taxa de transferência e (f) PDR.

Considerações sobre taxa de transferência, PDR e tempo:

Quanto ao XBee: notou-se nos experimentos que o XBee independente da alteração do 7 para 21 *dBm*, manteve a similaridade dos resultados médios de taxa de transferência, PDR e tempos gastos em cada cenário. Detalhes desta similaridade são apresentados na seção “HIL-02 - Dados de Transferência” do Apêndice A.



Figura 43 – Gráfico do resultado comparativo dos tempos médios de envio do HIL-02 entre XBee e LoRa, nas diferentes taxas de transmissão.

Quanto ao LoRa: a Tabela 15 exibe uma análise comparativa percentual das taxas, PDRs e tempos médios do LoRa quanto à alteração do SF nas taxas de transmissão analisadas, onde quanto ao comportamento em relação à elevação da potência, em cada SF, não ocorreram alterações consideráveis em bancada, mantendo uma similaridade dos resultados. Sendo assim, verificou-se, de modo geral, que na alteração do SF7 para SF9, em ambas as potências e taxas de transmissão, houve uma redução da taxa de transferência, PDR e aumento de tempo, como previsto em virtude do SF7 ter características de maior taxa de bits e menor latência como descrito na subseção 2.3.2. Porém, excepcionalmente em 9600 bps, a mudança do SF7 para SF9, em ambas as potências, gerou limitados aumentos de taxa de transferência, PDR e tempo. Em 38400 bps, a mudança para SF9, gerou, como previsto, uma redução de taxa de transferência e PDR, contudo inesperadamente com tempo moderadamente menor comparado ao SF7. Dados analíticos são apresentados na seção “HIL-02 - Dados de Transferência” do Apêndice A.

Tabela 15 – Comparativo das taxas, PDRs e tempos médios do LoRa, nas mudanças dos SFs, em diferentes taxas de transmissão.

Comparativo do LoRa, na alteração do SF7 para SF9.				
Potência (dBm)	Taxa de transmissão (bps)	Taxa transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
7	9600	↑ 4%	↑ 6%	↑ 16%
	38400	↓ 54%	↓ 48%	↓ 4%
	57600	↓ 66%	↓ 60%	↑ 16%
20	9600	≈	↑ 6%	↑ 16%
	38400	↓ 56%	↓ 50%	↓ 4%
	57600	↓ 65%	↓ 60%	↑ 15%

↓ SF9 inferior ao SF7 ↑ SF9 superior ao SF7 ≈ similar

Comparação dos rádios quanto as ascensões das taxas de transmissão: a Tabela 16 apresenta de forma sintetizada o percentual de degradação ou melhora dos rádios, XBee e LoRa, quanto as elevações de taxas de transmissão, onde observa-se a tendência, com o aumento da taxa de bits, de provável melhora na taxa de transferência e PDR com redução no tempo de envio. Sendo assim, pode-se verificar que na ascensão de taxas de transmissão, ocorreram expressivos aumentos da taxa de transferência no XBee e no LoRa

em SF7, principalmente de 9600 para 38400 *bps*, em ambas as potências, contudo esse aumento em LoRa SF9 foi modesto não ultrapassando 9%. Quanto ao PDR, nas elevações o XBee manteve de modo geral sua entrega completa, em 100%, e o LoRa SF7 obteve ganhos relevantes de PDR, principalmente de 9600 para 38400 *bps*. Contudo, em SF9 esse aumento de modo geral foi inexpressivo. Além disso, a elevação das taxas produziram mais agilidade ao XBee, com relevantes reduções de tempo, enquanto o LoRa em SF7 obteve moderadas reduções de tempo, exceto na alteração de 9600 para 38400 *bps* que por alguma particularidade do rádio gerou um moderado aumento do tempo médio dos cenários em SF7, com cerca de até 9% a mais. Em relação ao LoRa em SF9, o aumento da taxa gerou uma modesta redução do tempo. Os detalhes analíticos destas ascensões são apresentados na seção “HIL-02 - Dados de Transferência” do Apêndice A.

Tabela 16 – Comparativo percentual de taxa de transferência, PDR e tempo do XBee e LoRa, com a elevação da taxa de transmissão.

Potência (dBm)	Rádio	SF	Na elevação de taxa (bps)	Taxa transf.(Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
7	XBee	-	9600 para 38400	↑ 217%	≈	↓ 68%
			38400 para 57600	↑ 29%	≈	↓ 22%
	LoRa	7	9600 para 38400	↑ 142%	↑ 53%	↑ 8%
			38400 para 57600	↑ 44%	↑ 13%	↓ 20%
		9	9600 para 38400	↑ 8%	↓ 2%	↓ 10%
			38400 para 57600	↑ 5%	≈	↓ 3%
21/20	XBee	-	9600 para 38400	↑ 217%	≈	↓ 68%
			38400 para 57600	↑ 29%	≈	↓ 22%
	LoRa	7	9600 para 38400	↑ 137%	↑ 53%	↑ 9%
			38400 para 57600	↑ 40%	↑ 11%	↓ 20%
		9	9600 para 38400	↑ 5%	↓ 2%	↓ 10%
			38400 para 57600	↑ 9%	↑ 2%	↓ 3%

↓ inferior à taxa anterior ↑ superior à taxa anterior ≈ similar à taxa anterior - não configurável

Considerações finais entre os rádios em HIL-02: a Tabela 17 apresenta uma síntese da comparação percentual, nas taxas de transmissão analisadas, entre as médias de taxa de transferência síncrona, PDR e tempo, entre o LoRa, em seus dois SF, e o XBee, analisando os resultados com as potências equiparadas. Os dados detalhados deste comparativo são apresentados na seção “HIL-02 - Dados de Transferência” do Apêndice A. Desta forma, verificou-se que o XBee nos parâmetros analisados, em ambas as potências, foi mais eficiente que o LoRa em todas as taxas de transmissão verificadas. Em 9600 *bps*, o XBee obteve taxa de transferência por volta de 4 a 4,5 vezes superior ao LoRa com PDR de 100% em todos os cenários e com tempo de envio cerca de 1,5 e 1,7 vezes mais rápidos comparados, respectivamente, ao LoRa em SF7 e SF9, nas duas potências analisadas. Em 38400 *bps*, o XBee, em ambas as potências, obteve taxa de transferência em média quase 6 vezes superior ao LoRa, em ambas as potências, com SF7 e cerca de 13 vezes superior ao LoRa em SF9, mantendo seus PDRs em 100% em todos os cenários. Quanto ao tempo de envio em 38400 *bps*, o XBee foi cerca de 5 vezes mais rápido comparado ao LoRa em SF7 e SF9, nas duas potências analisadas. Por fim, em 57600 *bps* o XBee obteve taxa de transferência em média quase 5 vezes superior ao LoRa em SF7, em ambas as potências, e

15,5 vezes superior ao LoRa em SF9, mantendo também seus PDRs em quase 100% em todos os cenários. Em relação ao tempo de envio médio nesta taxa, o XBee foi cerca de 5 vezes mais rápidos, comparado ao LoRa em SF7 e cerca de 6 vezes comparado ao LoRa em SF9, nas duas potências analisadas.

Tabela 17 – Comparativo de vantagens médias percentuais entre LoRa e XBee, quanto a taxa, PDR e tempo, nas taxas de transmissão.

Comparativo	Potência (dBm)	Taxa transm. (bps)	Taxa transf. (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
LoRa SF7 x XBee	7	9600	↓ 78%	↓ 67%	↑ 47%
		38400	↓ 83%	↓ 14%	↑ 407%
		57600	↓ 81%	↓ 2%	↑ 421%
	20/21	9600	↓ 77%	↓ 66%	↑ 46%
		38400	↓ 83%	↓ 13%	↑ 406%
		57600	↓ 81%	↓ 2%	↑ 422%
LoRa SF9 x XBee	7	9600	↓ 77%	↓ 61%	↑ 70%
		38400	↓ 92%	↓ 62%	↑ 385%
		57600	↓ 94%	↓ 61%	↑ 503%
	20/21	9600	↓ 77%	↓ 61%	↑ 70%
		38400	↓ 92%	↓ 63%	↑ 383%
		57600	↓ 94%	↓ 61%	↑ 502%

↓ LoRa inferior ao XBee ↑ LoRa superior ao XBee ≅ similar

5.3 Resultado dos Experimentos *Human-in-the-Loop*

Esta seção exibe os resultados dos experimentos HITL, descritos na subseção 4.3.2, onde foram analisados, de modo geral, a taxa de transferência, PDR e tempo gastos entre o XBee e LoRa, em área externa, com simulações discretas de movimento em redes P2P e *mesh*, objetivando avaliar os rádios em ambientes próximos a uma FANET multimissão.

5.3.1 HITL-01 - Análise de Transferência

A seguir são expostos os resultados comparativos e considerações dos rádios, nas distâncias, quanto à média da taxa de transferência, PDR e tempo total de forma síncrona, em 9600, 38400 e 57600 *bps* em ambiente externo, nos cenários e parâmetros definidos e descritos na subseção 4.3.2. Salienta-se que em 100 *m* as comparações foram realizadas com os resultados de bancada, HIL-02, da subseção 5.2.2. Observa-se, também, que nas análises abaixo, o desvio padrão dos cenários são descritos por linhas verticais sobre as barras nos gráficos. As Figuras 44(a), (c) e (e) exibem, respectivamente, nas taxas de transmissão supracitadas, os gráficos comparativos das taxas de transferência, em *Kbps*, entre LoRa e XBee, nas distâncias e parâmetros definidos, com as médias nas respectivas potências e SFs. Além disso, as Figuras 44(b), (d) e (f) exibem os PDRs obtidos nas mesmas taxas. Por fim, as Figuras 45(a), (b) e (c) apresentam os tempos, em *s*, gastos pelos rádios nos envios em cada distância, nas mesmas taxas citadas.

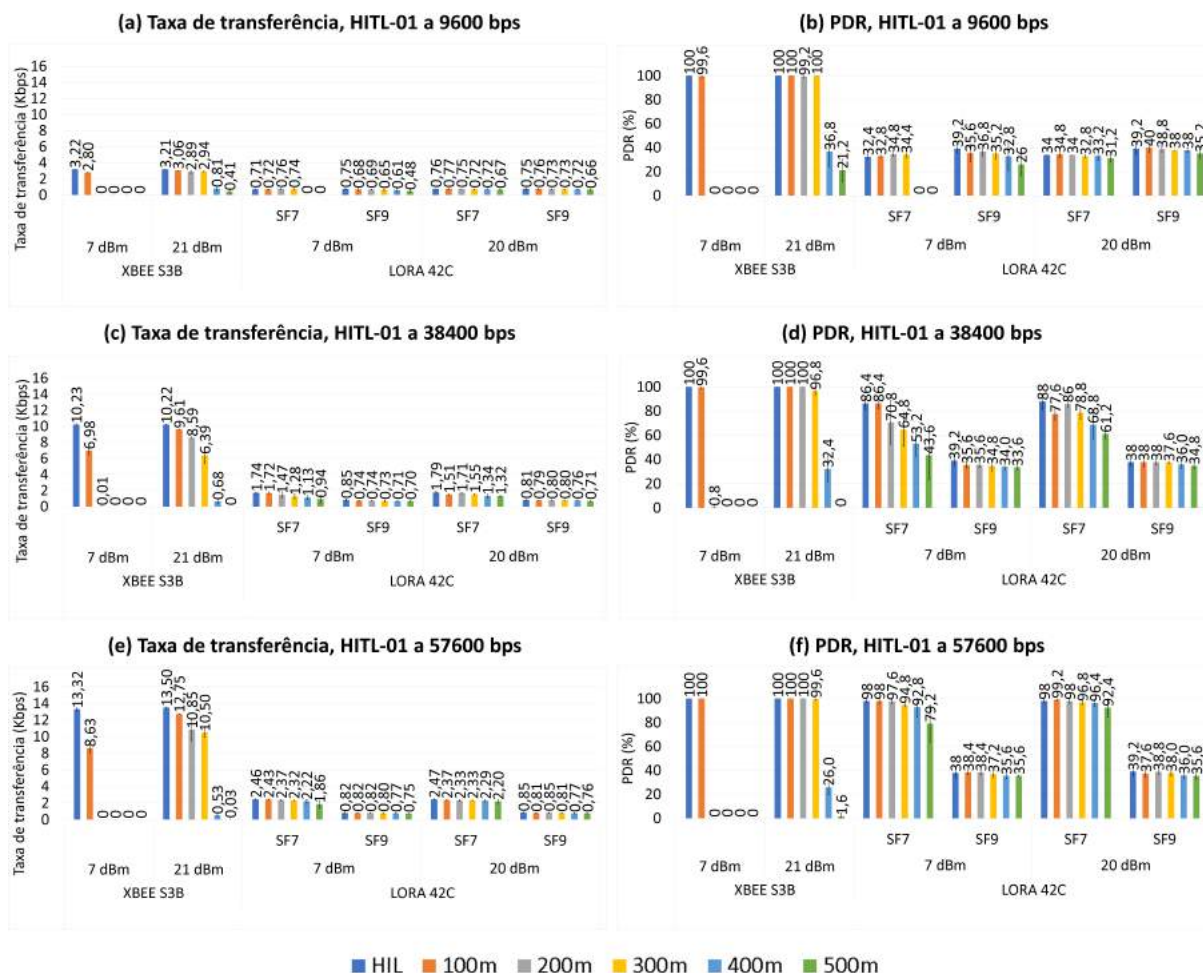


Figura 44 – Gráficos dos resultados comparativos HITL-01 entre Xbee e LoRa, a 9600 bps: (a) taxa de transferência e (b) PDR; nos cenários a 38400 bps: (c) taxa de transferência e (d) PDR; e a 57600 bps: (e) taxa de transferência e (f) PDR.

Considerações sobre taxas de transferência: com base nos resultados de taxa de transferência obtidos, a Tabela 18 apresenta uma avaliação percentual sintetizada da taxa de transferência do Xbee e LoRa, em cada distância e nas duas potências, em relação à taxa alcançada na distância anterior. Detalhes analíticos desses exames estão presentes na seção “HITL-01 - Dados de Transferência” do Apêndice B. Sendo assim, em 9600 bps verificou-se que o Xbee em 7 dBm só obteve taxas até os 100 m, sendo 4 vezes superior ao LoRa na mesma potência com SF7 e SF9, enquanto em 21 dBm o Xbee obteve reduzidas quedas até os 300 m, onde até este ponto foi cerca de 4 vezes superior ao LoRa em SF7 e SF9. As maiores quedas de taxa do Xbee, em 21 dBm, ocorreram a partir dos 400 m. Por outro lado o LoRa, apenas a partir de 400 m, em SF7 com 7 dBm, obteve taxa nula, demais cenários o LoRa manteve taxas com moderadas quedas, em ambas potências e SFs.

Em 38400 bps, primeiramente observou-se que o Xbee obteve taxas entre 2 e 3 vezes melhores comparadas aos resultados descritos em 9600 bps, enquanto o LoRa atingiu taxas cerca de 2 vezes superiores as suas taxas em 9600 bps com SF7, porém em SF9 ficaram moderadamente maiores. Analisando as taxas apenas em 38400 bps, verificou-se o

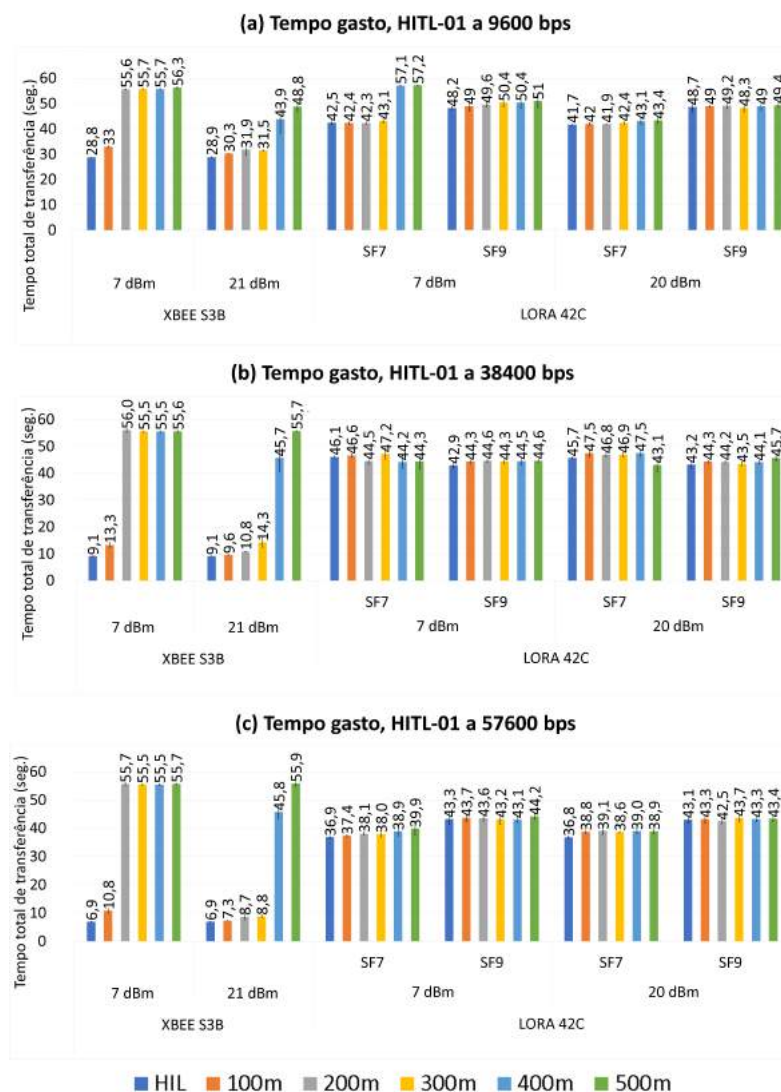


Figura 45 – Gráficos dos resultados comparativos dos tempos gastos do HITL-01 entre XBee e LoRa: (a) a 9600 bps; (b) a 38400 bps; e (c) a 57600 bps.

mesmo comportamento observado em 9600 bps que o XBee em 7 dBm também só obteve taxas até 100 m, sendo elas cerca de 4 vezes superiores ao LoRa na mesma potência com SF7 e 9 vezes superiores ao SF9. Em 21 dBm, o XBee obteve reduzidas quedas graduais até os 300 m, onde mantiveram resultados em média cerca de 5 vezes superior ao LoRa em SF7 e 10 vezes superior ao SF9. As maiores quedas de taxa do XBee, em 21 dBm, ocorreram, assim como em 9600 bps, a partir dos 400 m, sendo que em 500 m já não houve taxa registrada. Por outro lado, o LoRa, de modo geral, obteve taxas de transferência inferiores ao XBee, contudo, mesmo com aumento das distâncias, seu desempenho manteve taxas com discretas quedas, em ambos SFs.

Em 57600 bps observou-se que, na elevação de taxa de 38400 para 57600 bps, o XBee obteve taxas cerca de quase 1,5 vezes superior em 7 dBm e 21 dBm comparado aos resultados descritos em 38400 bps, enquanto o LoRa atingiu taxas em média quase 2 vezes superiores as suas taxas em 38400 bps com SF7 e ficando discretamente maiores em

SF9. Analisando apenas em 57600 bps, notou-se que o XBee em 7 dBm só obteve taxas aos 100 m, sendo 3,5 vezes superior ao LoRa na mesma potência com SF7 e 10,5 vezes superior ao SF9. Em 21 dBm, o XBee obteve reduzidas quedas até os 300 m, onde foi em média 5 vezes superior ao LoRa em SF7 e 14 vezes comparado ao SF9. As maiores quedas de taxa do XBee, em 21 dBm, ocorreram a partir dos 400 m e na sequência chegando a quase zero em 500 m. Por outro lado, o LoRa obteve taxas bem inferiores ao XBee, porém mesmo com aumento das distâncias seu desempenho manteve taxas com reduzidas quedas em ambos SFs, que não ultrapassaram 16% em 7 dBm e 5% em 20 dBm.

Tabela 18 – Comparativo percentual de taxa de transferência (Kbps) do XBee e LoRa, em diferentes taxas, potências e SFs, nas distâncias.

Comparativo % de taxa de transferência com à distância anterior								
Potência (dBm)	Rádio	SF	Taxa transm. (bps)	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
7	XBee	-	9600	↓13%	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ
			38400	↓32%	↓99,8%	ϕ	ϕ	ϕ
			57600	↓35%	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ
	LoRa	7	9600	≈	↑6%	↓3%	ϕ	ϕ
			38400	≈	↓15%	↓13%	↓12%	↓17%
			57600	≈	↓2%	↓2%	↓4%	↓16%
	LoRa	9	9600	↓9%	≈	↓6%	↓6%	↓21%
			38400	↓13%	≈	≈	↓3%	≈
			57600	≈	≈	↓2%	↓4%	↓3%
21/20	XBee	-	9600	↓5%	↓6%	↑2%	↓72%	↓49%
			38400	↓6%	↓11%	↓26%	↓89%	ϕ
			57600	↓6%	↓15%	↓3%	↓95%	↓94%
	LoRa	7	9600	≈	↓3%	↓4%	≈	↓7%
			38400	↓16%	↑13%	↓9%	↓14%	≈
			57600	↓4%	↓2%	≈	↓2%	↓4%
	LoRa	9	9600	≈	↓4%	≈	≈	↓8%
			38400	↓2%	≈	≈	↓5%	↓7%
			57600	↓5%	↑5%	↓5%	↓5%	≈

↓ inferior à taxa anterior ↑ superior à taxa anterior ≈ similar à taxa anterior ϕ sem resultados

Considerações sobre PDR: quanto aos PDRs obtidos pelo XBee e LoRa neste experimento, a Tabela 19 apresenta os resultados da avaliação percentual sintetizada da taxa de entrega dos rádios, em cada distância e nas duas potências, em relação à taxa alcançada na distância anterior. Os detalhes dessas análises de PDRs estão presentes na seção “HITL-01 - Dados de Transferência” do Apêndice B. Sendo assim, em 9600 bps notou-se que o XBee em 7 dBm só obteve cerca de 100% de PDR até os 100 m, sendo cerca de 3 vezes superior ao LoRa, na mesma potência, com SF7 e SF9. Em 21 dBm, o XBee obteve PDRs similares de cerca de 100% até 300 m, onde foram em média cerca de 66% superior ao LoRa em SF7 e cerca de 61% maior em SF9. Os maiores percentuais de quedas de taxa do XBee, em 21 dBm, ocorreram a partir dos 400 m, com 63% de queda, e na sequência em 500 m, chegando a queda de 16% atingindo cerca de 21% de entrega. Por outro lado, o LoRa em SF7, com 7 dBm, só obteve PDR, em média de 34%, até 300 m, já em 20 dBm manteve PDR em média de 33% até os 500 m. Em SF9, até a distância limite, as taxas de entregas foram em média cerca de 33% em SF9, com 7 dBm, e 38% em SF9 com 20 dBm. Com isso, mesmo com o aumento das distâncias o LoRa, nesta taxa, em ambas potências e SFs,

manteve de modo geral seu desempenho de PDR, com alguns resultados similares e com reduzidas quedas percentuais que não ultrapassaram 7% em 7 *dBm* e 3% em 20 *dBm*.

Em 38400 *bps*, observou-se que o XBee obteve PDRs próximos, comparados aos resultados descritos em 9600 *bps*, enquanto o LoRa em 38400 *bps*, em ambas as potências, atingiu em média o dobro de PDR em SF7 e manteve entregas próximas em SF9, comparado a 9600 *bps*. Analisando o PDR em 38400 *bps*, nota-se que o XBee em 7 *dBm* só obteve entrega, próxima a 100%, até os 100 *m*, sendo 13% superior ao LoRa com SF7 e 64% superior ao SF9, ambos em mesma potência. Em 21 *dBm*, o XBee obteve PDRs entre 97% e 100% até 300 *m*, onde foram em média cerca de 18% superior ao LoRa em SF7 e cerca de 61% maior que SF9. As maiores quedas de PDR do XBee, em 21 *dBm*, ocorreram, assim como em 9600 *bps*, também a partir dos 400 *m*. Por outro lado, o LoRa em SF7, em 7 *dBm*, obteve PDR de 86% em 100 *m*, decaindo gradativamente cerca de 10% a cada distância, até chegar a cerca de 44% em 500 *m*. Já em SF7 com 20 *dBm* manteve PDR em média de 80% até os 300 *m*, chegando a maiores quedas a partir dos 400 *m*, alcançando na distância limite o PDR de 61%. Em SF9, até 500 *m*, as taxas de entregas ficaram baixas, com moderados declínios, mantendo em média cerca de 35% de entrega, com 7 *dBm*, e 37% com 20 *dBm*. Com isso, nas distâncias o LoRa, em ambas potências e SFs, manteve seu desempenho de PDR com alguns resultados similares e reduzidas quedas, que não ultrapassaram 16% em 7 *dBm* e 10% em 20 *dBm*.

Em 57600 *bps*, notou-se que o XBee obteve PDRs próximos comparados aos resultados descritos em 38400 *bps*, enquanto o LoRa em 57600 *bps*, em ambas as potências, foi em média cerca de 1,5 vezes melhor em SF7 e ficaram próximos em SF9, comparados a 38400 *bps*. Analisando o PDR em 57600 *bps*, verificou-se que o XBee em 7 *dBm* só obteve PDR, de 100%, até os 100 *m*, sendo a entrega quase similar à do LoRa, na mesma potência, com SF7 e 3 vezes superior ao PDR com SF9. Em 21 *dBm*, o XBee obteve PDRs similares de cerca de 100% até 300 *m*, onde os resultados foram cerca de 2% superior ao LoRa em SF7 e cerca de 62% maior que SF9. Os maiores percentuais de quedas de PDR do XBee, em 21 *dBm*, ocorreram também a partir dos 400 *m*, com 74% de queda, e na sequência em 500 *m*, chegando a queda de 24% atingindo quase 2% de entrega. Por outro lado, o LoRa em SF7, nas 2 potências até os 500 *m*, obteve PDRs entre 92 e 99%, enquanto em SF9 as entregas ficaram entre 36% e 38%. Desta forma, o LoRa, em ambas potências e SFs, manteve seu PDR com alguns resultados similares e reduzidas quedas com aumento das distâncias, que não ultrapassaram 14% em 7 *dBm* e 4% em 20 *dBm*.

Considerações sobre os tempos gastos: com base nos resultados de tempo gasto expostos na Figura 45, a Tabela 62, do Apêndice B, apresenta os valores de tempo gasto pelo XBee e LoRa, em cada distância e nas duas potências analisadas. Desta forma, em 9600 *bps* verificou-se que o XBee em ambas potências foi mais rápido que o LoRa em suas potências e SFs, porém esse tempo reduzido só ocorreu enquanto houve entrega considerável de pacotes e não existiu necessidade de espera ao limite de 1 *s*, por um “ACK”.

Tabela 19 – Comparativo percentual do PDR do XBee e LoRa, em diferentes taxas, potências e SFs, nas distâncias.

Comparativo % de PDR com à distância anterior								
Potência (dBm)	Rádio	SF	Taxa transm. (bps)	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
7	XBee	-	9600	≈	φ	φ	φ	φ
			38400	≈	↓99%	φ	φ	φ
			57600	≈	φ	φ	φ	φ
	LoRa	7	9600	≈	↑2%	≈	φ	φ
			38400	≈	↓16%	↓6%	↓12%	↓10%
			57600	≈	≈	↓3%	↓2%	↓14%
	LoRa	9	9600	↓4%	≈	↓2%	≈	≈
			38400	↓4%	≈	≈	≈	≈
			57600	≈	≈	≈	↓2%	≈
21/20	XBee	-	9600	≈	≈	≈	↓63%	↓16%
			38400	≈	≈	↓3%	↓64%	φ
			57600	≈	≈	≈	↓74%	↓24%
	LoRa	7	9600	≈	≈	≈	≈	↓2%
			38400	↓10%	↑8%	↓7%	↓10%	↓8%
			57600	≈	≈	≈	≈	↓4%
	LoRa	9	9600	≈	≈	≈	≈	↓3%
			38400	≈	≈	≈	≈	≈
			57600	↓2%	≈	≈	↓2%	≈

↓ inferior à taxa anterior ↑ superior à taxa anterior ≈ similar à taxa anterior φ sem resultados

Assim, o XBee, em 7 dBm, obteve menores tempos somente até os 100 m, onde foi cerca de 9 s mais veloz que o LoRa em SF7 e cerca de 16 s mais rápido que SF9. Em 21 dBm, o XBee obteve até os 300 m tempos em média cerca de 11 s mais ágeis que o LoRa em SF7 e 18 s mais rápidos em SF9. Já em 400 m, o XBee foi quase 1 s mais lento que o LoRa em SF7 e cerca de 5 s mais rápido que SF9, enquanto que em 500 m o XBee foi cerca de 5 s mais lento que o LoRa em SF7 e com tempo quase similar comparado ao SF9.

Em 38400 bps observou-se que o XBee obteve tempos em média cerca de 20 s mais rápido em 7 dBm e 21 dBm, comparados aos resultados obtidos em 9600 bps. Por outro lado, o LoRa, em 38400 bps comparado a 9600 bps, obteve tempos em média cerca de 3 s maiores em SF7 com 7 dBm e 4 s em SF7 20 dBm. Em SF9 para ambas as potências foi em média cerca de 5 s mais rápido. Analisando em 38400 bps, pode-se verificar que o XBee também foi mais rápido de um modo geral, porém essa agilidade ocorreu em 7 dBm até os 100 m, onde foi 4 vezes mais veloz que o LoRa em SF7 e cerca de 3 vezes mais rápido que SF9. Em 21 dBm, o XBee obteve até os 300 m tempos em média cerca 36 s mais ágeis que o LoRa em SF7 e 32 s mais rápidos em SF9. Já em 400 m, o XBee foi cerca de 2 s mais rápido que o LoRa em SF7 e cerca de 2 s mais lento que SF9, enquanto em 500 m o LoRa em SF7 e SF9 passaram a ser mais céleres, respectivamente em 13 s e 10 s.

Com 57600 bps observou-se que o XBee obteve tempos nas transferências cerca de 2,5 s mais rápido em 7 dBm e em média cerca de 2 s mais ágil em 21 dBm, comparados aos resultados de 38400 bps. Por outro lado, o LoRa em 57600 bps, em ambas as potências, manteve tempos em média cerca de 7 s mais rápidos em SF7 e cerca de 1 s mais rápido em SF9, comparados a 38400 bps. Analisando o tempo em 57600 bps, nota-se que o XBee em 7 dBm obteve menores tempos somente até os 100 m, onde foi em média 3 vezes mais

veloz que o LoRa em SF7 e cerca de 4 vezes mais rápido que SF9. Em 21 *dBm*, o XBee obteve até os 300 *m* tempos em média cerca de 5 vezes mais ágeis que o LoRa em SF7 e SF9. Já em 400 *m* em diante, o LoRa em SF7 foi até 17 *s* mais rápido que o XBee, enquanto em SF9 essa vantagem chegou em até 13 *s* a menos.

Considerações finais dos rádios em HITL-01: notou-se em ambos os rádios, que a elevação da taxa de transmissão produziu melhoras nos parâmetros de taxa de transferência, PDR e tempo de ida e volta e, por fim, observou-se, independente da taxa, que o XBee em 7 *dBm* foi muito mais eficiente em relação ao LoRa em mesma potência, somente até os 100 *m*, enquanto o XBee em 21 *dBm* superou o LoRa somente até os 300 *m*. Sendo assim, em potência baixa nos cenários acima de 100 *m*, apenas o LoRa conseguiu obter alguma taxa transferência e PDR. Em contrapartida, na potência mais alta analisada, apenas aos 400 *m* em diante, o LoRa em ambos SFs superou o XBee quanto a taxa de transferência, PDR e tempo de ida do pacote e volta do “ACK”.

5.3.2 HITL-02 - Análise da Transferência Assíncrona

A seguir, serão expostos os resultados e considerações da análise assíncrona entre os rádios nos limites de distância em ambiente externo, com 57600 *bps* e empregando os parâmetros descritos na subseção 4.3.2. Esses resultados foram comparados às respostas obtidas nos envios síncronos do HITL-01 da subseção 5.3.1. Observa-se que o desvio padrão dos cenários foi representado por linhas verticais sobre as barras nos gráficos.

XBee e LoRa síncrono e assíncrono: a Figura 46(a) e (b) exhibe, respectivamente, o comparativo da taxa de transferência, em modo síncrono com o envio do pacote e retorno do “ACK” e taxa de envio, assíncrona sem confirmação de entrega e analisando o PDR no destino, dos rádios XBee em 7 *dBm* e 21 *dBm*, e LoRa, em 7 *dBm* e em 20 *dBm*, com SF7 e SF9, em bancada e nos limites de distância em área externa. A Figura 46(c) e (d) faz a mesma comparação em relação ao PDR e por fim, a Figura 46(e) e (f), apresenta a comparação quanto tempo gasto, respectivamente para rádios XBee e LoRa.

Considerações sobre o XBee e LoRa em modo síncrono e assíncrono: com base nos resultados obtidos, a Tabela 20 apresenta uma avaliação percentual dos parâmetros do XBee entre o envio assíncrono e síncrono, nas distâncias e potências analisadas. Com isso, quanto ao XBee em 7 *dBm* em bancada, nota-se que o assíncrono teve taxas de envio cerca de 3 vezes superior ao síncrono, com PDR similar, em 100%, e tempos cerca de 3 vezes mais rápidos. Já a 200 *m*, o envio síncrono foi mais lento e não apresentou taxa de transferência, enquanto o assíncrono foi cerca de 27 vezes mais veloz e com taxa de envio demasiadamente superior, devido a não obtenção de “ACKs”. Todavia seu PDR, embora superior ao síncrono, não ultrapassou 3%, ratificando a limitação de alcance deste rádio nesta potência. Em relação ao XBee em 21 *dBm* assíncrono, observou-se em bancada um desempenho melhor que o síncrono, também similar ao ocorrido em 7 *dBm*. Em 500 *m*,

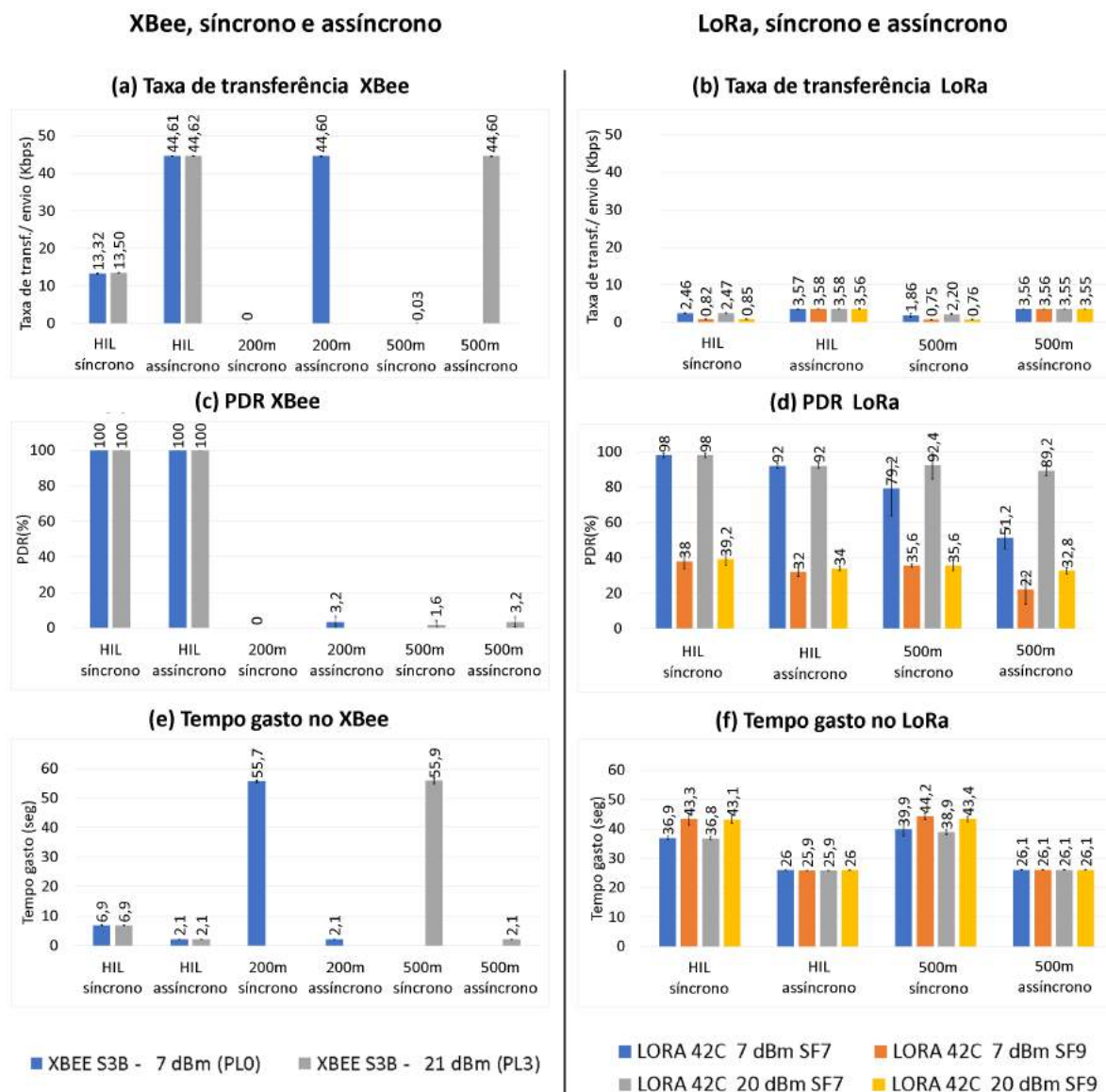


Figura 46 – Gráficos dos resultados comparativos HITL-02 do XBee e LoRa, em em modo síncrono e assíncrono, quanto a taxa de transferência: (a) XBee; e (b) LoRa; quanto a PDR: (c) XBee; e (d) LoRa; e tempo: (e) XBee; e (f) LoRa.

com 21 dBm, o XBee assíncrono obteve significativa vantagem quanto à taxa de envio e baixíssimo tempo, porém, com PDR o dobro do síncrono, mas só alcançando pouco mais de 3% na entrega. Isso indica que nessa potência e em ambos os modos de envio, a restrição do rádio XBee no envio a essa distância, considerando um cenário de comunicação P2P. Os dados analíticos desse experimento estão presentes na seção “HITL-02 - Dados de Transferência Assíncrona” do Apêndice B.

Quanto ao LoRa, a Tabela 21 apresenta uma análise percentual acerca dos resultados obtidos, em modo assíncrono, considerando comparação em relação ao síncrono, onde observou-se que em bancada, as taxas de envio foram superiores em modo assíncrono, com ambas as potências, cerca de 1,5 vezes maior em SF7 e cerca de 4 vezes maior em SF9, em comparação ao mesmo cenário síncrono. Em 500 m assíncrono, essa taxa de

envio, em ambas as potências, também foi mais eficiente em quase o dobro com SF7 e cerca de 5 vezes maior em SF9. O LoRa obteve taxas de envio mais altas, pois apesar do intervalo de 0,5 s entre a transmissão de cada pacote não foi necessário esperar até 1 s por um “ACK”. Quanto ao PDR, em SF9 houve uma modesta piora em assíncrono, fruto do intervalo menor entre os envios, em relação ao síncrono, onde, também, as taxas foram bem próximas em bancada e a 500 m. Contudo, em SF7, ao contrário do esperado, ocorreu uma queda de PDR no modo assíncrono, onde em 7 dBm a queda foi de cerca de 28% e em 20 dBm cerca de 3%. De acordo com estes PDRs obtidos no LoRa, na subseção 5.3.3 serão apresentados os experimentos que enfatizam os intervalos ideais entre as transmissões assíncronas de cada pacote para que haja uma melhora do PDR em cada SF analisado. Por fim, ressalta-se, como exposto na fundamentação teórica, o fato de se aumentar o SF leva a um aumento no ToA e, assim, o envio síncrono gerou tempos moderadamente maiores em SF9 comparado ao SF7. Além disso, não empregou intervalos entre os envios, mas esperou até 1 s pelo “ACK” e isto também corroborou para maior celeridade em modo assíncrono, mesmo com os intervalos, nos cenários de bancada e a 500 m, em ambas as potências e SFs. Detalhes desse experimento estão presentes na seção “HITL-02 - Dados de Transferência Assíncrona” do Apêndice B.

Tabela 20 – Comparativo percentual do XBee em modo assíncrono em relação ao síncrono, quanto aos parâmetros nas potências e distâncias.

Potência (dBm)	Distâncias	Taxa transf.(Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
7	Bancada (HIL)	235%	≅	↓ 70%
	200 m	↑ ϕ	↑ 3%	↓ 96%
21	Bancada (HIL)	231%	≅	↓ 70%
	500 m	↑ ϕ	↑ 2%	↓ 96%

↓ assíncrono inferior ao síncrono
 ↑ assíncrono superior ao síncrono
↑ ϕ assíncrono superior ao síncrono, com síncrono sem resultados
 ≅ assíncrono similar ao síncrono

Tabela 21 – Comparativo percentual do LoRa em modo assíncrono em relação ao síncrono, quanto aos parâmetros nas potências, SFs e distâncias.

Potência (dBm)	SF	Distâncias	Taxa transf.(Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
7	7	Bancada (HIL)	↑ 45%	↓ 6%	↓ 30%
		500 m	↑ 91%	↓ 28%	↓ 35%
	9	Bancada (HIL)	↑ 337%	↓ 6%	↓ 40%
		500 m	↑ 375%	↓ 14%	↓ 41%
20	7	Bancada (HIL)	↑ 45%	↓ 6%	↓ 30%
		500 m	↑ 61%	↓ 3%	↓ 33%
	9	Bancada (HIL)	↑ 319%	↓ 5%	↓ 40%
		500 m	↑ 367%	↓ 3%	↓ 40%

↓ assíncrono inferior ao síncrono
 ↑ assíncrono superior ao síncrono
↑ ϕ assíncrono superior ao síncrono, com síncrono sem resultados
 ≅ assíncrono similar ao síncrono

Considerações finais dos rádios em HITL-02: nas comparações entre os modos de envio, ratifica-se que o envio assíncrono é primordial para uma brevidade nas atividades, principalmente quando aplicados à FANET, onde o tempo para resposta do VANT precisar ser instantâneo. Nas analogias realizadas, o XBee, assíncrono P2P, produziu valiosa melhora

de taxa e tempo de envio em 7 dBm, a 200 m, e 21 dBm, a 500 m, porém o PDR teve progresso pouco significativo, o que demonstra uma limitação de alcances nessas potências e distâncias analisadas. Quanto ao LoRa, esse padrão gerou melhora relevante em envio assíncrono quanto a taxa de envio e tempo de envio, porém as entregas no destino tiveram moderados declínios, provavelmente fruto dos intervalos de envios entre os pacotes, sendo estas esperas entre as transmissões investigadas no teste HITL-03. Analisando os rádios apenas em modo assíncrono, a Tabela 22, a seguir, apresenta uma avaliação percentual entre os rádios em modo assíncrono, onde pode-se verificar que o XBee em 7 dBm não obtém resultados em 500 m, apenas chega a 200 m, como descrito anteriormente, enquanto o LoRa, em ambas as potências e SFs, obteve resultados em 500 m. Sendo assim, constatou-se que em bancada (HIL) e a 500 m as taxas de envio do XBee 21 dBm foram cerca de 12 vezes superiores ao LoRa e também 12 vezes mais ágeis no tempo gasto. Além disso, diferentemente do envio síncrono, o modo assíncrono, para ambos os rádios, mantêm similares os resultados de taxa de envio e tempo diante da variação de distância. Contudo em relação ao PDR em bancada (HIL), nota-se que o XBee mantém 100% em ambas as potências, enquanto o LoRa conseguiu, em ambas as potências, na faixa de 90% em SF7 e 30% em SF9. Em contrapartida, em 500 m, a superioridade é transferida ao LoRa, onde o XBee em 7 dBm não teve alcance e resultados, enquanto LoRa na mesma potência chegou a cerca de 79% em SF7 e 36% em SF9. Por fim, o XBee em 21 dBm, a 500 m, obteve PDR de cerca de 3%, ao passo que LoRa chegou a cerca de 89% em SF7 e quase 33% em SF9. Os dados analíticos dessa comparação estão presentes na seção “HITL-02 - Dados de Transferência Assíncrona” do Apêndice B.

Tabela 22 – Comparativo percentual entre LoRa e XBee no HITL-02, em modo assíncrono, na bancada e a 500 m.

Comparativo	Potência (dBm)	Distância	Taxa Transf. (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
LoRa SF7 x XBee	7	bancada	↓ 92%	↓ 8%	↑ 1138%
		500 m	↑ ϕ	↑ ϕ	↑ ϕ
	20/21	bancada	↓ 92%	↓ 8%	↑ 1133%
		500 m	↓ 92%	↑ 86%	↑ 1143%
LoRa SF9 x XBee	7	bancada	↓ 92%	↓ 68%	↑ 1133%
		500 m	↑ ϕ	↑ ϕ	↑ ϕ
	20/21	bancada	↓ 92%	↓ 66%	↑ 1138%
		500 m	↓ 92%	↑ 30%	↑ 1143%

↓ LoRa inferior ao XBee sem alcance e resultados ↑ LoRa superior ao XBee ↑ ϕ LoRa superior, porém XBee sem alcance

5.3.3 HITL-03 - Análise da Latência e PDR Assíncronos no LoRa

Abaixo, são expostos os resultados da análise assíncrona do percentual de pacotes recebidos corretamente no destino, os perdidos e truncados, em função do intervalo entre envios dos pacotes, para suprir as latências do LoRa, conforme descrito na subseção 4.3.2, com parâmetros e cenários em SF7 e SF9. A Figura 47(a) apresenta o PDR assíncrono

P2P do LoRa, com 20 dBm a 57600 bps, em diferentes intervalos de envio a 500 m e a Figura 47(b), o mesmo a 800 m.

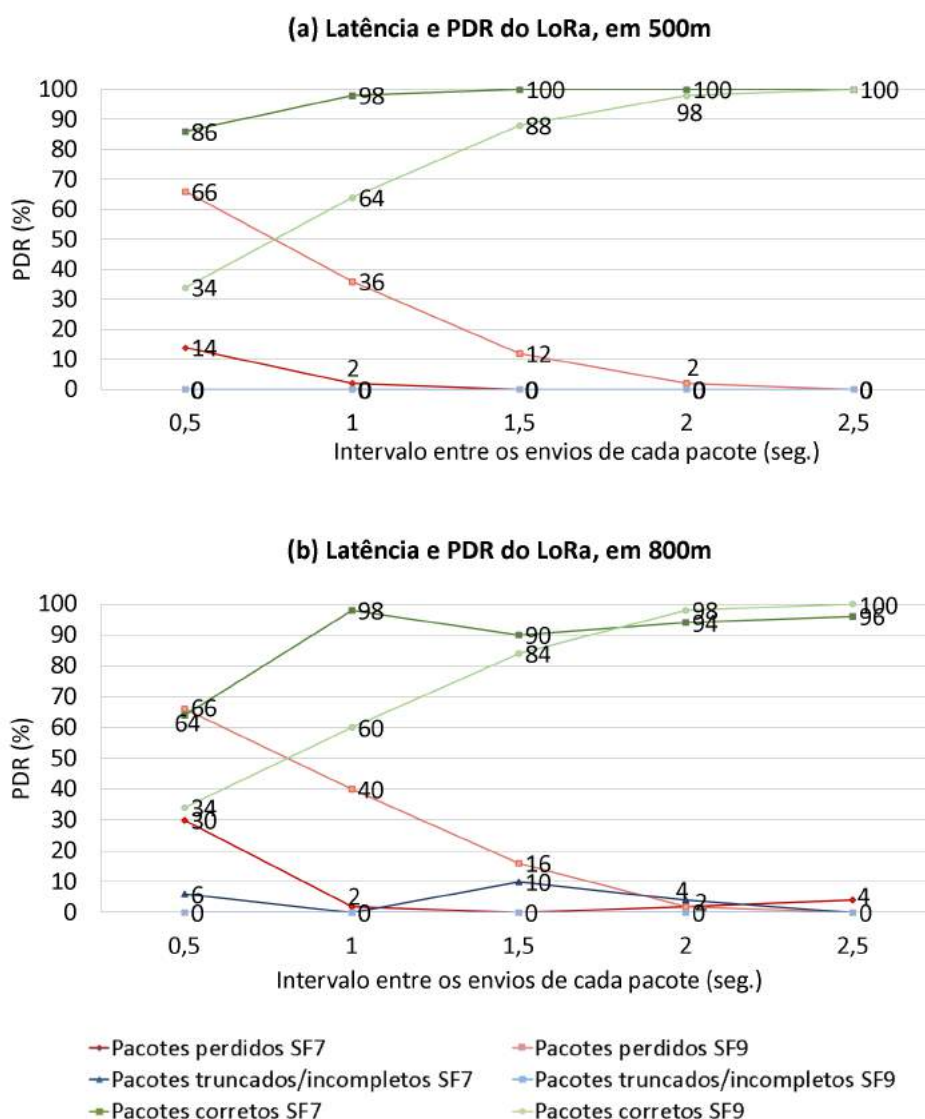


Figura 47 – PDR do LoRa no HITL-03, em função dos intervalos entre envios P2P assíncrono com SF7 e SF9: (a) em 500 m; (b) em 800 m.

Considerações finais do LoRa em HITL-03: com base nos resultados de latência e PDR, foi elaborada a Tabela 23 com uma síntese do percentual de pacotes entregues, incompletos e perdidos em cada SF nos intervalos entre os envios. Assim, confirma-se que nas distâncias analisadas houve queda de pacotes perdidos e aumento igual ou superior a 90% dos recebidos corretamente, quando empregados os intervalos entre envios de 1 s ou superior, em SF7, e utilizados 2 s ou mais em SF9. Isso ratifica a necessidade de intervalos maiores proporcionalmente a característica e aumento do SF e assim confirma a tendência, no envio assíncrono, que o uso de maiores intervalos produzam melhores desempenhos na entrega bem sucedida, corroborando para o fato do PDR no HITL-02, do experimento anterior, com 0,5 s, ter atingido resultados inferiores ao envio síncrono.

Tabela 23 – Análise percentual do PDR LoRa, em virtude da latência no envio P2P assíncrono com SF7 e SF9, em 500 e 800 m.

SF7	500 m					800 m				
	intervalo entre envios de cada pacote*					intervalo entre envios de cada pacote*				
	0,5	1	1,5	2	2,5	0,5	1	1,5	2	2,5
Pacotes corretos	↘86%	↑98%	↑100%	↑100%	↑100%	↘64%	↑98%	↑90%	↑94%	↑96%
Pacotes incompletos	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ	↓6%	ϕ	↓10%	↓4%	ϕ
Pacotes perdidos	↓14%	↓2%	ϕ	ϕ	ϕ	↓30%	↓2%	ϕ	↓2%	↓4%

SF9	500 m					800 m				
	intervalo entre envios de cada pacote*					intervalo entre envios de cada pacote*				
	0,5	1	1,5	2	2,5	0,5	1	1,5	2	2,5
Pacotes corretos	↓34%	↘64%	↘88%	↑98%	↑100%	↓34%	↘60%	↘84%	↑98%	↑100%
Pacotes incompletos	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ
Pacotes perdidos	↘66%	↓36%	↓12%	↓2%	ϕ	↘66%	↓40%	↓16%	↓2%	ϕ

↓ percentual < 40% ↘ 40% ≤ percentual < 90% ↑ percentual ≥ 90% ϕ percentual nulo * em s

5.3.4 HITL-04 - Análise de PDR Assíncrono

Após os experimentos HITL-04, os seguintes PDRs foram obtidos, conforme expostos na Figura 48, onde analisou-se a taxa de entrega dos rádios assíncronos em P2P, em bancada e nas mesmas distâncias do HITL-01, definidos e descritos na subseção 4.3.2, com XBee em 21 dBm e LoRa com 20 dBm, em SF7 e SF9 com distintos intervalos de envio.

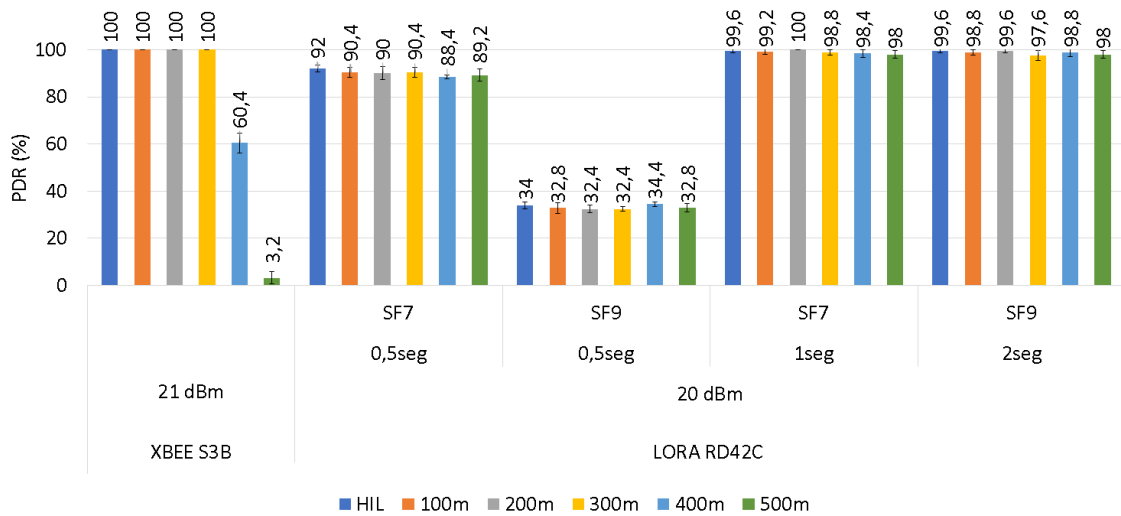


Figura 48 – PDR do XBee e LoRa, em P2P, nos cenários do HITL-04.

Considerações finais dos rádios em HITL-04: com base nas taxas de entrega obtidas neste experimento a Tabela 24 apresenta uma análise sintetizada dos PDRs do XBee e LoRa, onde pode-se constatar que LoRa, em ambas as potências e SFs, obteve PDR superior a 90% em quase a totalidade das distâncias e intervalos de envio, exceto em SF9, com intervalo de 0,5 s, onde em todas as distâncias não ultrapassaram PDR de 34%. Por outro lado, o XBee se manteve com ótimo desempenho, em 100%, até 300 m, contudo, a partir dos 400 m, há uma queda de PDR, chegando a quase zero em 500 m. Em contrapartida, o LoRa de 400 a 500 m em SF7, com 0,5 s e 1 s, e SF9, com 2 s, manteve taxas altas entre 88 e 99%. Por fim, a Tabela 25 apresenta um comparativo do

desempenho do PDR LoRa, em seus SFs e intervalos de envio, em relação ao XBee, onde pode-se verificar que o LoRa, nos intervalos de 0,5 s, com SF9, foi inferior ao XBee até os 400 m e no mesmo intervalo com SF7 foi inferior ao XBee até os 300 m. Para intervalos de 1 s em SF7 e 2 s em SF9, o LoRa obteve PDRs similares ao XBee até 300 m, contudo, em maiores distâncias houve uma superioridade do LoRa em quase todos os SFs e intervalos, exceto, como supracitado, o SF9 com 0,5 s em 400 m.

Tabela 24 – Análise de PDR do XBee e LoRa, em modo assíncrono P2P para diferentes distâncias, SF e intervalos de envio.

XBee assíncrono, com 21 dBm (PL3), a 57600 bps						
intervalo de envio	bancada (HIL)	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
sem intervalo	↑ 100%	↑ 100%	↑ 100%	↑ 100%	↘ 60,4%	↓ 3,2%

LoRa assíncrono, com 20 dBm, a 57600 bps						
SF7						
intervalo de envio	bancada (HIL)	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
0,5 s	↑ 92,0%	↑ 90,4%	↑ 90,0%	↑ 90,4%	↘ 88,4%	↘ 89,2%
1 s	↑ 99,6%	↑ 99,2%	↑ 100%	↑ 98,8%	↑ 98,4%	↑ 98,0%

SF9						
intervalo de envio	bancada (HIL)	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
0,5 s	↓ 34,0%	↓ 32,8%	↓ 32,4%	↓ 32,4%	↓ 34,4%	↓ 32,8%
2 s	↑ 99,6%	↑ 98,8%	↑ 99,6%	↑ 97,6%	↑ 98,8%	↑ 98,0%

↓ PDR < 40%
 ↘ 40% ≤ PDR < 90%
 ↑ PDR ≥ 90%
 ϕ PDR nulo

Tabela 25 – Comparativo de performance do PDR do LoRa em relação ao XBee, em modo assíncrono P2P para diferentes distâncias, SF e intervalos de envio.

Comparativo de performance do PDR (%) do LoRa em relação ao XBee, em 20/21 dBm							
SF	intervalo de envio	bancada (HIL)	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
7	0,5 s	↓ 8%	↓ 10%	↓ 10%	↓ 10%	↑ 28%	↑ 86%
	1 s	≈	≈	≈	≈	↑ 38%	↑ 95%
9	0,5 s	↓ 66%	↓ 67%	↓ 68%	↓ 68%	↓ 26%	↑ 30%
	2 s	≈	≈	≈	↓ 2%	↑ 38%	↑ 95%

↓ PDR LoRa inferior ao XBee
 ↑ PDR LoRa superior ao XBee
 ≈ PDR LoRa similar ao XBee
 ϕ PDR nulo

5.3.5 HITL-05 - Análise da Transferência Assíncrona P2P e Mesh

Conforme descritos na subseção 4.3.2, a seguir serão expostos os resultados e considerações do estudo assíncrono dos rádios, quanto ao PDR, taxa de envio e tempo gasto, com potências altas em 57600 bps, nas distâncias de até 1250 m em rede P2P e mesh, ambientes que se aproximam de uma FANET, e por fim feita uma análise comparativa entre ambos os rádios. Cumpre destacar que o experimento mesh de 2 saltos em 500 m não foi realizado, para ambos os rádios, em virtude da distância curta entre os nós e por apresentar neste cenário um PDR de quase 100% em 1 salto, tendenciando a melhores resultados com mais saltos. Por propensão que os resultados se mantivessem sem taxa de entrega, outros cenários P2P e mesh também não foram efetivados, em determinadas distâncias, por já apresentarem resultados de PDRs nulos em 1 ou 2 distâncias anteriores com mesmo cenário P2P ou mesh.

XBee P2P e mesh

PDR do XBee P2P e *mesh*: a Figura 49 exibe os resultados de PDR obtidos com o XBee com 21 dBm (PL3), em P2P e *mesh*, nas distâncias *d* analisadas.

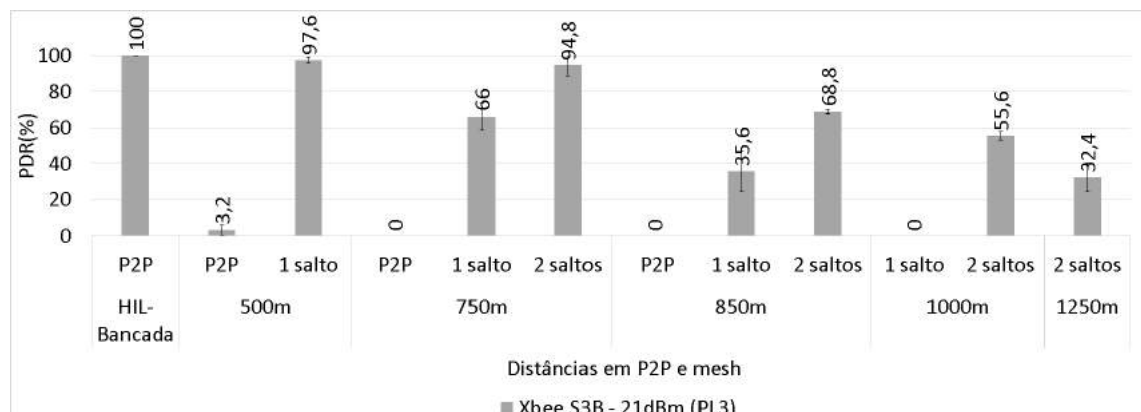


Figura 49 – PDR do XBee, em P2P e *mesh*, com 21 dBm, nas distâncias do HITL-05.

Considerações sobre PDR do XBee P2P e *mesh*: pode-se observar, conforme Figura 49 em P2P, que o rádio XBee em bancada, como analisado na subseção 5.3.2, teve taxa de 100%, porém a partir dos 500 m já quase não recebe mais pacotes em P2P, cerca de 3%, sendo ratificado que nas demais distâncias P2P analisadas o PDR foi nulo. As Tabelas 26(a) e (b), fazem uma análise comparativa dos desempenhos nas distâncias analisadas, respectivamente da rede *mesh* em relação à P2P e da rede de 2 saltos comparado a 1 salto. Ao fim verificou-se que o XBee em 2 saltos teve desempenho de PDR superior, em todas as distâncias, comparado à P2P e a 1 salto. Tal acontecimento corrobora para que neste rádio e parâmetros sejam necessários mais nós em *mesh* encurtando as distâncias entre a ECS e o VANT destino e que, conseqüentemente, melhorem ainda mais a taxa de entrega. Os dados analíticos dessas comparações estão presentes na seção “HITL-05 - Dados de Transferência Assíncrona P2P e Mesh” do Apêndice B.

Tabela 26 – Performance PDR da rede XBee P2P e *mesh*.

(a) PDR XBee *mesh* comparado à P2P

Comparativo	500 m	750 m	850 m	1000 m	1250 m
1 salto x P2P	↑ 94%	↑ 66%	↑ 36%	ϕ	—
2 saltos x P2P	—	↑ 95%	↑ 69%	↑ 56%	↑ 32%

↓ inferior à P2P ↑ superior à P2P ≅ similar à P2P ϕ PDR nulo no salto — não realizado

(b) PDR XBee *mesh* com 2 saltos comparado a 1 salto

500 m	750 m	850 m	1000 m	1250 m
—	↑ 29%	↑ 33%	↑ 56%	↑ 32%

↓ 2 saltos inferior a 1 salto ↑ 2 saltos superior a 1 salto ≅ 2 saltos similar a 1 salto
 ϕ PDR nulo — não realizado

Taxa de envio do XBee P2P e *mesh*: a Tabela 68, do Apêndice B, exibe as taxas de envio médias dos pacotes para cada cenário analisado.

Considerações sobre a taxa de envio do XBee P2P e *mesh*: de acordo com a Tabela 68, do Apêndice B, como anteriormente observado nas considerações finais da subseção 5.3.2, nota-se que as taxas de envio médias do XBee em modo assíncrono ficam similares, entre 44,60 e 44,65 *Kbps*, independente da distância e cenário P2P ou *mesh* analisado.

Tempo de envio e recepção do XBee P2P e *mesh*: a Figura 50 exibe dentro das distâncias analisadas, em P2P e *mesh*, os tempos médios de envio e recepção do XBee.

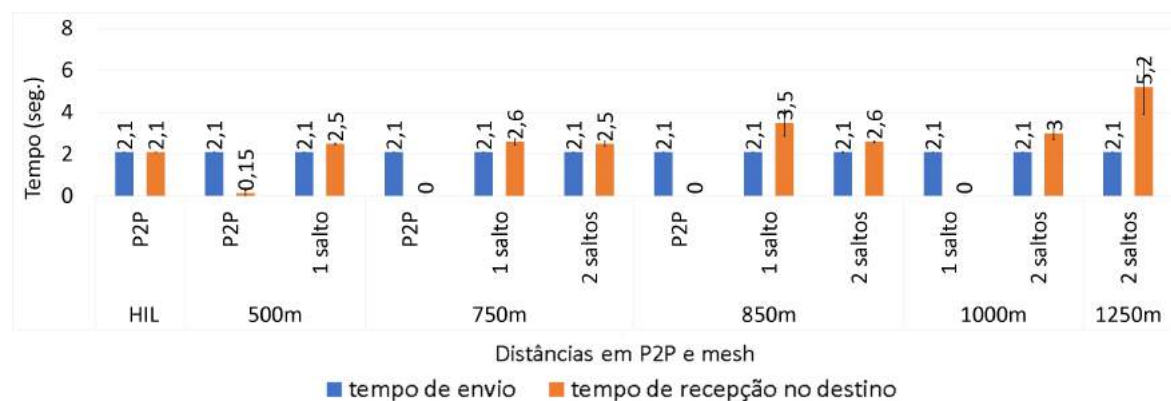


Figura 50 – Tempo médio de envio e recepção do XBee em P2P e *mesh*, no HITL-05.

Considerações sobre o tempo de envio e recepção do XBee P2P e *mesh*: nota-se na Figura 50 que, devido a transmissão assíncrona, a média dos tempos e desvio padrão de transmissão ficaram similares independente da alteração de P2P/*mesh* ou distâncias, como anteriormente observado nas considerações finais da subseção 5.3.2, com valores de tempo de envio médio de 2,1 *s*. Em relação ao tempo médio de recepção no destino, nota-se que este tempo é idêntico ao tempo de envio em bancada (HIL) e quase nulo em 500 *m* com P2P, pois neste cenário já quase não há entrega de pacotes no destino. Contudo, nas demais distâncias até 1000 *m* em rede *mesh*, quando houve entrega em seu uso, produziu-se um aumento no tempo de recepção comparado ao tempo de envio de cerca de 0,4 a 0,5 *s* a mais, com exceção do cenário de 1 salto a 850 *m*, que excepcionalmente aumentou cerca de 1,4 *s* e o cenário de 1000 *m* com 2 saltos, que aumentou 0,9 *s*. Na maior distância analisada, 1250 *m*, onde só houve entrega em 2 saltos *mesh*, este tempo de recepção foi de cerca de 2,5 vezes superior ao tempo de envio. Os casos com desvios discrepantes foram repetidos no local e mantiveram a similaridade com os resultados expostos.

LoRa P2P e *mesh*

PDR do LoRa P2P e *mesh*: a Figura 51 exibe os resultados dos PDRs com o LoRa em P2P e *mesh*, de 1 e 2 saltos, nas distâncias *d* analisadas.

Considerações sobre PDR do LoRa P2P e *mesh*: de acordo com os resultados expostos na Figura 51, primeiramente é importante ressaltar que, nesta implementação do rádio LoRa, a partir dos cenários em 850 *m* até 1250 *m*, alguns testes foram repetidos

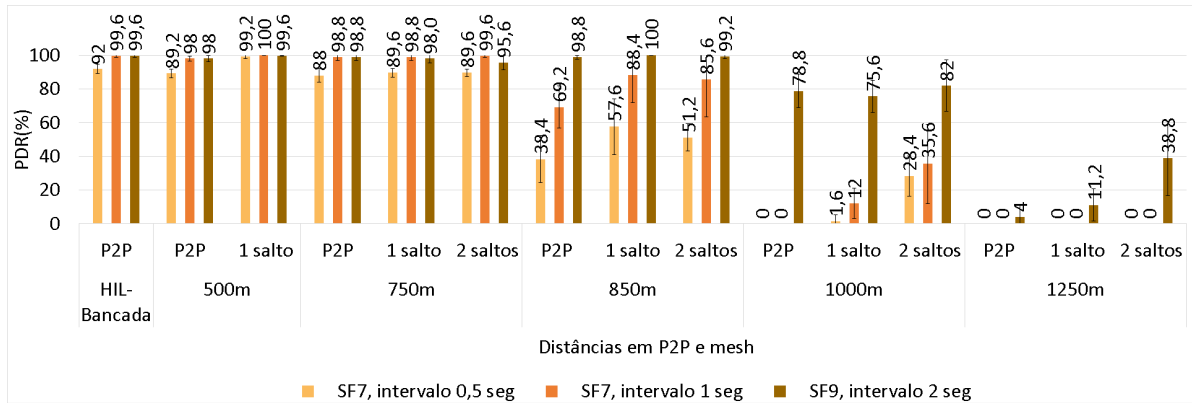


Figura 51 – PDR do LoRa, em P2P e *mesh*, com 20 dBm, nas distâncias do HITL-05.

nos mesmos locais, em virtude de oscilações dos resultados com elevados desvios padrões obtidos, contudo mantiveram a similaridade com os resultados expostos e assim nota-se que este foi o real comportamento tanto para P2P quanto para *mesh* em SF7 e SF9.

Quanto à análise do LoRa em P2P no HITL-05, a Tabela 27 exibe um comparativo dos PDRs, em P2P, em relação à distância anterior, nos SFs e intervalos. Além disso, a comparação na primeira distância, a 500 m, foi realizada com os PDRs obtidos nos resultados de bancada (HIL), expostos na subseção 5.3.4. Ao final, o LoRa conseguiu PDRs altos em P2P até 750 m para SF7, em ambos os intervalos, e até 850 m para SF9. Contudo, verificou-se, que os rádios em SF7, em ambos os intervalos a 850 m, sofrem quedas que progridem na sequência para taxas nulas a partir de 1000 m, enquanto em SF9, devido as características deste fator, somente após os 850 m, sofrem queda gradual e a 1250 m têm uma acentuada baixa na entrega. Mais detalhes desse experimento estão presentes na seção “HITL-05 - Dados de Transferência Assíncrona P2P e *Mesh*” do Apêndice B.

Tabela 27 – Performance de PDR, entre as distâncias, da rede LoRa em P2P.

PDR do LoRa P2P comparado ao PDR da distância P2P anterior						
SF	Intervalo	500 m	750 m	850 m	1000 m	1250 m
7	0,5 s	↓3%	≈	↓50%	ϕ	ϕ
7	1 s	↓2%	≈	↓30%	ϕ	ϕ
9	2 s	↓2%	≈	≈	↓20%	↓75%

↓ inferior à distância anterior
 ↑ superior à distância anterior
 ≈ similar à distância anterior
 ϕ PDR nulo na distância

A Tabela 28(a) apresenta uma verificação comparativa das performances *mesh*, em relação à P2P, da rede de 1 salto e em seguida com 2 saltos. Outrossim, a Tabela 28(b) apresenta a mesma análise comparando o desempenho da rede *mesh* de 2 saltos em relação a 1 salto. Em primeira análise, verificou-se que o emprego da rede *mesh* LoRa, em todos os SF e intervalos, encurtou os caminhos e gerou alternativas de rotas e ganhos que variaram de 2 até 36% na entrega em comparação à P2P, sendo esses ganhos mais visíveis em SF7 até 1000 m e em SF9, em maiores distâncias, a partir de 1000 m. Contudo, a comparação de desempenho PDR entre os saltos *mesh*, exposta na Tabela 28(b), mostra que o uso

de 2 saltos nestes experimentos, comparados aos resultados de 1 salto só, produziram ganhos para ambos os intervalos e SFs em distâncias iguais ou superiores a 1000 m. Por fim, nota-se, também, que na maior distância analisada, 1250 m, houve pouca entrega de pacotes em SF9, P2P e *mesh*, e em SF7, em ambos os intervalos, tanto em P2P quanto em *mesh*, a entrega foi totalmente nula. O fabricante deste rádio LoRa não informa o seu alcance máximo previsto, contudo era esperado como descrito na subseção 2.3.2 um maior alcance do SF9. Em virtude deste fato, mais a frente, foi executado este mesmo teste aqui exposto, na distância de 1250 m, porém com redução do *payload* enviado de 232 bytes para um pouco mais da metade, 120 bytes. Detalhes analíticos desse experimento estão presentes na seção “HITL-05 - Dados de Transferência Assíncrona P2P e Mesh” do Apêndice B.

Tabela 28 – Performance de PDR da rede LoRa P2P e *mesh*.(a) PDR LoRa *mesh* comparado à P2P

Comparativo	SF	intervalo (s)	500 m	750 m	850 m	1000 m	1250 m
1 salto x P2P	7	0,5	↑10%	↑2%	↑19%	↑2%	ϕ
	7	1	↑2%	≅	↑19%	↑12%	ϕ
	9	2	↑2%	≅	≅	↓3%	↑7%
2 saltos x P2P	7	0,5	—	↑2%	↑13%	↑28%	ϕ
	7	1	—	≅	↑16%	↑36%	ϕ
	9	2	—	↓3%	≅	↑3%	↑35%

↓ inferior à P2P ↑ superior à P2P ≅ similar à P2P ϕ PDR nulo no salto — não realizado

(b) PDR LoRa *mesh* com 2 saltos comparado a 1 salto

SF	intervalo (s)	500 m	750 m	850 m	1000 m	1250 m
7	0,5	—	≅	↓6%	↑27%	ϕ
7	1	—	≅	↓3%	↑24%	ϕ
9	2	—	↓2%	≅	↑6%	↑28%

↓ 2 saltos inferior a 1 salto ↑ 2 saltos superior a 1 salto ≅ 2 saltos similar a 1 salto ϕ PDR nulo
— não realizado

Taxa de envio do LoRa P2P e *mesh*: a Tabela 72, do Apêndice B, exibe as taxas de envio médias dos pacotes para cada cenário analisado com 232 bytes.

Considerações sobre a taxa de envio do LoRa P2P e *mesh*: de acordo com a Tabela 72, do Apêndice B, e como anteriormente observado nas considerações finais da subseção 5.3.2, assim como também ocorrido nos rádios XBee, nota-se que as taxas de envio médias assíncronas no LoRa ficaram praticamente constantes independente da distância ou cenário P2P e *mesh* analisado. A única alteração está associada ao aumento ou redução das taxas, respectivamente associadas aos menores ou maiores intervalos de envio, que é o caso da configuração SF7 com 0,5 s que obtém taxas na faixa de 3,54 a 3,58 Kbps, enquanto em SF9 com 2 s tem taxa de envio com cerca de quase 4 vezes inferior ao intervalo de 0,5 s.

Tempo de envio e recepção do LoRa P2P e *mesh*: a Figura 52(a) exibe, nas distâncias analisadas em P2P e *mesh*, os tempos médios de envio e recepção em SF7, com intervalo de 0,5 s entre cada envio. A Figura 52(b) exibe os tempos em SF7 com intervalos

de 1 s, e por fim a 52(c) exibe os tempos em SF9 com intervalos de 2 s.

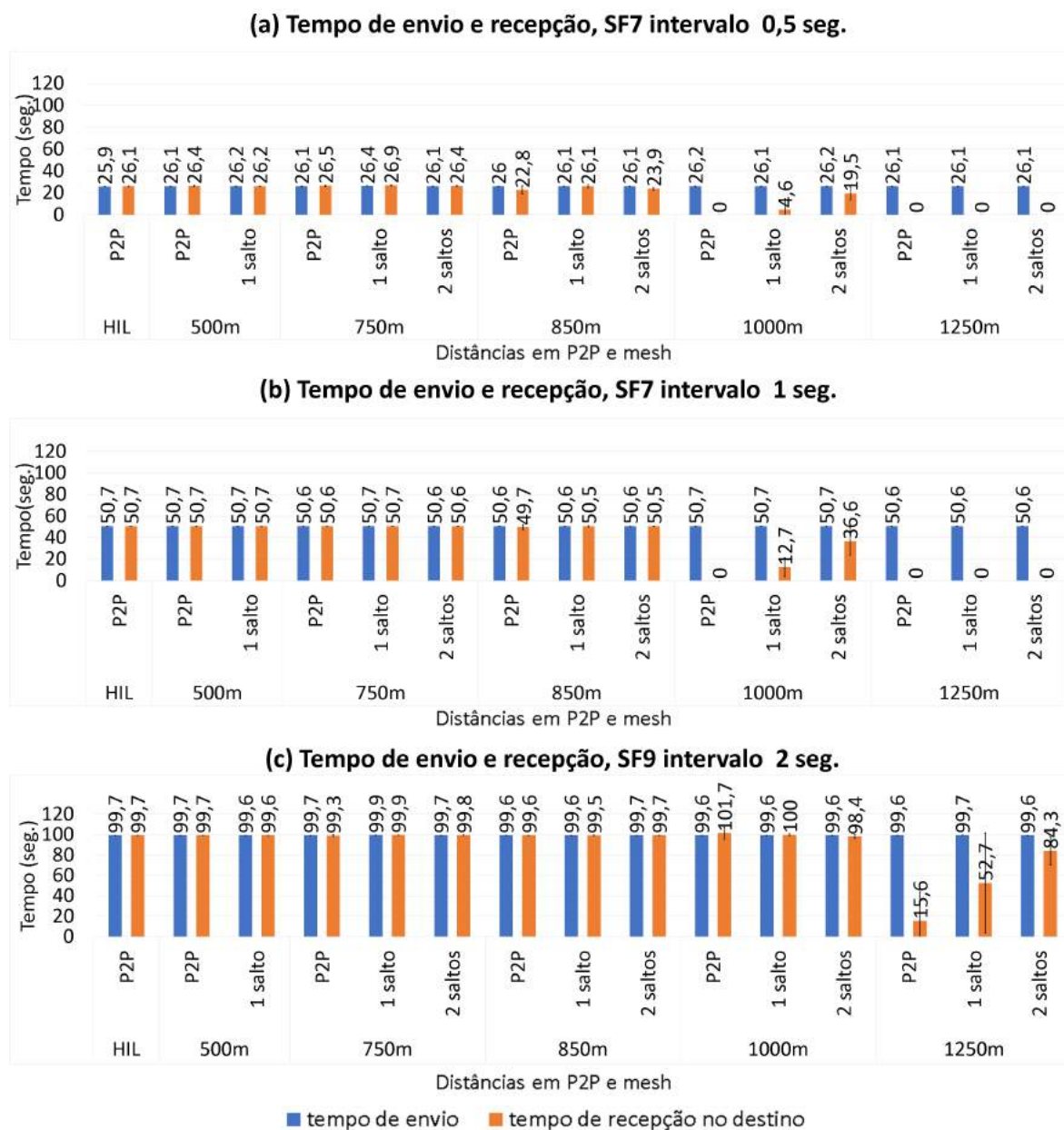


Figura 52 – Tempo médio de envio e recepção do LoRa em P2P e *mesh*, no HITL-05: (a) em SF7 com intervalo de 0,5 s; (b) em SF7 com intervalo de 1 s; e (c) em SF9 com intervalo de 2 s.

Considerações sobre o tempo de envio e recepção do LoRa P2P e *mesh*: conforme Figuras 52(a), (b) e (c), nota-se quanto ao tempo de envio que, devido à transmissão assíncrona, a média do tempo e desvio ficam praticamente similares independente da alteração de distância. Contudo, os intervalos maiores entre cada transmissão de um novo pacote, como em SF9, produzem, ao final, maiores tempos médios de envio, onde esses tempos médios de envio variaram: em SF7, com 0,5 s, entre 25,9 e 26,4 s; em SF7, com 1 s, dobrou comparado ao SF7 com 0,5 s, variando entre 50,6 e 50,7 s; e em SF9, com 2 s, quadruplicou comparado ao SF7 com 0,5 s, variando entre 99,6 e 99,9 s.

Em relação ao tempo médio de recepção no destino, nota-se que este tende a ser similar ou discretamente superior ao tempo de envio quando há entrega em sua totalidade ou quase totalidade, contudo com a redução ou não entrega de pacotes o tempo de recebimento tende a ser menor ou zero em decorrência de diversos fatores como: o aumento da distância, limitação da antena, potência de transmissão e possíveis outras interferências no local que impeçam as recepções dos pacotes. Sendo assim, percebeu-se que:

- **Em SF7 com 0,5 s:** o tempo de recepção sofreu quedas a partir dos 850 m, onde em 1000 m houve reduzida recepção de pacotes apenas em *mesh* 1 ou 2 saltos; Em 1250 m o tempo de recepção foi 0, pois não houve entrega em nenhum dos cenários;
- **Em SF7 com 1 s:** o tempo de recepção sofreu variações inferiores a partir de 1000 m, onde só houve recepção de pacotes em *mesh* com 1 ou 2 saltos; Em 1250 m o tempo de recepção foi 0, pois não houve entrega em nenhum dos cenários; e
- **Em SF9 com 2 s:** o tempo de recepção variou a partir de 1250 m em P2P, porém o quantitativo de pacotes entregues aumentou com emprego da rede *mesh* de 1 salto e na sequência um novo aumento com 2 saltos, conseqüentemente o tempo de recepção cresceu nesta sequência.

Análise de PDR do XBee e LoRa, P2P e *mesh*, com *payload* de tamanho reduzido: conforme resultados obtidos de PDR LoRa com pacotes de 232 bytes, expostos na Figura 51, devido à pouca entrega em P2P e *mesh*, com LoRa SF7 e SF9, em 1250 m, foi realizado o mesmo teste supracitado para os rádios LoRa e também para o XBee na mesma distância e parâmetros, porém confrontando os resultados anteriores a uma nova investigação com pacotes de *payload* de 120 bytes, cujo os resultados foram expostos na Figura 53(a) para o XBee e Figura 53(b) para o LoRa.

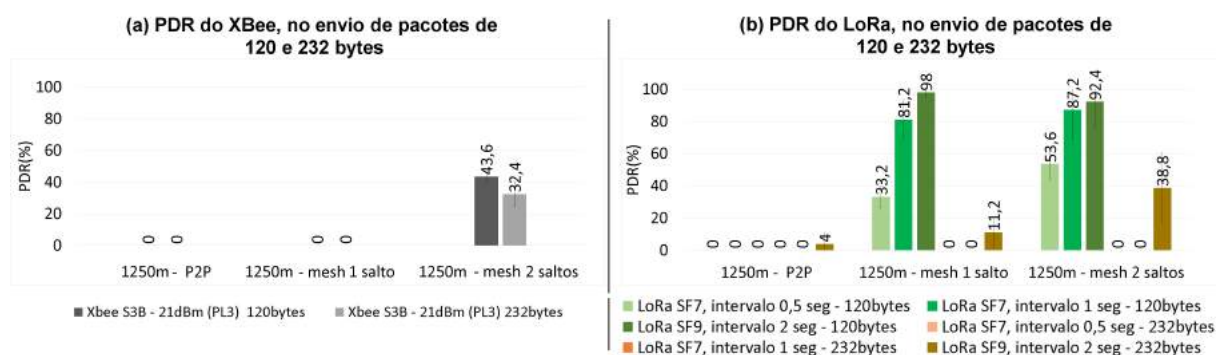


Figura 53 – PDR em 1250 m P2P e *mesh*, no envio de pacotes de 120 e 232 bytes: (a) no XBee; e (b) no LoRa.

Considerações sobre PDR do LoRa e XBee, P2P e *mesh*, com pacotes de tamanho reduzido: em relação ao XBee, conforme Figura 53(a), com a redução do

payload do pacote para pouco mais da metade, pode-se verificar que em P2P o PDR foi nulo, sendo esta apuração similar ao teste não realizado com 232 *bytes*, que fora considerado pelas análises de distâncias anteriores, propenso a zero. A verificação com 120 *bytes*, utilizando 1 salto *mesh*, não produziu entregas, contudo em 2 saltos o pacote menor produziu uma entrega superior em 11% comparado ao mesmo cenário com 232 *bytes*. Desta forma, os resultados foram similares onde o alcance de comunicação não foi obtido com pacotes maiores, contudo com rotas conhecidas até o destino, os resultados demonstram a possibilidade de maior PDR com pacotes menores.

Quanto ao LoRa neste experimento, de acordo com os resultados da Figura 53(b), percebe-se com a redução do tamanho do pacote, em cenário P2P, que a taxa de entrega comparada ao cenário de 232 *bytes* também foi totalmente nula em todos os intervalos do SF7 ao SF9. Quanto aos cenários em rede *mesh*, a Tabela 29 apresenta uma análise comparativa de desempenho do PDR LoRa com 120 *bytes* em relação a 232 *bytes*. Sendo assim, verificou-se que 120 *bytes*, a 1250 *m*, utilizando 1 ou 2 saltos *mesh*, geraram taxas consideráveis de entregas onde o envio de pacotes de *payloads* maiores não obteve sucesso, observando os melhores resultados em relação a 232 *bytes* em SF7 com intervalos de 1 *s* e SF9 com 2 *s*. Portanto, percebe-se que há predisposição no LoRa para melhora dos PDRs nas distâncias, em ambos SFs, com a redução dos *payloads* enviados. Os dados analíticos dessas comparações estão presentes na seção “HITL-05 - Dados de Transferência Assíncrona P2P e *Mesh*” do Apêndice B.

Tabela 29 – Comparativo de desempenho do PDR LoRa com 120 *bytes* em relação a 232 *bytes*, em *mesh*, a 1250 *m*.

PDR LoRa (%) de 120 bytes comparado a 232 bytes, em 1250 m			
SF	intervalo (s)	1 salto	2 saltos
7	0,5	↑ 33%	↑ 54%
7	1	↑ 81%	↑ 87%
9	2	↑ 87%	↑ 54%

↓ 120 *bytes* inferior a 232 *bytes* ↑ 120 *bytes* superior a 232 *bytes* ≅ 120 *bytes* similar a 232 *bytes*
 ϕ PDR nulo — não realizado

Considerações finais entre os rádios

Considerações do PDR, P2P e *mesh*, entre os rádios: nos resultados de PDR em ambos os rádios, expostos na Figura 49 e 51, obtidos nas distâncias em P2P, pode-se verificar que o LoRa foi superior em todas as marcações, pois o XBee entrega uma quantidade baixa de pacotes - somente até 500 *m* - enquanto o LoRa em SF7, em ambos os intervalos, entrega pacotes de forma considerável até 850 *m* e em SF9 há entrega, de forma baixa, até 1250 *m*. Quanto à operação em rede *mesh*, a Tabela 30(a) apresenta uma análise comparativa do PDR *mesh* do LoRa, em seus SF e intervalos, em relação ao XBee nas mesmas distâncias. Desta forma, verificou-se que o LoRa foi melhor em todos os cenários com SF9 em 1 e 2 saltos. Já com SF7 em 1 salto obteve melhor desempenho em

relação ao XBee, porém, em SF7 com 2 saltos, sua performance em ambos os intervalos foi superada pelo XBee em quase todas as distâncias, onde enfatiza-se, também, que nesta configuração, a 1250 m, o LoRa obteve PDR nulo, enquanto o XBee chegou a 32%.

Tabela 30 – Comparativo de desempenho de PDR LoRa em relação ao XBee, nos cenários em rede *mesh* e com diferentes *payloads*.

(a) PDR do LoRa comparado ao XBee, com pacotes de 232 bytes.

	SF	intervalo (s)	500 m	750 m	850 m	1000 m	1250 m
1 salto	7	0,5	↑ 2%	↑ 24%	↑ 22%	↑ 2%	φ φ
	7	1	↑ 2%	↑ 33%	↑ 53%	↑ 12%	φ φ
	9	2	↑ 2%	↑ 32%	↑ 64%	↑ 76%	↑ 11%
2 saltos	7	0,5	—	↓ 5%	↓ 18%	↓ 27%	φ
	7	1	—	↑ 5%	↑ 17%	↓ 20%	φ
	9	2	—	≅	↑ 30%	↑ 26%	↑ 6%

(b) PDR do LoRa comparado ao XBee, com pacotes de 120 bytes, em 1250 m.

SF	intervalo (s)	P2P	1 salto	2 saltos
7	0,5	φ φ	↑ 33%	↑ 10%
7	1	φ φ	↑ 81%	↑ 44%
9	2	φ φ	↑ 98%	↑ 49%

↓ LoRa inferior ao XBee ↑ LoRa superior ao XBee ≅ LoRa similar ao XBee φ LoRa sem PDR
 — não realizado φ φ ambos os rádios sem PDR

A Tabela 30(b) expõe o comparativo dos PDRs de pacotes menores entre o LoRa e o XBee, em P2P e *mesh*, a 1250 m. Desta forma, nessas análises, o LoRa e o XBee mantiveram taxa zero em P2P, porém em *mesh*, o LoRa foi superior ao XBee em ambos os saltos e em todos os SF e intervalos, sendo a maior superioridade vinculadas aos cenários de 1 salto. Essa investigação com pacotes reduzidos consolida a possível tendência, nessa quantidade de saltos, que tanto em distâncias inferiores analisadas quanto possivelmente em distâncias superiores haverá uma superioridade do LoRa, em ambos os SFs e nesses intervalos, em relação ao XBee. Os dados analíticos desses testes estão presentes na seção “HITL-05 - Dados de Transferência Assíncrona P2P e Mesh” do Apêndice B.

Considerações da taxa de envio e tempo, P2P e mesh, entre os rádios: apesar de o LoRa ter obtido melhores resultados de PDR quanto a taxa de envio, como exposto previamente nos experimentos com pacotes de *payload* de 232 bytes, o XBee obteve taxas elevadas, entre 44,60 e 44,65 Kbps, cerca de pouco mais de 12 vezes superior ao LoRa de maior taxa, com SF7 no intervalo de 0,5 s, que atingiu entre 3,54 a 3,58 Kbps. O mesmo ocorreu com o tempo de envio, onde XBee, nestes experimentos, foi cerca de 12 vezes mais rápido, levando em média cerca de 2,1 s para envio dos 50 pacotes, enquanto LoRa levou em média cerca de 26,4 s, na sua configuração mais rápida, em SF7 com 0,5 s. Desta forma, nos parâmetros de taxa de envio e tempo analisados aqui, o XBee foi superior devido à ausência de intervalos entre as transmissões de cada pacote.

5.4 Sugestões de Empregos dos Rádios em FANETs

Diante dos resultados dos experimentos expostos neste capítulo, abaixo serão apresentadas as principais contribuições desta dissertação quanto ao emprego dos rádios estudados em possíveis FANETs multimissão. Primeiramente a Tabela 31 expõe as sugestões de emprego dos rádios XBee e LoRa em diferentes cenários e missões de tempo real ou em uso destes de forma auxiliar, expondo se o rádio é apto ou não ao emprego, em P2P ou *mesh*, nas variadas distâncias deste estudo, até 1250 *m*, e expondo tendências de uso quanto ao emprego em distâncias superiores.

Sendo assim, a mesma Tabela 31 expõe essas sugestões de emprego dos rádios em missões de redes aéreas voltadas para telemetria, similar ao empregado em (46), estimando envio de *payload* de 10 *bytes* para este fim; Na sequência para emprego no sensoriamento de imagens, similar ao realizado em (61), estimando o envio de uma imagem com cerca de 116 *KB*; No emprego em transmissão de vídeo de baixa resolução, 240p, com taxa de transmissão de cerca de 300 *Kbps*; e por fim transmissão de áudio em formato AAC (*Advanced Audio Coding*) com taxa de transmissão estimada de 32 *Kbps*. Ao final pode-se sugerir, com base nos resultados deste estudo, que XBee seja mais adequado ao emprego de forma satisfatória em boa parte das distâncias, em sistemas de tempo real e auxiliar com o emprego em rede *mesh*, nos cenários propostos de telemetria, sensoriamento e áudio. Em contrapartida, em virtude da apuração desta dissertação pode-se verificar que a tecnologia LoRa apresentou nos experimentos alta latência e desta forma foi sugerido apenas o seu emprego nos cenários propostos para sistemas auxiliares, em rede P2P e *mesh*, em grande parte das distâncias.

Por fim, a Tabela 32 também apresenta uma síntese de recomendações gerais do uso dos rádios quanto ao propósito principal desejado à FANET, sendo eles: dinamicidade, consumo energético, taxa de transferência, precisão na entrega e velocidade. Desta forma, pode-se verificar, com base nos resultados deste estudo, que o XBee de modo geral é mais recomendado aos propósitos de FANET sugeridos, principalmente no tocante ao seu dinamismo e velocidade nas atividades, enquanto o LoRa teve suas recomendações mais restritas em virtude de suas altas latências nas operações.

5.5 Considerações Sobre o Capítulo

Esse capítulo apresentou resultados experimentais de bancada e em ambiente externo, com simulações discretas de movimentos que aproximaram-se aos ambientes de uma FANET, realizados com os rádios XBee e LoRa em estruturas similares a de VANTs, analisando os parâmetros que compõem a avaliação proposta neste trabalho. As análises mostraram-se úteis para o processo de escolha da tecnologia ideal para determinados objetivos de uma possível FANET. Os testes energéticos demonstraram um menor consumo

Tabela 31 – Sugestão de emprego das tecnologias XBee S3B e LoRa RD42C em cenários e missões de tempo real ou em uso de forma secundária, em P2P e *mesh*.

XBEE-PRO S3B para emprego em:*	DISTÂNCIAS E CENÁRIOS									
	até 500m		até 750m		até 1000m		até 1250m		> 1250m	
	P2P	<i>mesh</i>	P2P	<i>mesh</i>	P2P	<i>mesh</i>	P2P	<i>mesh</i>	P2P	<i>mesh</i>
TEMPO REAL										
C2 ¹ e Telemetria, ≅ 10bytes	⊙	●	-	●	-	●	-	●	-	○
Sensoriamento, ≅ 116KB	⊙	⊙	-	⊙	-	⊙	-	⊙	-	○
Vídeo, ≅ 240p - 300Kbps	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Áudio, ≅ AAC ² - 32Kbps	⊙	●	-	●	-	⊙	-	⊙	-	○
SISTEMA AUXILIAR										
C2 ¹ e Telemetria, ≅ 10bytes	⊙	●	-	●	-	●	-	●	-	○
Sensoriamento, ≅ 116KB	⊙	●	-	●	-	⊙	-	⊙	-	○
Vídeo, ≅ 240p - 300Kbps	⊙	●	-	●	-	⊙	-	⊙	-	○
Áudio, ≅ AAC ² - 32Kbps	⊙	●	-	●	-	⊙	-	⊙	-	○
LORA RD42C para emprego em:*										
TEMPO REAL										
C2 ¹ e Telemetria, ≅ 10bytes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sensoriamento, ≅ 116KB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vídeo, ≅ 240p - 300Kbps	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Áudio, ≅ AAC ² - 32Kbps	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SISTEMA AUXILIAR										
C2 ¹ e Telemetria, ≅ 10bytes	●	●	●	●	●	●	-	●	-	○
Sensoriamento, ≅ 116KB	●	●	●	●	⊙	⊙	-	⊙	-	○
Vídeo, ≅ 240p - 300Kbps	●	●	●	●	⊙	⊙	-	⊙	-	○
Áudio, ≅ AAC ² - 32Kbps	●	●	●	●	⊙	⊙	-	⊙	-	○

● satisfaz ⊙ satisfaz parcialmente ○ tende a satisfazer - não satisfaz
 * conforme este estudo 1 Comando e Controle 2 formato *Advanced Audio Coding*

Tabela 32 – Recomendações de uso do XBee-PRO S3B e LoRa RD42C, com diferentes propósitos de FANET, baseados neste estudo.

Rádio	dinamicidade	consumo	taxa de transferência	precisão da entrega	velocidade
XBee-PRO S3B	●	●	●	⊙	●
LoRa RD42C	○	⊙	⊙	⊙	○

● recomendado ⊙ recomendado, com as restrições deste estudo ○ não recomendado

dos rádios XBee em relação ao LoRa e em virtude da sua latência característica. Enquanto às demais investigações de taxa de transferência, PDR e tempo, comprovaram uma relevante eficiência do XBee em relação à sua agilidade somada à altas taxas de transferência. Contudo, seu alcance e PDRs em P2P e em *mesh*, com até 2 saltos, foram de modo geral inferiores ao LoRa em SF7, com intervalos de envio de 0,5 e 1 s, e SF9, com espera de 2 s entre cada transmissão. Salienta-se, também, que os resultados parciais do experimento “HITL-01 - Análise de Transferência”, da subseção 5.3.1, foram publicados em (72), com a realização de apresentação oral no evento. O próximo capítulo encerra este estudo apresentando as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões sobre os resultados encontrados nos experimentos realizados nesta dissertação. Na sequência, serão expostos algumas proposições de trabalhos futuros.

6.1 Conclusão

Esta dissertação propôs avaliar o desempenho de tecnologias de comunicação LoRa e ZigBee aplicadas em ambientes similares a FANETs para diferentes missões, onde inicialmente foi enfatizada a importância da comunicação nos meios aéreos e investigados diversos estudos relacionados, que utilizaram algumas dessas tecnologias em redes P2P ou *mesh* de modo fixo, móvel veicular e, também, móvel aéreo. Porém, a maioria as empregou de forma individualizada e com objetivos específicos. Diante da lacuna comparativa destes rádios associados às demandas FANET, o trabalho objetivou avaliar essas tecnologias por serem, também, análogas quanto ao custo, alcance e baixo consumo, empregando para os rádios ZigBee, o modelo XBee-PRO S3B, e para LoRa, o modelo LoRa RD42C.

Para realizar esta avaliação de desempenho em ambiente que se aproximasse a rede FANET, foi proposta uma verificação prática experimental, que se dividiu em dois grupos: primeiro os testes de bancada (ou HIL), onde se analisaram inicialmente as correntes e o consumo dos rádios, por meio de um arcabouço automatizado, em diferentes cenários de operação. Embora o LoRa, nas taxas de transmissão, tenha apresentado menores correntes em alguns cenários, o XBee apresentou melhores resultados de consumo em virtude da reduzida latência entre envios dos pacotes. Além disso, no comparativo das correntes descritas pelos fabricantes dos rádios e as correntes obtidas nos experimentos, constatou-se que em ambos os rádios, em todas as taxas, potências e SFs investigados, as correntes de recepção ficaram similares ao previsto pelos fabricantes, enquanto as correntes de transmissão ficaram abaixo das expostas nos *datasheets*. Na sequência, ainda em bancada, foram feitos testes de taxa de transferência, PDR e tempo gasto, em P2P, onde nas taxas de transmissão analisadas, o XBee obteve taxas de transferência até 6 vezes superiores ao LoRa em SF7 e até 15 vezes superiores ao LoRa em SF9, mantendo sempre PDR de 100% e com tempos demandados até 5 vezes mais rápidos em SF7 e 6 vezes em SF9.

O segundo grupo foi de análises em ambiente externo com interação humana (ou HITL) com testes síncronos e assíncronos, em P2P, de taxa de envio e PDR em simulações discretas de movimento de 100 em 100 *m* até 500 *m*, em área urbana aberta. Como resultado foi verificado que o XBee foi mais eficiente apenas até 100 *m* em PL0, 7 *dBm*, e em PL3, 21 *dBm*, se mostrou mais eficiente até 300 *m*, nas demais distâncias LoRa foi

superior. Logo após, foram confrontadas as taxas de envio, entrega e tempo gasto em envios assíncronos, com redes P2P e *mesh* de 1 ou 2 saltos, também com simulações discretas de movimento em distâncias superiores até 1250 m, onde LoRa com seus intervalos de envio foi mais eficiente em relação ao XBee.

Por fim, apesar das dificuldades logísticas e técnicas encontradas ao longo do trabalho, os experimentos realizados apontam para uma confirmação da pouca adequação desta implementação LoRa para cenários de voo em tempo real, embora tenha apresentado bons resultados de PDR comparado ao XBee, principalmente nos cenários externos em P2P e *mesh*, nos testes com pacotes de 120 e 232 bytes. Contudo, ratifica-se que as maiores taxas de entrega obtidas no LoRa foram frutos de uma maior latência entre os envios de cada pacote, de 0,5 e 1 s, em SF7, e 2 s, em SF9, proporcionando tempos elevados na conclusão dos experimentos e conseqüentemente um maior consumo registrado. O rádio XBee utilizado, embora tenha mostrado um menor alcance P2P e resultados inadequados em quase todos os cenários *mesh*, corroborou para o emprego de mais saltos. De modo geral, o XBee mostrou-se mais propenso a um possível emprego em cenários FANET de voo real devido a sua maior taxa de envio em menor tempo, fruto também da ausência de intervalos nas transmissões sucessivas. Com base nos resultados experimentais expostos no capítulo 5, este estudo apresentou contribuições quanto ao problema decisório sobre qual tecnologia de comunicação é ideal para emprego em diferentes missões de FANETs, como expostas na seção 5.4 através das Tabelas 31 e 32.

6.2 Trabalhos Futuros

O trabalho desenvolvido possui inúmeros aspectos que podem ser estudados de forma mais aprofundada para melhoria da avaliação como um todo. Nesse sentido, no contexto desta dissertação, por questões de escopo e tempo, o emprego de FANET não foi de fato implementado. Conseqüentemente, a primeira sugestão é a realização dos experimentos em voo real, em FANET, pairando e com seu dinamismo em movimentos contínuos, em substituição aos movimentos discretos em ambiente externo. Isso permitirá uma análise comparativa com os resultados obtidos nos experimentos HITL deste estudo. Apesar deste trabalho ter investigado o envio de dois tamanhos de *payloads*, outra sugestão para trabalhos futuros é comparar o desempenho e o comportamento dos rádios com outras dimensões de carga em diferentes potências e fatores de espalhamento. A terceira sugestão diz respeito à utilização do mesmo conjunto de rádios, porém com outras antenas de potências superiores, de forma a verificar o alcance e outros ganhos que esta modificação pode proporcionar às possíveis missões FANET.

Ainda em relação a trabalhos futuros, outra sugestão importante é o emprego de outras tecnologias sem fio na análise em FANET e uso, nos rádios LoRa, de outros fatores

de espalhamento, bem como potências máximas para o rádio XBee. Uma quinta proposição diz respeito à análise de possíveis alterações de consumo executadas neste estudo, quanto a operação em distâncias em área externa e, também, em voo por meio do emprego da estrutura idealizada de forma mais compacta para embarque no VANT. Como fator energético é primordial para a autonomia das aeronaves, miniaturizar e acoplar a estrutura automatizada de análise energética, deste estudo, possibilitará ampliar a investigação de consumo em voo, em tempo real, não só dos rádios como de diferentes componentes do VANT, em distintas atividades de operação. Uma última sugestão de trabalho futuro seria analisar o processo de comunicação FANET aos fatores de interferência nos rádios, investigando distorções ambientais que podem afetar a qualidade da rede *ad hoc* aérea.

REFERÊNCIAS

- 1 HORIUCHI, M.; NISHIYAMA, H.; KATO, N.; ONO, F.; MIURA, R. Throughput maximization for long-distance real-time data transmission over multiple UAVs. In: *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.
- 2 SHARMA, A.; VANJANI, P.; PALIWAL, N.; BASNAYAKA, C. M.; JAYAKODY, D. N. K.; WANG, H.-C.; MUTHUCHIDAMBARANATHAN, P. Communication and networking technologies for UAVs: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 168, p. 102739, 2020.
- 3 LEE, H.-C.; KE, K.-H. Monitoring of large-area IoT sensors using a LoRa wireless mesh network system: Design and evaluation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 67, n. 9, p. 2177–2187, 2018.
- 4 CHRIKI, A.; TOUATI, H.; SNOUSSI, H.; KAMOUN, F. FANET: communication, mobility models and security issues. *Computer Networks*, v. 163, p. 106877, 2019.
- 5 KAWAMOTO, Y.; NISHIYAMA, H.; KATO, N.; ONO, F.; MIURA, R. Toward future unmanned aerial vehicle networks: Architecture, resource allocation and field experiments. *IEEE Wireless Communications*, v. 26, n. 1, p. 94–99, 2019.
- 6 YUAN, Z.; JIN, J.; SUN, L.; CHIN, K.-W.; MUNTEAN, G.-M. Ultra-reliable IoT communications with UAVs: A swarm use case. *IEEE Communications Magazine*, v. 56, n. 12, p. 90–96, 2018.
- 7 CHAO, H.; CAO, Y.; CHEN, Y. Autopilots for small fixed-wing unmanned air vehicles: a survey. *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2007)*, p. 3144–3149, 2007.
- 8 PANTELIMON, G.; TEPE, K.; CARRIVEAU, R.; AHMED, S. Survey of multi-agent communication strategies for information exchange and mission control of drone deployments. *Journal of Intelligent Robotic Systems*, v. 95, p. 1–10, 09 2019.
- 9 KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. *Redes de computadores e a internet - uma abordagem top-down*. 6. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2013. ISBN 978-85-430-1443-2.
- 10 TANENBAUM, A.; WETHERALL, D. *Redes de computadores*. 5. ed. [S.l.]: Prentice Hall Brasil, 2011.
- 11 RUIZ, L.; CORREIA, L.; VIEIRA, L.; MACEDO, D.; NAKAMURA, E.; FIGUEIREDO, C.; VIEIRA, M.; HABIB, E.; CAMARA, D.; LOUREIRO, A.; NOGUEIRA, J. M.; JR., D. D. S.; FERNANDES, A. Arquiteturas para redes de sensores sem fio. *Tutorial do simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, 2004.
- 12 SHARMA, D. An overview of wireless sensor networks. *Journal of All Research Education and Scientific Methods (IJARESM)*, v. 3, p. 29–33, 2015.
- 13 BEKMEZCI, I.; SAHINGOZ, O. K.; TEMEL, S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*, v. 11, n. 3, p. 1254 – 1270, 2013.

- 14 MAHAJAN, A.; POTNIS, N.; GOPALAN, K. Urban mobility models for VANETs. In: *2nd IEEE International Workshop on Next Generation Wireless Networks*. IEEE: [s.n.], 2006. p. 38.
- 15 VISWACHEDA DUDUKU, V.; CHEKIMA, A.; WONG, F.; DARGHAM, J. A. A study on vehicular ad hoc networks. In: *2015 3rd International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation (AIMS)*. IEEE: [s.n.], 2015. p. 422–426.
- 16 ZEADALLY, S.; HUNT, R.; CHEN, Y.; IRWIN, A.; HASSAN, A. Vehicular ad hoc networks (VANETs): Status, results, and challenges. *Telecommunication Systems*, v. 50, n. 4, p. 217–241, 2012.
- 17 AL-SULTAN, S.; AL-DOORI, M. M.; AL-BAYATTI, A. H.; ZEDAN, H. A comprehensive survey on vehicular ad hoc network. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 37, p. 380 – 392, 2014.
- 18 SAGGI, M.; SANDHU, R. A survey of vehicular ad hoc network on attacks and security threats in VANETs. In: *International Conference on Research and Innovations in Engineering and Technology (ICRIET 2014)*. IEEE: [s.n.], 2014. p. 19–20.
- 19 FREW, E.; BROWN, T. Networking issues for small unmanned aircraft systems. *J Intell Robot Syst*, v. 54, n. 1-3, p. 21–37, 2009.
- 20 CRUZ, E. A comprehensive survey in towards to future FANETs. *IEEE Latin America Transactions*, v. 16, p. 876–884, 03 2018.
- 21 LAKEW, D. S.; SA'AD, U.; DAO, N.-N.; NA, W.; CHO, S. Routing in flying ad hoc networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 22, n. 2, p. 1071–1120, 2020.
- 22 IEEE 802.15.4. *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. IEEE, 2003.
- 23 UMESHARADDY; SUJATHA, B. Performance improvement of QPSK modem implemented in FPGA. In: *2015 International Conference on Smart Sensors and Systems (IC-SSS)*. IEEE: [s.n.], 2015. p. 1–6.
- 24 ZIGBEE ALLIANCE. *ZigBee and Wireless Radio Frequency Coexistence - ZigBee White Paper, Document 075026r02*. [S.l.], 2007.
- 25 PROAKIS, J. G.; SALEHI, M. *Digital Communications. 5.ed.* [S.l.]: McGraw Hill, 2007.
- 26 ABBAS, M. J.; AWAIS, M.; HAQ, A. U. Comparative analysis of wideband communication techniques: Chirp spread spectrum and direct sequence spread spectrum. In: *2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*. IEEE: [s.n.], 2018. p. 1–6.
- 27 PATHEJA, P.; TIWARI, V.; WAOO, A. An adaptive MAC 802.11 protocol for MANET using exponential algorithm. *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol. IJCSIT*, v. 4, p. 358–362, 01 2013.

- 28 SAHINGOZ, O. Networking models in flying ad-hoc networks (FANETs): Concepts and challenges. *Journal of Intelligent Robotic Systems*, v. 74, 04 2014.
- 29 NADEEM, A.; ALGHAMDI, T.; YAWAR, A.; MEHMOOD, A.; SIDDIQUI, M. S. A review and classification of flying ad-hoc network (FANET) routing strategies. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, v. 8, 03 2018.
- 30 KHAN, M. A.; SAFI, A.; QURESHI, I. M.; KHAN, I. U. Flying ad-hoc networks (FANETs): A review of communication architectures, and routing protocols. In: *2017 First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT)*. IEEE: [s.n.], 2017. p. 1–9.
- 31 KHAN, M. A.; QURESHI, I. M.; KHANZADA, F. A hybrid communication scheme for efficient and low-cost deployment of future flying ad-hoc network (FANET). *Drones*, MDPI AG, v. 3, n. 1, p. 16, 2019.
- 32 JIANG, X.; ZHANG, H.; YI, E. A. B.; RAGHUNATHAN, N.; MOUSOULIS, C.; CHATERJI, S.; PEROULIS, D.; SHAKOURI, A.; BAGCHI, S. Hybrid low-power wide-area mesh network for IoT applications. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 8, n. 2, p. 901–915, 2021.
- 33 SHANMUGA SUNDARAM, J. P.; DU, W.; ZHAO, Z. A survey on LoRa networking: Research problems, current solutions, and open issues. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 22, n. 1, p. 371–388, 2020.
- 34 CILFONE, A.; DAVOLI, L.; BELLI, L.; FERRARI, G. Wireless mesh networking: An IoT-oriented perspective survey on relevant technologies. *Future Internet*, MDPI AG, v. 11, n. 4, p. 99, Apr 2019.
- 35 ZIGBEE ALLIANCE. *ZigBee Specification - The ZigBee Specification describes the infrastructure and services available to applications operating on the ZigBee platform*. 2015. 565 p. Disponível em: <<https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/11/docs-05-3474-21-0csg-zigbee-specification.pdf>>. Acesso em: 22 jan. de 2021.
- 36 ALKAMA, L.; BOUALLOUCHE-MEDJKOUNE, L. IEEE 802.15.4 historical revolution versions: A survey. *Computing*, v. 103, p. 99–103, 2021.
- 37 KHALIFEH, A. F.; ALQUDAH, M.; TANASH, R.; DARABKH, K. A. A simulation study for UAV- aided wireless sensor network utilizing ZigBee protocol. In: *2018 14th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. IEEE: [s.n.], 2018. p. 181–184.
- 38 ELAHI, A.; GSCHWENDER, A. *ZigBee Wireless Sensor and Control Network*. 1st. ed. [S.l.]: Pearson, 2009. 288 p. ISBN 0-13-713485-1.
- 39 SEMTECH. *What is LoRa? / Semtech LoRa Technology / Semtech*. 2021. Disponível em: <<https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>>. Acesso em: 27 jan. de 2021.
- 40 RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 19, n. 2, p. 855–873, 2017.
- 41 ERTÜRK, M. A.; AYDIN, M. A.; BÜYÜKAKKAŞLAR, M. T.; EVIRGEN, H. A survey on LoRaWAN architecture, protocol and technologies. *Future Internet*, v. 11, p. 216, 10 2019.

- 42 RADIOENGE. *LoraMesh*. 2021. Disponível em: <<https://www.radioenge.com.br/produto/modulo-loramesh/>>. Acesso em: 15 jan. de 2021.
- 43 RADIOENGE. *Manual de utilização do Módulo LoRaMESH*. 2021. 32 p. Disponível em: <<https://www.radioenge.com.br/wp-content/uploads/2021/08/manual-modulo-loramesh-abr2021.pdf>>. Acesso em: 22 abr. de 2021.
- 44 LORA ALLIANCE. *A technical overview of LoRa and LoRaWAN, white paper*. 2015. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>>. Acesso em: 27 jan. de 2021.
- 45 LORA ALLIANCE. *LoRaWAN™ 1.1 Specification*. 2017. 101 p. Disponível em: <https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-1>. Acesso em: 27 jan. de 2021.
- 46 RAHMADHANI, A.; RICHARD; ISSWANDHANA, R.; GIOVANI, A.; SYAH, R. A. LoRaWAN as secondary telemetry communication system for drone delivery. In: *2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IOTAIS)*. IEEE: [s.n.], 2018. p. 116–122.
- 47 SEMTECH. *AN1200.22 - LoRa Modulation Basics*. 2015. Disponível em: <<https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001OJk/yDEcfAkD9qEz6oG3PJryoHKas3UMsMDa3TFqz1UQOkM>>. Acesso em: 27 jan. de 2021.
- 48 BOR, M.; VIDLER, J.; ROEDIG, U. LoRa for the internet of things. *EWSN*, p. 361–366, 2016.
- 49 SEMTECH. *Sx1276/77/78/79 Wireless & Sensing products: datasheet*. 2020. Disponível em: <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001Rbr/6EfVZUorrpoKFfvaF_Fkpgp5kzjiNyiAbqcpqh9qSjE>. Acesso em: 26 jan. de 2021.
- 50 ZHOU, W.; TONG, Z.; DONG, Z. Y.; WANG, Y. LoRa-Hybrid: A LoRaWAN Based multihop solution for regional microgrid. In: *2019 IEEE 4th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*. IEEE: [s.n.], 2019. p. 650–654.
- 51 CECÍLIO, J.; FERREIRA, P.; CASIMIRO, A. Evaluation of LoRa technology in flooding prevention scenarios. *Sensors*, v. 20, p. 4034, 07 2020.
- 52 FRAILE, L. P.; TSAMPAS, S.; MYLONAS, G.; AMAXILATIS, D. A comparative study of LoRa and IEEE 802.15.4-based IoT deployments inside school buildings. *IEEE Access*, v. 8, p. 160957–160981, 2020.
- 53 LORA ALLIANCE. *LoRaWAN Regional Parameters*. 2021. 94 p. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2021/05/RP002-1.0.3-FINAL-1.pdf>>. Acesso em: 25 jan. de 2021.
- 54 ANATEL. BRASIL, Ato nº 14448, de 04 de dezembro de 2017 - Requisitos técnicos para a avaliação da conformidade de equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita. *Atos de Certificação de Produtos*, 2017. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-certificacao-de-produtos/2017/1139-ato-14448>>.

- 55 FERREIRA, A. E.; ORTIZ, F. M.; COSTA, L. H. Avaliação de tecnologias de comunicação sem-fio para monitoramento em ambientes de floresta. In: *Anais Principais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 113–126.
- 56 SILVA, C. D. S. E. *Um estudo sobre tecnologias de comunicação sem fio para aplicações de IoT em agricultura de precisão*. 90 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2019.
- 57 SAAJID, H.; DI, W.; WANG, X.; MEMON, S.; BUX, N. K.; ALJEROUDI, Y. Reliability and connectivity analysis of vehicular ad hoc networks under various protocols using a simple heuristic approach. *IEEE Access*, v. 7, p. 132374–132383, 2019.
- 58 UNGUREAN, I.; CHI, J.; WANG, K.; GAITAN, N. C.; YAO, H.; YANG, Y. Mobile ZigBee network in a high RF interference environment. In: *2019 International Conference on Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI)*. IEEE: [s.n.], 2019. p. 1–5.
- 59 JOSHI, J.; MEDIKONDA, P.; RAJA, R. S.; DAS, D. Sub-gigahertz technologies based fast message delivery in VANETs. In: *2017 IEEE 15th Student Conference on Research and Development (SCORed)*. IEEE: [s.n.], 2017. p. 269–274.
- 60 CROCE, D.; GARLISI, D.; GIULIANO, F.; VALVO, A. L.; MANGIONE, S.; TINNI-RELLO, I. Performance of LoRa for bike-sharing systems. In: *2019 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE)*. IEEE: [s.n.], 2019. p. 1–6.
- 61 SILVA, M. R. *Análise de desempenho de rede de comunicação para um sistema multi VANT aplicado à varredura de área de impacto de foguete*. 100 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2017.
- 62 DIGI. *XCTU: Next Generation Configuration Platform for XBee/RF Solutions*. 2021. Disponível em: <<https://www.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/digi-xbee-tools/xctu>>. Acesso em: 01 mar. de 2021.
- 63 NEKRASOV, M.; ALLEN, R.; BELDING, E. Performance analysis of aerial data collection from outdoor IoT sensor networks using 2.4GHz 802.15.4. In: *Proceedings of the 5th Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 33–38.
- 64 TIURLIKOVA, A.; STEPANOV, N.; MIKHAYLOV, K. Improving the energy efficiency of a LoRaWAN by a UAV-based gateway. In: *2019 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. IEEE: [s.n.], 2019. p. 1–6.
- 65 MARTINEZ-CARO, J.-M.; CANO, M.-D. IoT system integrating unmanned aerial vehicles and LoRa technology: A performance evaluation study. *Wireless Communications and Mobile Computing*, v. 2019, p. 1–12, 11 2019.
- 66 MARCONATO, E. A.; MAXA, J. A.; PIGATTO, D. F.; PINTO, A. S. R.; LARRIEU, N.; BRANCO, K. R. L. J. C. IEEE 802.11n vs. IEEE 802.15.4: A Study on Communication QoS to Provide Safe FANETs. In: *2016 46th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshop (DSN-W)*. IEEE: [s.n.], 2016. p. 184–191.

- 67 TRASVIÑA-MORENO, C. A.; BLASCO, R.; MARCO, ; CASAS, R.; TRASVIÑA-CASTRO, A. Unmanned aerial vehicle based wireless sensor network for marine-coastal environment monitoring. *Sensors*, MDPI AG, v. 17, n. 3, p. 460, 2017.
- 68 TARAB, H. *Real Time Performance Testing of LoRa-LPWAN Based Environmental Monitoring UAV System*. Dissertação (Mestrado) — University of Windsor, Ontario, Canada, 2018.
- 69 DIGI. *XBee®-PRO900HP/XSC RF Modules S3 and S3B*. 2020. Disponível em: <<https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90002173.pdf>>. Acesso em: 16 nov. de 2020.
- 70 LATHI, B. P.; DING, Z. *Modern digital and analog communication systems*. International fourth edition. [S.l.]: Oxford University Press, 2010.
- 71 SEMTECH. *SX1272 LoRa Calculator*. 2020. Disponível em: <<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1276>>. Acesso em: 30 ago. de 2021.
- 72 FERREIRA, L. C.; SILVA, L. C. B. D.; ROSA, P. F. F. Performance evaluation of LoRa and ZigBee technologies applied to FANETs. In: *2021 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2021 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2021 Workshop on Robotics in Education (WRE)*. IEEE: [s.n.], 2021. p. 48–53.

APÊNDICE A – DADOS DOS EXPERIMENTOS HIL

Neste apêndice serão apresentados os resultados analíticos dos experimentos de bancada entre os rádios XBee e LoRa deste estudo, quanto ao consumo energético, sintetizados na subseção 5.2.1, e taxas de transferência, condensados na subseção 5.2.2.

HIL-01 - Dados de Consumo Energético

Abaixo serão expostos os dados obtidos nos comparativos dos rádios em cada taxa de transmissão, nos *cenários* 0, 1, 2 e 3, conforme descrito na subseção 4.3.1, com as correntes e consumos obtidos, dentro dos tempos totais gastos, conforme a Tabela 33.

Tabela 33 – Tempos gastos (em segundos) para cada taxa de transmissão e cenários.

Rádio	Potência	SF	9600 bps				38400 bps				57600 bps			
			Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
XBee	7 dBm	–	50,6	12,7	12,7	28,8	50,6	3,2	3,2	9,2	50,6	2,1	2,1	7,3
XBee	21 dBm	–	50,6	12,7	12,7	28,9	50,6	3,2	3,2	9,0	50,6	2,1	2,1	7,4
LoRa	7 dBm	SF7	50,6	24,5	24,5	38,3	50,6	24,5	24,5	44,6	50,6	24,5	24,5	35,6
LoRa	7 dBm	SF9	50,6	24,5	24,5	45,6	50,6	24,6	24,5	45,4	50,6	24,5	24,5	44,9
LoRa	20 dBm	SF7	50,6	24,5	24,5	38,2	50,6	24,5	24,5	44,3	50,6	24,5	24,5	35,6
LoRa	20 dBm	SF9	50,6	24,5	24,5	44,9	50,6	24,5	24,5	44,6	50,6	24,5	24,5	43,7

– não configurável 0 - alimentado 1 - enviando 2 - recebendo 3 - enviando e recebendo

HIL-01 em 9600 bps

Considerações sobre corrente e consumo do XBee, em 9600 bps: segundo o comparativo de corrente média do XBee, exposto na Figura 40(a) da subseção 5.2.1, nota-se que a alteração do PL0 (7 dBm) para PL3 (21 dBm) gerou um pequeno aumento de corrente em todos os cenários, exceto *cenário* 0, que se manteve igual. Em ambos os PLs, o *cenário* 1 teve correntes superiores aos demais cenários. Por outro lado, em relação ao consumo exposto na Figura 40(b) da subseção 5.2.1, foi estruturada uma análise percentual de consumo quanto à elevação da potência, expresso na Tabela 34. Sendo assim, percebe-se que, com exceção do *cenário* 0 e no *cenário* 2 que ficaram com consumos similares em ambos PLs, a elevação da potência gerou pequenos aumentos de consumo, que não ultrapassaram 5,4%.

Considerações sobre corrente e consumo do LoRa, em 9600 bps: segundo o comparativo de corrente média do LoRa, exposto na Figura 40(a) da subseção 5.2.1, notou-se um aumento de corrente nos cenários com SF9 comparados ao SF7, exceto o *cenário* 0 que se manteve similar mesmo com a troca do SF. Assim, em operação, salienta-se que o

Tabela 34 – Comparativo de consumo do XBee em diferentes potências, a 9600 bps.

Potência	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	Consumo*	Consumo*	Consumo*	Consumo*
7 dBm (PL0)	1,37	0,37	0,36	0,83
21 dBm (PL3)	1,39	0,39	0,36	0,86
Elevação da potência (%)	≅	↑ 5,4%	≅	↑ 3,6%

↓ 0 21 dBm inferior a 7 dBm alimentado ↑ 1 21 dBm superior a 7 dBm enviando ≅ 2 similar recebendo * 3 medido em mWh enviando e recebendo

cenário 1, em ambos os SF e potências, comparados aos demais cenários, dispenderam mais corrente, enquanto o cenário 2 obteve as menores correntes nas diferentes potências e SFs. Por fim, a alteração de potência para 20 dBm, em cada SF, produziu maiores correntes comparadas a 7 dBm em todos os cenários, exceto as correntes no cenário 0 que ficaram sempre similares mesmo com a mudança de potência no mesmo SF.

No entanto, quanto ao comparativo de consumo exposto na Figura 40(b) da subseção 5.2.1, foi estruturada uma análise percentual de crescimento de consumo quanto à mudança do SF e elevação de potência dentro do mesmo SF, expresso na Tabela 35. Desta forma, constatou-se que, com exceção do cenário 0 que obteve seus consumos similares em ambas às potências e SFs, a alteração do SF7 para SF9, na mesma potência, gerou um aumento de consumo em todos os cenários, onde o cenário 3, de envio de pacote e recepção de ACK, obteve maiores consumos em ambas as potências em todas as taxas analisadas, fruto de maiores correntes e tempos do SF9 comparados ao SF7. Quanto à elevação de potência, em ambos SFs, gerou-se um aumento de consumo comparado a 7 dBm, nos cenários 1, 2 e 3. Contudo, esse aumento mantém maior superioridade em SF9, nos cenários 1 e 3.

Tabela 35 – Comparativo de consumo do LoRa em diferentes potências e SFs, a 9600 bps.

(a) Consumo na alteração do SF7 para SF9

Potência(dBm)	SF	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
		Consumo*	Consumo*	Consumo*	Consumo*
7	7	0,82	0,55	0,42	0,71
	9	0,82	0,60	0,47	1,07
alteração SF, 7 dBm (%)		≅	↑ 9,1%	↑ 11,9%	↑ 51,5%
20	7	0,82	0,88	0,46	0,87
	9	0,81	1,04	0,56	1,95
alteração SF, 20 dBm (%)		≅	↑ 18,2%	↑ 22,8%	↑ 124,1%

↓ 0 SF9 inferior ao SF7 alimentado ↑ 1 SF9 superior ao SF7 enviando ≅ 2 similar recebendo * 3 medido em mWh enviando e recebendo

(b) Consumo na elevação de 7 para 20 dBm.

Elevação da potência	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	Consumo	Consumo	Consumo	Consumo
em SF7 (%)	≅	↑ 60,0%	↑ 9,5%	↑ 22,5%
em SF9 (%)	≅	↑ 73,3%	↑ 19,1%	↑ 82,2%

↓ 20 dBm inferior a 7 dBm ↑ 20 dBm superior a 7 dBm ≅ similar

Considerações gerais sobre corrente e consumo entre ambos os rádios em 9600 bps: a Figura 40(a), da subseção 5.2.1, exibe o comparativo de corrente média do XBee e

LoRa nos 4 cenários. Sendo assim, pode-se verificar que: EM POTÊNCIAS BAIXAS, o XBee em PL0 (7 dBm) teve correntes superiores ao LoRa na mesma potência tanto para SF7 quanto para SF9 em todos os cenários; e EM POTÊNCIAS MAIS ALTAS, o XBee em PL3 (21 dBm) teve correntes inferiores no cenário 1 comparado ao LoRa com 20 dBm em ambos SFs e também obteve corrente inferior no cenário 3 quando comparado ao LoRa em SF9. Nos demais cenários, o LoRa em SF7 e SF9 tiveram menores correntes.

Em relação ao consumo, a Figura 40(b), da subseção 5.2.1, exibe o comparativo do consumo, dentro dos tempos gastos, do XBee e LoRa nos 4 cenários. Por outro lado, a Tabela 36 expõe um comparativo percentual de consumo entre ambos os rádios. Nota-se, em 9600 bps, que o XBee, em relação ao LoRa com as mesmas potências, obtiveram de modo geral menores consumos em quase todos os cenários. Apenas no cenário 3, 20 dBm com SF7, o LoRa teve consumo similar ao XBee e também no cenário 3, em 7 dBm com SF7, obteve menor consumo em relação ao XBee em PL0 (7 dBm). Além disso, o cenário 0, em ambas potências, também foi a exceção onde o LoRa obteve menor consumo em ambos os SFs. Desta forma, pode-se concluir que LoRa, mesmo com correntes inferiores em quase todos os cenários, obteve um tempo elevado na conclusão destes, fruto das latências nos envios dos pacotes, o que despendeu mais tempo e assim elevou seu consumo nesta taxa.

Tabela 36 – Comparativo percentual de consumo entre XBee e LoRa, em 9600 bps.

Rádios com 7 dBm					
Rádio	SF	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
		Consumo*	Consumo*	Consumo*	Consumo*
XBee	-	1,37	0,37	0,36	0,83
LoRa	7	0,82	0,55	0,42	0,71
XBee x LoRa (%)		↑ 67,9%	↓ 32,5%	↓ 14,2%	↑ 16,9%
XBee	-	1,37	0,37	0,36	0,83
LoRa	9	0,82	0,60	0,47	1,07
XBee x LoRa (%)		↑ 67,1%	↓ 38,9%	↓ 23,4%	↓ 22,4%

Rádios com 20/21 dBm					
Rádio	SF	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
		Consumo*	Consumo*	Consumo*	Consumo*
XBee	-	1,39	0,39	0,36	0,86
LoRa	7	0,82	0,88	0,46	0,87
XBee x LoRa (%)		↑ 69,5%	↓ 55,4%	↓ 21,7%	≈
XBee	-	1,39	0,39	0,36	0,86
LoRa	9	0,81	1,04	0,56	1,95
XBee x LoRa (%)		↑ 71,7%	↓ 62,3%	↓ 35,2%	↓ 55,9%

↓ 0 XBee inferior ao LoRa alimentado
↑ 1 XBee superior ao LoRa enviando
≈ 2 similar recebendo
 * 3 medido em mWh enviando e recebendo
 - não configurável

HIL-01 em 38400 bps

Considerações sobre corrente e consumo do XBee em 38400 bps: segundo o comparativo de corrente do XBee, exposto na Figura 40(c) da subseção 5.2.1, verificou-se que a elevação da potência gerou um aumento de corrente em todos os cenários, exceto o cenário 0, sendo que os cenários 1 tiveram correntes superiores aos demais cenários.

Quanto ao comparativo de consumo do XBee, exposto na Figura 40(d) da subseção 5.2.1, foi estruturada uma análise percentual de consumo com a alteração de potência,

exibida na Tabela 37. Desta forma, nota-se que com exceção do *cenário* 0, a elevação da potência gerou aumentos de consumo, que não ultrapassaram 20,0%. Comparando o comportamento do consumo com o aumento da taxa de 9600 para 38400 *bps*, conforme Tabela 38, apenas o *cenário* 0 em PL0 (7 *dBm*) teve seu consumo sutilmente aumentado e no mesmo cenário em PL3 (21 *dBm*) manteve-se similar, em relação a 9600 *bps*. Nos demais cenários, apesar do aumento de corrente na elevação da taxa, o XBee em 38400 *bps* foi mais rápido na conclusão das operações reduzindo o consumo comparado a 9600 *bps*.

Tabela 37 – Comparativo de consumo do XBee em diferentes potências, a 38400 *bps*.

Potência	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	Consumo*	Consumo*	Consumo*	Consumo*
7 <i>dBm</i> (PL0)	1,40	0,10	0,09	0,29
21 <i>dBm</i> (PL3)	1,40	0,12	0,10	0,31
Elevação da potência (%)	≅	↑ 20,0%	↑ 11,1%	↑ 6,9%

↓ 0 21 *dBm* inferior a 7 *dBm* alimentado
 ↑ 1 21 *dBm* superior a 7 *dBm* enviando
 ≅ 2 similar recebendo
 * 3 medido em *mWh* enviando e recebendo

Tabela 38 – Comparativo percentual de consumo do XBee com a elevação da taxa de 9600 para 38400 *bps*.

Consumo XBee em 7 <i>dBm</i> (PL0)				
Taxa de transmissão (<i>bps</i>)	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	Consumo*	Consumo*	Consumo*	Consumo*
9600	1,37	0,37	0,36	0,83
38400	1,40	0,10	0,09	0,29
Elevação para 38400 <i>bps</i> (%)	↑ 2%	↓ 73%	↓ 75%	↓ 65%

Consumo XBee em 21 <i>dBm</i> (PL3)				
Taxa de transmissão (<i>bps</i>)	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	Consumo*	Consumo*	Consumo*	Consumo*
9600	1,39	0,39	0,36	0,86
38400	1,40	0,12	0,10	0,31
Elevação para 38400 <i>bps</i> (%)	≅	↓ 69%	↓ 72%	↓ 64%

↓ 0 38400 inferior a 9600 *bps* alimentado
 ↑ 1 38400 superior a 9600 *bps* enviando
 ≅ 2 similar recebendo
 * 3 medido em *mWh* enviando e recebendo

Considerações sobre corrente e consumo do LoRa em 38400 *bps*: segundo o comparativo de corrente média do LoRa, exposto na Figura 40(c), da subseção 5.2.1, percebe-se que a alteração do SF7 para SF9, em 7 e 20 *dBm*, gerou um aumento de corrente em todos os cenários comparados ao SF7, exceto o *cenário* 0 que se manteve similar. Em operação, o *cenário* 1, de modo geral, em ambos os SF e em ambas as potências, dispendeu mais corrente que os demais cenários, enquanto o *cenário* 2 obteve as menores correntes nessa taxa, nas diferentes potências e SFs. Além disso, a elevação de potência no mesmo SF gerou maiores correntes comparadas a 7 *dBm* em todos os cenários, exceto o *cenário* 0 que ficou similar.

Quanto aos resultados comparativos de consumo do LoRa, expostos na Figura 40(d), da subseção 5.2.1, foi estruturada uma análise percentual de consumo quanto à alteração do SF e elevação de potência, exibida na Tabela 39. Desta maneira, constatou-se que a alteração do SF7 para SF9 dentro da mesma potência, com exceção do *cenário* 0,

Considerações gerais sobre corrente e consumo entre ambos os rádios em 38400 bps: a Figura 40(c), da subseção 5.2.1, exibe o comparativo de corrente do XBee e LoRa nos 4 cenários. Pode-se verificar que: EM POTÊNCIAS BAIXAS, o XBee em PL0 (7 dBm), assim como em 9600 bps, teve correntes superiores ao LoRa na mesma potência tanto para SF7 quanto para SF9 em todos os cenários; e EM POTÊNCIAS ALTAS, o XBee em PL3 (21 dBm) teve menores correntes no *cenário* 1 e 3 quando comparado ao LoRa com 20 dBm em ambos SFs. Demais cenários, o LoRa em SF7 e SF9 tiveram menores correntes.

Em relação ao consumo, a Figura 40(d), da subseção 5.2.1, exibe o comparativo do consumo, dentro dos tempos gastos, do XBee e LoRa nos 4 cenários. Por outro lado, a Tabela 41 apresenta um comparativo do percentual de consumo entre os rádios. Nota-se que o XBee, em relação ao LoRa com as mesmas potências, obteve de modo geral menores consumos em quase todos os cenários. De forma similar a 9600 bps, apenas no *cenário* 0, em ambas potências e SFs, o LoRa obteve menor consumo que o XBee em PL0 (7 dBm) e PL3 (21 dBm). Sendo assim, pode-se concluir que LoRa, assim como em 9600 bps, mesmo com correntes inferiores, em alguns de seus parâmetros e cenários, obteve um tempo elevado na conclusão da maioria das tarefas e assim elevou seu consumo nesta taxa.

Tabela 41 – Comparativo do percentual de consumo entre XBee e LoRa, em 38400 bps.

Rádios com 7 dBm e LoRa em SF7 e SF9					
Rádio	SF	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
		Consumo*	Consumo*	Consumo*	Consumo*
XBee	–	1,40	0,10	0,09	0,29
LoRa	7	0,82	0,58	0,42	0,99
XBee x LoRa (%)		↑ 70,7%	↓ 82,8%	↓ 78,6%	↓ 70,7%
XBee	–	1,40	0,10	0,09	0,29
LoRa	9	0,82	0,59	0,48	1,12
XBee x LoRa (%)		↑ 70,7%	↓ 83,0%	↓ 81,2%	↓ 74,1%

Rádios com 20/21 dBm e LoRa em SF7 e SF9					
Rádio	SF	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
		Consumo*	Consumo*	Consumo*	Consumo*
XBee	–	1,40	0,12	0,10	0,31
LoRa	7	0,83	1,03	0,45	1,57
XBee x LoRa (%)		↑ 68,7%	↓ 88,3%	↓ 77,8%	↓ 80,2%
XBee	–	1,40	0,12	0,10	0,31
LoRa	9	0,83	1,41	0,61	2,52
XBee x LoRa (%)		↑ 68,7%	↓ 91,5%	↓ 83,6%	↓ 87,7%

↓ XBee inferior ao LoRa alimentado
 ↑ XBee superior ao LoRa enviando
 ≈ similar
 * medido em mWh
 0 1 2 3

– não configurável
 2 recebendo
 3 enviando e recebendo

HIL-01 em 57600 bps

Considerações sobre corrente e consumo do XBee em 57600 bps: segundo o comparativo de corrente do XBee, exposto na Figura 40(e) da subseção 5.2.1, verificou-se que a elevação da potência aumentou a corrente nos cenários, exceto o *cenário* 0 mantido similar. Além disso, como ocorrido nas demais taxas, em operação os *cenários* 1 tiveram as maiores correntes e os *cenários* 2 as menores.

Em relação ao comparativo de consumo do XBee, exposto na Figura 40(f) da subseção 5.2.1, foi elaborado um comparativo percentual de consumo, quanto à elevação

da potência, expresso na Tabela 42. Desta forma, verificou-se que a elevação da potência, com exceção do *cenário* 0, gerou aumentos de consumo que não ultrapassaram 28,6%. Comparando a conduta do consumo com o aumento da taxa de 38400 para 57600 *bps*, conforme Tabela 43, apenas o *cenário* 0 teve seu consumo mantido em relação a 38400 *bps*. Nos demais cenários, apesar do aumento de corrente com a elevação da taxa, o XBee em 57600 *bps* foi mais rápido na conclusão das operações reduzindo assim o consumo comparado a 38400 *bps*.

Tabela 42 – Comparativo de consumo do XBee em diferentes potências, a 57600 *bps*.

Potência	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	Consumo*	Consumo*	Consumo*	Consumo*
7 <i>dBm</i> (PL0)	1,40	0,07	0,06	0,23
21 <i>dBm</i> (PL3)	1,40	0,09	0,07	0,27
Elevação da potência (%)	≅	↑ 28,6%	↑ 16,7%	↑ 17,4%

↓ 0 21 *dBm* inferior a 7 *dBm* alimentado ↑ 1 21 *dBm* superior a 7 *dBm* enviando ≅ 2 similar recebendo * 3 medido em *mWh* enviando e recebendo

Tabela 43 – Comparativo do percentual de consumo do XBee com a elevação da taxa de 38400 para 57600 *bps*.

Consumo XBee em 7 <i>dBm</i> (PL0)				
taxa de transmissão (<i>bps</i>)	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	Consumo*	Consumo*	Consumo*	Consumo*
38400	1,40	0,10	0,09	0,29
57600	1,40	0,07	0,06	0,23
Elevação para 57600 <i>bps</i> (%)	≅	↓ 30%	↓ 33%	↓ 21%

Consumo XBee em 21 <i>dBm</i> (PL3)				
taxa de transmissão (<i>bps</i>)	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	Consumo*	Consumo*	Consumo*	Consumo*
38400	1,40	0,12	0,10	0,31
57600	1,40	0,09	0,07	0,27
Elevação para 57600 <i>bps</i> (%)	≅	↓ 25%	↓ 30%	↓ 13%

↓ 0 57600 inferior a 38400 *bps* alimentado ↑ 1 57600 superior a 38400 *bps* enviando ≅ 2 similar recebendo * 3 medido em *mWh* enviando e recebendo

Considerações sobre corrente e consumo do LoRa em 57600 *bps*: segundo o comparativo de corrente média do LoRa, exposto na Figura 40(e), da subseção 5.2.1, nota-se que, como ocorrido nas demais taxas, a alteração do SF7 para SF9, em 7 e 20 *dBm*, gerou um aumento de corrente, exceto o *cenário* 0 que também se manteve similar mesmo com a troca do SF. Em operação, os *cenários* 1 e 3 tiveram as maiores correntes enquanto o *cenário* 2 teve as menores correntes nessa taxa, nas diferentes potências e SFs. Além disso, a ascensão de potência, no mesmo SF, gerou maiores correntes comparadas a 7 *dBm* em todos os cenários, exceto o *cenário* 0 que manteve-se similar.

Quanto aos resultados comparativos de consumo do LoRa, expostos na Figura 40(f), da subseção 5.2.1, foi elaborado um comparativo percentual de consumo, quanto à mudança do SF e potência, expresso na Tabela 44. Desta forma, nota-se que a alteração do SF7 para SF9, dentro da mesma potência, gerou um aumento de consumo em quase todos os cenários, com exceção do *cenário* 0 com consumos de modo geral similares em ambas

Tabela 45 – Comparativo do percentual de consumo do LoRa com a elevação da taxa de 38400 para 57600 bps.

Consumo LoRa em 7 dBm				
SF7				
taxa de transmissão (bps)	Cenário 0 Consumo*	Cenário 1 Consumo*	Cenário 2 Consumo*	Cenário 3 Consumo*
38400	0,82	0,58	0,42	0,99
57600	1,03	0,67	0,50	0,95
Elevação para 57600 bps (%)	↑ 26%	↑ 16%	↑ 19%	↓ 4%
SF9				
38400	0,82	0,59	0,48	1,12
57600	1,00	0,68	0,57	1,27
Elevação para 57600 bps (%)	↑ 22%	↑ 15%	↑ 19%	↑ 13%
Consumo LoRa em 20 dBm				
SF7				
38400	0,83	1,03	0,45	1,57
57600	1,01	1,42	0,55	1,89
Elevação para 57600 bps (%)	↑ 22%	↑ 38%	↑ 22%	↑ 20%
SF9				
38400	0,83	1,41	0,61	2,52
57600	1,01	1,46	0,69	2,68
Elevação para 57600 bps (%)	↑ 22%	↑ 4%	↑ 13%	↑ 6%

↓ 0 57600 inferior a 38400 bps alimentado ↑ 1 57600 superior a 38400 bps enviando ≅ 2 similar recebendo * 3 medido em mWh enviando e recebendo

obteve um tempo ainda elevado na conclusão da maioria dos cenários, contribuindo para seu alto consumo final.

Tabela 46 – Comparativo do percentual de consumo entre XBee e LoRa, em 57600 bps.

Rádios com 7 dBm					
Rádio	SF	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
		Consumo*	Consumo*	Consumo*	Consumo*
XBee	–	1,40	0,07	0,06	0,23
LoRa	7	1,03	0,67	0,50	0,95
XBee x LoRa (%)		↑ 35,9%	↓ 89,5%	↓ 88,0%	↓ 75,8%
XBee	–	1,40	0,07	0,06	0,23
LoRa	9	1,00	0,68	0,57	1,27
XBee x LoRa (%)		↑ 40,0%	↓ 89,7%	↓ 89,5%	↓ 81,9%
Rádios com 20/21 dBm					
XBee	–	1,40	0,09	0,07	0,27
LoRa	7	1,01	1,42	0,55	1,89
XBee x LoRa (%)		↑ 38,6%	↓ 93,7%	↓ 87,3%	↓ 85,7%
XBee	–	1,40	0,09	0,07	0,27
LoRa	9	1,01	1,46	0,69	2,68
XBee x LoRa (%)		↑ 38,6%	↓ 93,8%	↓ 89,8%	↓ 89,9%

↓ 0 XBee inferior ao LoRa alimentado ↑ 1 XBee superior ao LoRa enviando ≅ 2 similar recebendo * 3 medido em mWh enviando e recebendo
 – não configurável

HIL-02 - Dados de Transferência

A seguir serão expostos os dados analíticos comparativos de bancada entre XBee e LoRa, em modo síncrono de envio, quanto à taxa de transferência, PDR e tempo, nos cenários e parâmetros descritos na subseção 4.3.1.

Transferência, PDR e tempo do XBee nas taxas de transmissão

A Tabela 47 exhibe os dados resultantes do XBee nos experimento HIL-02, quanto as taxas de transferência, PDRs e tempos médios, em diferentes potências, nas taxas de transmissão de 9600, 38400 e 57600 *bps*.

Tabela 47 – Comparativo das taxas, PDRs e tempos médios do XBee, em diferentes potências e taxas de transmissão

9600 bps			
Potência (dBm)	Taxa transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
7	3,22	100	144,1
21	3,22	100	144,1
38400 bps			
Potência (dBm)	Taxa transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
7	10,22	100	45,4
21	10,21	100	45,5
57600 bps			
Potência (dBm)	Taxa transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
7	13,14	99,7	35,4
21	13,21	99,7	35,3

HIL-02 em 9600 bps

Transferência do LoRa em 9600 bps: a Tabela 48 exhibe os dados resultantes do LoRa nos experimento HIL-02, quanto as taxas de transferência, PDRs e tempos médios, em diferentes potências e SFs, em 9600 *bps*.

Tabela 48 – Comparativo das taxas, PDRs e tempos médios do LoRa, em diferentes potências e SFs, a 9600 *bps*.

(a) Comparativo do LoRa, na alteração do SF7 para SF9.

Potência (dBm)	SF	Taxa transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
7	7	0,71	32,6	212,3
	9	0,74	39,1	245,4
Alteração do SF (%)		↑ 4%	↑ 6%	↑ 16%
20	7	0,74	33,5	210,6
	9	0,74	39,1	244,6
Alteração do SF (%)		≅	↑ 6%	↑ 16%

↓ SF9 inferior ao SF7 ↑ SF9 superior ao SF7 ≅ similar

(b) Comparativo do LoRa na alteração de 7 para 20 dBm.

	Taxa de transferência	PDR	Tempo
Alteração potências, em SF7 (%)	↑ 4%	≅	≅
Alteração potências, em SF9 (%)	≅	≅	≅

↓ 20 dBm inferior a 7 dBm ↑ 20 dBm superior a 7 dBm ≅ similar

Comparação entre ambos os rádios em 9600 bps: a Tabela 49 apresenta uma comparação percentual entre as médias de taxa de transferência, PDR e tempo, entre o LoRa, em seus dois SF, e o XBee, analisando os resultados com as potências equiparadas.

Tabela 49 – Comparativo de vantagens médias percentuais entre LoRa e XBee, quanto a taxa, PDR e tempo, em 9600 bps.

Rádios com 7 dBm e LoRa em SF7 e SF9				
Rádio	SF	Taxa de transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
XBee	–	3,22	100	144,1
LoRa	7	0,71	32,6	212,3
Comparativo (%)		↓ 78%	↓ 67%	↑ 47%
LoRa	9	0,74	39,1	245,4
Comparativo (%)		↓ 77%	↓ 61%	↑ 70%

Rádios XBee com 21 dBm e LoRa com 20 dBm em SF7 e SF9				
Rádio	SF	Taxa de transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
XBee	–	3,22	100	144,1
LoRa	7	0,74	33,5	210,6
Comparativo (%)		↓ 77%	↓ 66%	↑ 46%
LoRa	9	0,74	39,1	244,6
Comparativo (%)		↓ 77%	↓ 61%	↑ 70%

↓ LoRa inferior ao XBee ↑ LoRa superior ao XBee ≅ similar – não configurável

HIL-02 em 38400 bps

Transferência do LoRa em 38400 bps: a Tabela 50 exibe os dados resultantes do LoRa nos experimento HIL-02, quanto as taxas de transferência, PDRs e tempos médios, em diferentes potências e SFs, em 38400 bps.

Tabela 50 – Comparativo das taxas, PDRs e tempos médios do LoRa, em diferentes potências e SFs, a 38400 bps.

(a) Comparativo do LoRa, na alteração do SF7 para SF9.

Potência (dBm)	SF	Taxa transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
7	7	1,72	85,6	230,2
	9	0,80	37,5	220,0
Alteração do SF (%)		↓ 54%	↓ 48%	↓ 4%
20	7	1,76	86,8	229,9
	9	0,78	36,7	219,7
Alteração do SF (%)		↓ 56%	↓ 50%	↓ 4%

↓ SF9 inferior ao SF7 ↑ SF9 superior ao SF7 ≅ similar

(b) Comparativo do LoRa, na alteração de 7 para 20 dBm.

	Taxa transferência	PDR	Tempo
Alteração potências, em SF7 (%)	↑ 2%	≅	≅
Alteração potências, em SF9 (%)	↓ 3%	≅	≅

↓ 20 dBm inferior a 7 dBm ↑ 20 dBm superior a 7 dBm ≅ similar

Comparação dos rádios quanto à mudança de 9600 bps para 38400 bps: a Tabela 51, apresenta o percentual de degradação ou melhora dos rádios XBee e LoRa quanto à elevação da taxa de transmissão de 9600 para 38400 bps.

Tabela 51 – Comparativo do percentual de taxa de transferência, PDR e tempo entre XBee e LoRa, com a elevação da taxa de 9600 para 38400 bps.

Rádios em 7 dBm					
Rádio	SF	Taxa de dados (bps)	Taxa de transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
XBee	-	9600	3,22	100	144,1
		38400	10,22	100	45,4
Elevação para 38400 bps (%)			↑ 217%	≅	↓ 68%
LoRa	7	9600	0,71	32,6	212,3
		38400	1,72	85,6	230,2
Elevação para 38400 bps (%)			↑ 142%	↑ 53%	↑ 8%
LoRa	9	9600	0,74	39,1	245,4
		38400	0,80	37,5	220,0
Elevação para 38400 bps (%)			↑ 8%	↓ 2%	↓ 10%

Rádios XBee em 21 dBm e LoRa em 20 dBm					
Rádio	SF	Taxa de dados (bps)	Taxa de transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
XBee	-	9600	3,22	100	144,1
		38400	10,21	100	45,5
Elevação para 38400 bps (%)			↑ 217%	≅	↓ 68%
LoRa	7	9600	0,74	33,5	210,6
		38400	1,76	86,8	229,9
Elevação para 38400 bps (%)			↑ 137%	↑ 53%	↑ 9%
LoRa	9	9600	0,74	39,1	244,6
		38400	0,78	36,7	219,7
Elevação para 38400 bps (%)			↑ 5%	↓ 2%	↓ 10%

↓ 38400 inferior a 9600 bps ↑ 38400 superior a 9600 bps ≅ similar - não configurável

Comparação entre ambos os rádios em 38400 bps: a Tabela 52 apresenta uma comparação percentual entre as médias de taxa de transferência, PDR e tempo, entre o LoRa, em seus dois SF, e o XBee, analisando os resultados com as potências equiparadas.

Tabela 52 – Comparativo de vantagens médias percentuais entre LoRa e XBee, quanto a taxa, PDR e tempo, em 38400 bps.

Rádios com 7 dBm e LoRa em SF7 e SF9				
Potência (dBm)	SF	Taxa transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
XBee	-	10,22	100	45,4
LoRa	7	1,72	85,6	230,2
Comparativo (%)		↓ 83%	↓ 14%	↑ 407%
LoRa	9	0,80	37,5	220,0
Comparativo (%)		↓ 92%	↓ 62%	↑ 385%

Rádios XBee com 21 dBm e LoRa com 20 dBm em SF7 e SF9				
Potência (dBm)	SF	Taxa transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
XBee	-	10,21	100	45,5
LoRa	7	1,76	86,8	229,9
Comparativo (%)		↓ 83%	↓ 13%	↑ 406%
LoRa	9	0,78	36,7	219,7
Comparativo (%)		↓ 92%	↓ 63%	↑ 383%

↓ LoRa inferior ao XBee ↑ LoRa superior ao XBee ≅ similar - não configurável

HIL-02 em 57600 bps

Transferência do LoRa em 57600 bps: a Tabela 53 exhibe os dados resultantes do LoRa nos experimento HIL-02, quanto as taxas de transferência, PDRs e tempos médios, em diferentes potências e SFs, em taxa de transmissão de 57600 bps.

Tabela 53 – Comparativo das taxas, PDRs e tempos médios do LoRa, em diferentes potências e SFs, a 57600 bps.

(a) Comparativo do LoRa, na alteração do SF7 para SF9.

Potência (dBm)	SF	Taxa transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
7	7	2,47	98,2	184,3
	9	0,84	38,9	213,6
Alteração do SF (%)		↓ 66%	↓ 60%	↑ 16%

Comparativo do LoRa, na alteração do SF7 para SF9, operando em 20 dBm				
20	7	2,46	97,8	184,3
	9	0,85	39,1	212,4
Alteração do SF (%)		↓ 65%	↓ 60%	↑ 15%

↓ SF9 inferior ao SF7 ↑ SF9 superior ao SF7 ≅ similar

(b) Comparativo do LoRa, na alteração de 7 para 20 dBm.

	Taxa transferência	PDR	Tempo
Alteração potências, em SF7 (%)	≅	≅	≅
Alteração potências, em SF9 (%)	≅	≅	≅

↓ 20 dBm inferior a 7 dBm ↑ 20 dBm superior a 7 dBm ≅ similar

Comparação dos rádios quanto à mudança de 38400 bps para 57600 bps: a Tabela 54 apresenta o percentual de queda ou melhoria dos rádios LoRa e XBee quanto à elevação da taxa de transmissão de 38400 para 57600 bps.

Tabela 54 – Comparativo do percentual de taxa de transferência, PDR e tempo do XBee e LoRa, com a elevação da taxa de 38400 para 57600 bps.

Rádios em 7 dBm					
Rádio	SF	Taxa de dados (bps)	Taxa de transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
XBee	-	38400	10,22	100	45,4
		57600	13,14	99,7	35,4
Elevação para 57600 bps (%)			↑ 29%	≅	↓ 22%
LoRa	7	38400	1,72	85,6	230,2
		57600	2,47	98,2	184,3
Elevação para 57600 bps (%)			↑ 44%	↑ 13%	↓ 20%
LoRa	9	38400	0,80	37,5	220,0
		57600	0,84	38,9	213,6
Elevação para 57600 bps (%)			↑ 5%	≅	↓ 3%

Rádios XBee em 21 dBm e LoRa em 20 dBm					
Rádio	SF	Taxa de dados (bps)	Taxa de transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
XBee	-	38400	10,21	100	45,5
		57600	13,21	99,7	35,3
Elevação para 57600 bps (%)			↑ 29%	≅	↓ 22%
LoRa	7	38400	1,76	86,8	229,9
		57600	2,46	97,8	184,3
Elevação para 38400 bps (%)			↑ 40%	↑ 11%	↓ 20%
LoRa	9	38400	0,78	36,7	219,7
		57600	0,85	39,1	212,4
Elevação para 57600 bps (%)			↑ 9%	↑ 2%	↓ 3%

↓ 57600 inferior a 38400 bps ↑ 57600 superior a 38400 bps ≅ similar - não configurável

Comparação entre ambos os rádios em 57600 bps: com base nos resultados nesta taxa, a Tabela 55 apresenta uma comparação percentual entre as médias de taxa de

transferência, PDR e tempo, entre o LoRa, em seus dois SF, e o XBee, analisando os resultados com as potências equiparadas.

Tabela 55 – Comparativo de vantagens médias percentuais entre LoRa e XBee, quanto a taxa, PDR e tempo, em 57600 bps.

Rádios com 7 dBm e LoRa em SF7 e SF9				
Rádio	SF	Taxa de transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
XBee	–	13,14	99,7	35,4
LoRa	7	2,47	98,2	184,3
Comparativo (%)		↓ 81%	↓ 2%	↑ 421%
LoRa	9	0,84	38,9	213,6
Comparativo (%)		↓ 94%	↓ 61%	↑ 503%

Rádios XBee com 21 dBm e LoRa com 20 dBm em SF7 e SF9				
Rádio	SF	Taxa de transferência (Kbps)	PDR (%)	Tempo (s)
XBee	–	13,21	99,7	35,3
LoRa	7	2,46	97,8	184,3
Comparativo (%)		↓ 81%	↓ 2%	↑ 422%
LoRa	9	0,85	39,1	212,4
Comparativo (%)		↓ 94%	↓ 61%	↑ 502%

↓ LoRa inferior ao XBee ↑ LoRa superior ao XBee ≅ similar – não configurável

APÊNDICE B – DADOS DOS EXPERIMENTOS HITL

Neste apêndice serão apresentados os resultados analíticos dos experimentos em área externa com simulações discretas de movimento entre os rádios XBee e LoRa, sintetizados na seção 5.3, com modo de envio síncrono e assíncrono em redes P2P e *mesh*, tendo como objetivo comparar e avaliar taxa de transferência PDR e tempo gastos pelos rádios em ambientes próximos a uma FANET multimissão.

HITL-01 - Dados de Transferência

Abaixo são expostos os dados brutos e comparativos dos rádios, nas distâncias, quanto à média da taxa de transferência, PDR e tempo total de forma síncrona, em 9600, 38400 e 57600 *bps* em ambiente externo, nos cenários e parâmetros definidos e descritos na subseção 4.3.2.

HITL-01 em 9600 bps

Taxa de transferência do XBee e LoRa, em 9600 bps: a Tabela 56 expõe os valores e uma avaliação percentual da taxa de transferência do XBee e LoRa, em cada distância e nas duas potências e SFs, em relação à taxa alcançada na distância anterior, com 9600 *bps*.

Tabela 56 – Comparativo de taxa de transferência e vantagens percentuais do XBee e LoRa, em diferentes potências nas distâncias, a 9600 *bps*.

Taxa de transferência a 9600 bps - rádios com 7 dBm												
Rádio	SF	HIL	100 m		200 m		300 m		400 m		500 m	
		Taxa ¹	Taxa ¹	CP	Taxa ¹	CP	Taxa ¹	CP	Taxa ¹	CP	Taxa ¹	CP
XBee	–	3,22	2,80	↓13%	φ	φ	φ	φ	φ	φ	φ	φ
LoRa	7	0,71	0,72	≅	0,76	↑6%	0,74	↓3%	φ	φ	φ	φ
LoRa	9	0,75	0,68	↓9%	0,69	≅	0,65	↓6%	0,61	↓6%	0,48	↓21%

Taxas de transferência a 9600 bps - rádios XBee com 21 dBm e LoRa com 20 dBm												
XBee	–	3,21	3,06	↓5%	2,89	↓6%	2,94	↑2%	0,81	↓72%	0,41	↓49%
LoRa	7	0,76	0,77	≅	0,75	↓3%	0,72	↓4%	0,72	≅	0,67	↓7%
LoRa	9	0,75	0,76	≅	0,73	↓4%	0,73	≅	0,72	≅	0,66	↓8%

↓ inferior à distância anterior ↑ superior à distância anterior ≅ similar à distância anterior
 φ sem resultados – não configurável 1 Taxa de transferência(Kbps)
 CP comparativo % com à distância anterior

PDR do XBee e LoRa, em 9600 bps: a Tabela 57 apresenta os valores e uma avaliação percentual da taxa de entrega do XBee e LoRa, em cada distância e nas duas potências e SFs, em relação à taxa alcançada na distância anterior, com 9600 *bps*.

HITL-01 em 38400 bps

Taxa de transferência do XBee e LoRa, em 38400 bps: a Tabela 58 exibe uma avaliação percentual do XBee e LoRa, em cada distância e nas duas potências e SFs, em relação à taxa alcançada na distância anterior, com 38400 *bps*.

Tabela 57 – Comparativo de PDR e vantagens percentuais do XBee e LoRa, em diferentes potências nas distâncias, a 9600 bps.

PDR a 9600 bps- rádios com 7 dBm												
Rádio	SF	HIL	100 m		200 m		300 m		400 m		500 m	
		PDR	PDR	CP	PDR	CP	PDR	CP	PDR	CP	PDR	CP
XBee	-	100%	99,6%	≅	φ	φ	φ	φ	φ	φ	φ	φ
LoRa	7	32,4%	32,8%	≅	34,8%	↑2%	34,4%	≅	φ	φ	φ	φ
LoRa	9	39,2%	35,6%	↓4%	36,8%	≅	35,2%	↓2%	32,8%	↓2%	26,0%	↓7%

PDR a 9600 bps - rádios XBee com 21 dBm e LoRa com 20 dBm												
XBee	-	100%	100%	≅	99,2%	≅	100%	≅	36,8%	↓63%	21,2%	↓16%
LoRa	7	34,0%	34,8%	≅	34,0%	≅	32,8%	≅	33,2%	≅	31,2%	↓2%
LoRa	9	39,2%	40,0%	≅	38,8%	≅	38,0%	≅	38,0%	≅	35,2%	↓3%

↓ inferior à distância anterior ↑ superior à distância anterior ≅ similar à distância anterior
 φ sem resultados - não configurável CP comparativo % com à distância anterior

Tabela 58 – Comparativo de taxa de transferência e vantagens percentuais do XBee e LoRa, em diferentes potências nas distâncias, a 38400 bps.

Taxa de transferência a 38400 bps - rádios com 7 dBm												
Rádio	SF	HIL	100 m		200 m		300 m		400 m		500 m	
		Taxa ¹	Taxa ¹	CP	Taxa ¹	CP	Taxa ¹	CP	Taxa ¹	CP	Taxa ¹	CP
XBee	-	10,23	6,98	↓32%	0,01	↓99,8%	φ	φ	φ	φ	φ	φ
LoRa	7	1,74	1,72	≅	1,47	↓15%	1,28	↓13%	1,13	↓12%	0,94	↓17%
LoRa	9	0,85	0,74	↓13%	0,74	≅	0,73	≅	0,71	↓3%	0,70	≅

Taxas de transferência a 38400 bps - rádios XBee com 21 dBm e LoRa com 20 dBm												
XBee	-	10,22	9,61	↓6%	8,59	↓11%	6,39	↓26%	0,68	↓89%	φ	φ
LoRa	7	1,79	1,51	↓16%	1,71	↓13%	1,55	↓9%	1,34	↓14%	1,32	≅
LoRa	9	0,81	0,79	↓2%	0,80	≅	0,80	≅	0,76	↓5%	0,71	↓7%

↓ inferior à distância anterior ↑ superior à distância anterior ≅ similar à distância anterior
 φ sem resultados - não configurável 1 Taxa de transferência(Kbps)
 CP comparativo % com à distância anterior

PDR do XBee e LoRa, em 38400 bps: a Tabela 59 apresenta os valores e uma avaliação percentual da taxa de entrega do XBee e LoRa, em cada distância e nas duas potências e SFs, em relação à taxa alcançada na distância anterior, com 38400 bps.

Tabela 59 – Comparativo de PDR e vantagens percentuais do XBee e LoRa, em diferentes potências nas distâncias, a 38400 bps.

PDR a 38400 bps- rádios com 7 dBm												
Rádio	SF	HIL	100 m		200 m		300 m		400 m		500 m	
		PDR	PDR	CP	PDR	CP	PDR	CP	PDR	CP	PDR	CP
XBee	-	100%	99,6%	≅	0,8%	↓99%	φ	φ	φ	φ	φ	φ
LoRa	7	86,4%	86,4%	≅	70,8%	↓16%	64,8%	↓6%	53,2%	↓12%	43,6%	↓10%
LoRa	9	39,2%	35,6%	↓4%	35,6%	≅	34,8%	≅	34,0%	≅	33,6%	≅

PDR a 38400 bps - rádios XBee com 21 dBm e LoRa com 20 dBm												
XBee	-	100%	100%	≅	100%	≅	96,8%	↓3%	32,4%	↓64%	φ	φ
LoRa	7	88,0%	77,6%	↓10%	86,0%	↑8%	78,8%	↓7%	68,8%	↓10%	61,2%	↓8%
LoRa	9	38,0%	38,0%	≅	38,0%	≅	37,6%	≅	36,0%	↓2%	34,8%	≅

↓ inferior à distância anterior ↑ superior à distância anterior ≅ similar à distância anterior
 φ sem resultados - não configurável CP comparativo % com à distância anterior

HITL-01 em 57600 bps

Taxa de transferência do XBee e LoRa, em 57600 bps: a Tabela 60 apresenta os valores e uma avaliação percentual da taxa de transferência do XBee e LoRa, em cada

distância e nas duas potências e SFs, em relação à taxa alcançada na distância anterior, com taxa de transmissão de 57600 bps.

Tabela 60 – Comparativo de taxa de transferência e vantagens percentuais do XBee e LoRa, em diferentes potências nas distâncias, a 57600 bps.

Taxa de transferência a 57600 bps - rádios com 7 dBm													
Rádio	SF	HIL	100 m			200 m		300 m		400 m		500 m	
		Taxa ¹	Taxa ¹	CP	Taxa ¹	CP	Taxa ¹	CP	Taxa ¹	CP	Taxa ¹	CP	
XBee	-	13,32	8,63	↓35%	φ	φ	φ	φ	φ	φ	φ	φ	
LoRa	7	2,46	2,43	≈	2,37	↓2%	2,32	↓2%	2,22	↓4%	1,86	↓16%	
LoRa	9	0,82	0,82	≈	0,82	≈	0,80	↓2%	0,77	↓4%	0,75	↓3%	

Taxas de transferência a 57600 bps - rádios XBee com 21 dBm e LoRa com 20 dBm												
XBee	-	13,50	12,75	↓6%	10,85	↓15%	10,50	↓3%	0,53	↓95%	0,03	↓94%
LoRa	7	2,47	2,37	↓4%	2,33	↓2%	2,33	≈	2,29	↓2%	2,20	↓4%
LoRa	9	0,85	0,81	↓5%	0,85	↑5%	0,81	↓5%	0,77	↓5%	0,76	≈

↓ inferior à distância anterior ↑ superior à distância anterior ≈ similar à distância anterior
 φ sem resultados - não configurável 1 Taxa de transferência(Kbps)
 CP comparativo % com à distância anterior

PDR do XBee e LoRa, em 57600 bps: a Tabela 61 apresenta os valores e uma avaliação percentual da taxa de entrega do XBee e LoRa, em cada distância e nas duas potências e SFs, em relação à taxa alcançada na distância anterior, com 57600 bps.

Tabela 61 – Comparativo de PDR e vantagens percentuais do XBee e LoRa, em diferentes potências nas distâncias, a 57600 bps.

PDR a 57600 bps - rádios com 7 dBm													
Rádio	SF	HIL	100 m			200 m		300 m		400 m		500 m	
		PDR	PDR	CP	PDR	CP	PDR	CP	PDR	CP	PDR	CP	
XBee	-	100%	100%	≈	φ	φ	φ	φ	φ	φ	φ	φ	
LoRa	7	98,0%	98,0%	≈	97,6%	≈	94,8%	↓3%	92,8%	↓2%	79,2%	↓14%	
LoRa	9	38,0%	38,4%	≈	38,4%	≈	37,2%	≈	35,6%	↓2%	35,6%	≈	

PDR a 57600 bps - rádios XBee com 21 dBm e LoRa com 20 dBm												
XBee	-	100%	100%	≈	100%	≈	99,6%	≈	26,0%	↓74%	1,6%	↓24%
LoRa	7	98,0%	99,2%	≈	98,0%	≈	96,8%	≈	96,4%	≈	92,4%	↓4%
LoRa	9	39,2%	37,6%	↓2%	38,8%	≈	38,0%	≈	36,0%	↓2%	35,6%	≈

↓ inferior à distância anterior ↑ superior à distância anterior ≈ similar à distância anterior
 φ sem resultados - não configurável CP comparativo % com à distância anterior

HITL-01 - Tempo gasto pelos rádios nas diferentes taxas de transmissão

A Tabela 62 apresenta os valores de tempos gastos pelo XBee e LoRa, em cada distância e nas duas potências e SFs, com taxas de transmissão de 9600, 38400 e 57600 bps, no HITL-01.

Tabela 62 – Tempo gasto (em segundos) pelo XBee e LoRa, em diferentes taxas, potências e SFs, nas distâncias do HITL-01.

Rádios com 7 dBm						
Taxa de transmissão (bps)	HIL	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
XBee						
9600	28,8	33,0	55,6	55,7	55,7	56,3
38400	9,1	13,3	56,0	55,5	55,5	55,6
57600	6,9	10,8	55,7	55,5	55,5	55,7
LoRa em SF7						
9600	42,5	42,4	42,3	43,1	57,1	57,2
38400	46,1	46,6	44,5	47,2	44,2	44,3
57600	36,9	37,4	38,1	38,0	38,9	39,9
LoRa em SF9						
9600	48,2	49,0	49,6	50,4	50,4	51,0
38400	42,9	44,3	44,6	44,3	44,5	44,6
57600	43,3	43,7	43,6	43,2	43,1	44,2
Rádios XBee com 21 dBm e LoRa com 20 dBm						
Taxa de transmissão (bps)	HIL	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
XBee						
9600	28,9	30,3	31,9	31,5	43,9	48,8
38400	9,1	9,6	10,8	14,3	45,7	55,7
57600	6,9	7,3	8,7	8,8	45,8	55,9
LoRa em SF7						
9600	41,7	42,0	41,9	42,4	43,1	43,4
38400	45,7	47,5	46,8	46,9	47,5	43,1
57600	36,8	38,8	39,1	38,6	39,0	38,9
LoRa em SF9						
9600	48,7	49,0	49,2	48,3	49,0	49,4
38400	43,2	44,3	44,2	43,5	44,1	45,7
57600	43,1	43,3	42,5	43,7	43,3	43,4

HITL-02 - Dados de Transferência Assíncrona

Abaixo são apresentados os resultados analíticos da análise assíncrona entre os rádios nos limites de distância em ambiente externo, HITL-02, com taxa de 57600 *bps* e empregando os parâmetros descritos na subseção 4.3.2.

XBee síncrono e assíncrono: a Tabela 63 apresenta os resultados obtidos e a avaliação percentual da taxa de transferência, PDR e tempo gasto pelo XBee, entre o modo de envio assíncrono e síncrono, nas distâncias e potências analisadas.

Tabela 63 – Resultados e comparativos percentuais do XBee em modo assíncrono em relação ao síncrono, quanto aos parâmetros nas potências e distâncias.

XBee		7 dBm (PL0)		21 dBm (PL3)	
Parâmetros	Modo de envio	Distância		Distância	
		bancada (HIL)	200 m	bancada (HIL)	500 m
Taxa de transf/envio (Kbps)	síncrono	13,32	0	13,50	0,03
	assíncrono	44,61	44,60	44,62	44,60
Comparativo (%)		↑ 235%	↑ ϕ	↑ 231%	↑ ϕ
PDR (%)	síncrono	100	0	100	1,6
	assíncrono	100	3,2	100	3,2
Comparativo (%)		≈	↑ 3%	≈	↑ 2%
Tempo (s)	síncrono	6,9	55,7	6,9	55,9
	assíncrono	2,1	2,1	2,1	2,1
Comparativo (%)		↓ 70%	↓ 96%	↓ 70%	↓ 96%

↓ assíncrono inferior ao síncrono
 ↑ ϕ assíncrono superior ao síncrono, com síncrono sem resultados
 ↑ assíncrono superior ao síncrono
 ≈ assíncrono similar ao síncrono

LoRa síncrono e assíncrono: a Tabela 64 apresenta os resultados obtidos e a avaliação percentual da taxa de transferência, PDR e tempo gasto pelo LoRa, entre o modo de envio assíncrono e síncrono, nas distâncias, potências e SFs analisados.

Tabela 64 – Resultados e comparativo percentual do LoRa em modo assíncrono em relação ao síncrono, quanto aos parâmetros nas potências, SFs e distâncias.

LoRa com 7 dBm		SF7		SF9	
Parâmetros	Modo de envio	Distância		Distância	
		bancada (HIL)	500 m	bancada (HIL)	500 m
Taxa de transf/envio (Kbps)	síncrono	2,46	1,86	0,82	0,75
	assíncrono	3,57	3,56	3,58	3,56
Comparativo (%)		↑ 45%	↑ 91%	↑ 337%	↑ 375%
PDR (%)	síncrono	98,0	79,2	38,0	35,6
	assíncrono	92,0	51,2	32,0	22,0
Comparativo (%)		↓ 6%	↓ 28%	↓ 6%	↓ 14%
Tempo (s)	síncrono	36,9	39,9	43,3	44,2
	assíncrono	26,0	26,1	25,9	26,1
Comparativo (%)		↓ 30%	↓ 35%	↓ 40%	↓ 41%

LoRa com 20 dBm		SF7		SF9	
Parâmetros	Modo de envio	Distância		Distância	
		bancada (HIL)	500 m	bancada (HIL)	500 m
Taxa de transf/envio (Kbps)	síncrono	2,47	2,20	0,85	0,76
	assíncrono	3,58	3,55	3,56	3,55
Comparativo (%)		↑ 45%	↑ 61%	↑ 319%	↑ 367%
PDR (%)	síncrono	98,0	92,4	39,2	35,6
	assíncrono	92,0	89,2	34,0	32,8
Comparativo (%)		↓ 6%	↓ 3%	↓ 5%	↓ 3%
Tempo (s)	síncrono	36,8	38,9	43,1	43,4
	assíncrono	25,9	26,1	26,0	26,1
Comparativo (%)		↓ 30%	↓ 33%	↓ 40%	↓ 40%

↓ assíncrono inferior ao síncrono
 ↑ ϕ assíncrono superior ao síncrono, com síncrono sem resultados
 ↑ assíncrono superior ao síncrono
 ≈ assíncrono similar ao síncrono

LoRa e XBee, em modo assíncrono: a Tabela 65 apresenta apenas os resultados assíncronos e as análises percentuais entre o LoRa o XBee em bancada e a 500 m.

Tabela 65 – Comparativo percentual entre LoRa e XBee no HITL-02, em modo assíncrono, na bancada e a 500 m.

Rádios com 7 dBm, assíncronos							
Rádio	SF	HIL			500m		
		Taxa envio ¹	PDR (%)	Tempo ²	Taxa envio ¹	PDR (%)	Tempo ²
XBee	–	44,61	100	2,1	ϕ	ϕ	ϕ
LoRa	7	3,57	92,0	26,0	3,56	79,2	26,1
Comparativo (%)		↓ 92%	↓ 8%	↑ 1138%	↑ ϕ	↑ ϕ	↑ ϕ
XBee	–	44,61	100	2,1	ϕ	ϕ	ϕ
LoRa	9	3,58	32,0	25,9	3,56	35,6	26,1
Comparativo (%)		↓ 92%	↓ 68%	↑ 1133%	↑ ϕ	↑ ϕ	↑ ϕ

Rádios XBee com 21 dBm e LoRa com 20 dBm, assíncronos							
XBee	–	44,62	100	2,1	44,60	3,2	2,1
LoRa	7	3,58	92,0	25,9	3,55	89,2	26,1
Comparativo (%)		↓ 92%	↓ 8%	↑ 1133%	↓ 92%	↑ 86%	↑ 1143%
XBee	–	44,62	100	2,1	44,60	3,2	2,1
LoRa	9	3,56	34,0	26,0	3,55	32,8	26,1
Comparativo (%)		↓ 92%	↓ 66%	↑ 1138%	↓ 92%	↑ 30%	↑ 1143%

↓ LoRa inferior ao XBee ↑ LoRa superior ao XBee ↑ ϕ LoRa superior, porém XBee sem alcance
 ϕ sem alcance e resultados 1 medida em Kbps 2 medida em s
 – não configurável

HITL-05 - Dados de Transferência Assíncrona P2P e Mesh

A seguir serão expostos os resultados analíticos do estudo assíncrono dos rádios XBee e LoRa, conforme descritos na subseção 4.3.2, quanto a PDR, taxa de envio e tempo gasto em distâncias de até 1250 m, em rede P2P e mesh, e por fim uma análise comparativa entre ambos os rádios.

XBee P2P e mesh

PDR do XBee P2P e mesh: A Tabela 66 apresenta uma análise comparativa dos PDRs e performances nas distâncias, em relação à P2P, da rede mesh de 1 salto e em seguida com 2 saltos. Além disso, a Tabela 67 apresenta a mesma análise comparando o desempenho da rede mesh de 2 saltos em relação a 1 salto.

Tabela 66 – Performance PDR, nas distâncias, da rede XBee mesh em relação à P2P.

PDR XBee mesh com 1 salto comparado à P2P										
	500 m		750 m		850 m		1000 m		1250 m	
	P2P	1 salto	P2P	1 salto	P2P	1 salto	P2P	1 salto	P2P	1 salto
	3,2%	97,6%	0%	66,0%	0%	35,6%	—	0%	—	—
CP (%)	↑ 94%		↑ 66%		↑ 36%		ϕ		—	

PDR XBee mesh com 2 saltos comparado à P2P										
	P2P	2 saltos	P2P	2 saltos	P2P	2 saltos	P2P	2 saltos	P2P	2 saltos
		3,2%	—	0%	94,8%	0%	68,8%	—	55,6%	—
CP (%)	—		↑ 95%		↑ 69%		↑ 56%		↑ 32%	

↓ inferior à P2P ↑ superior à P2P ≅ similar à P2P
 ϕ PDR nulo no salto — não realizado CP comparativo % de 1 ou 2 salto(s) com P2P

Taxa de envio do XBee P2P e mesh: a Tabela 68 exhibe as taxas de envio médias dos pacotes para cada cenário analisado do XBee no HITL-05. O desvio padrão foi omitido na

Tabela 67 – Performance de PDR, nas distâncias, da rede XBee *mesh* entre os saltos.

PDR XBee <i>mesh</i> com 2 saltos comparado a 1 salto										
	500 m		750 m		850 m		1000 m		1250 m	
	salto(s)		salto(s)		salto(s)		salto(s)		salto(s)	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
	97,6%	—	66,0%	94,8%	35,6%	68,8%	0%	55,6%	—	32,4%
CP (%)	—		↑ 29%		↑ 33%		↑ 56%		↑ 32%	

↓ inferior a 1 salto ↑ superior a 1 salto ≅ similar a 1 salto ϕ PDR nulo
 — não realizado CP comparativo % de 2 saltos com 1 salto

Tabela 68, pois não ultrapassou 0,01.

Tabela 68 – Taxas de envio XBee (em *Kbps*) para cada cenário P2P e *mesh*, em 21 *dBm*.

	HIL	500m		750m			850m			1000m		1250m
	P2P	P2P	1 salto	P2P	1 salto	2 saltos	P2P	1 salto	2 saltos	1 salto	2 saltos	2 saltos
XBee	44,62	44,60	44,60	44,65	44,64	44,65	44,65	44,64	44,60	44,65	44,65	44,65

LoRa P2P e *mesh*

PDR do LoRa P2P e *mesh*: a Tabela 69 exibe as taxas de entrega do LoRa obtidos nos experimentos HITL-05 P2P com um comparativo de desempenho do PDR em relação à distância anterior, nos SFs e intervalos. Além disso, a comparação na primeira distância, a 500 *m*, foi realizada com os PDRs obtidos nos resultados de bancada (HIL), expostos na subseção 5.3.4.

Por outro lado, a Tabela 70 apresenta os PDRs do LoRa e uma verificação comparativa das performances *mesh* nas distâncias, em relação à P2P, da rede de 1 salto e em seguida com 2 saltos. Outrossim, a Tabela 71 apresenta a mesma análise comparando o desempenho da rede *mesh* de 2 saltos em relação a 1 salto.

Tabela 69 – Performance de PDR, entre as distâncias, da rede LoRa em P2P.

PDR do LoRa P2P comparado ao PDR da distância P2P anterior													
SF	Intervalo	HIL	500 m			750 m		850 m		1000 m		1250 m	
		PDR	PDR	CP	PDR	CP	PDR	CP	PDR	CP	PDR	CP	
7	0,5 s	92,0%	89,2%	↓3%	88,0%	≅	38,4%	↓50%	0%	ϕ	0%	ϕ	
7	1 s	99,6%	98,0%	↓2%	98,8%	≅	69,2%	↓30%	0%	ϕ	0%	ϕ	
9	2 s	99,6%	98,0%	↓2%	98,8%	≅	98,8%	≅	78,8%	↓20%	4,0%	↓75%	

↓ inferior à distância anterior ↑ superior à distância anterior ≅ similar à distância anterior
 ϕ PDR nulo na distância CP comparativo % com à distância anterior

Taxa de envio do LoRa P2P e *mesh*: a Tabela 72 exibe as taxas de envio médias dos pacotes para cada cenário analisado com 232 *bytes*. Os desvios padrão em todos os SF e intervalos não foram exibidos na Tabela 72, pois ficaram abaixo de 0,01.

PDR do LoRa P2P e *mesh*, com *payload* de tamanho reduzido: a Tabela 73 apresenta os PDRs e uma análise comparativa de desempenho do PDR LoRa com 120 *bytes* em relação a 232 *bytes*.

Tabela 70 – Performance de PDR, nas distâncias, da rede LoRa *mesh* em relação à P2P.

PDR LoRa <i>mesh</i> com 1 salto comparado à P2P											
SF	intervalo	500 m		750 m		850 m		1000 m		1250 m	
		P2P	1*	P2P	1*	P2P	1*	P2P	1*	P2P	1*
7	0.5 s	89,2%	99,2%	88,0%	89,6%	38,4%	57,6%	0%	1,6%	0%	0%
CP (%)		↑ 10%		↑ 2%		↑ 19%		↑ 2%		ϕ	
7	1 s	98,0%	100%	98,8%	98,8%	69,2%	88,4%	0%	12,0%	0%	0%
CP (%)		↑ 2%		≈		↑ 19%		↑ 12%		ϕ	
9	2 s	98,0%	99,6%	98,8%	98,0%	98,8%	100%	78,8%	75,6%	4,0%	11,2%
CP (%)		↑ 2%		≈		≈		↓ 3%		↑ 7%	

PDR LoRa <i>mesh</i> com 2 saltos comparado à P2P													
SF	intervalo	P2P		2*		P2P		2*		P2P		2*	
		7	0.5 s	89,2%	—	88,0%	89,6%	38,4%	51,2%	0%	28,4%	0%	0%
CP (%)		—		↑ 2%		↑ 13%		↑ 28%		ϕ			
7	1 s	98,0%	—	98,8%	99,6%	69,2%	85,6%	0%	35,6%	0%	0%		
CP (%)		—		≈		↑ 16%		↑ 36%		ϕ			
9	2 s	98,0%	—	98,8%	95,6%	98,8%	99,2%	78,8%	82,0%	4,0%	38,8%		
CP (%)		—		↓ 3%		≈		↑ 3%		↑ 35%			

↓ inferior à P2P ↑ superior à P2P ≈ similar à P2P
ϕ PDR nulo no salto — não realizado * salto(s) em rede *mesh*
 CP comparativo % de 1 ou 2 salto(s) com P2P

Tabela 71 – Performance de PDR, nas distâncias, da rede LoRa *mesh* entre os saltos.

PDR LoRa <i>mesh</i> com 2 saltos comparado a 1 salto											
SF	intervalo	500 m		750 m		850 m		1000 m		1250 m	
		salto(s)		salto(s)		salto(s)		salto(s)		salto(s)	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
7	0.5 s	99,2%	—	89,6%	89,6%	57,6%	51,2%	1,6%	28,4%	0%	0%
CP (%)		—		≈		↓ 6%		↑ 27%		ϕ	
7	1 s	100%	—	98,8%	99,6%	88,4%	85,6%	12,0%	35,6%	0%	0%
CP (%)		—		≈		↓ 3%		↑ 24%		ϕ	
9	2 s	99,6%	—	98,0%	95,6%	100%	99,2%	75,6%	82,0%	11,2%	38,8%
CP (%)		—		↓ 2%		≈		↑ 6%		↑ 28%	

↓ inferior a 1 salto ↑ superior a 1 salto ≈ similar a 1 salto ϕ PDR nulo
— não realizado CP comparativo % de 2 com 1 salto

Tabela 72 – Taxas de envio LoRa (em *Kbps*) para cada cenário P2P e *mesh*, em 20 *dBm*

SF	intervalo	HIL	500m			750m			850m			1000m			1250m		
		P2P	P2P	1 salto	P2P	1 salto	2 saltos	P2P	1 salto	2 saltos	P2P	1 salto	2 saltos	P2P	1 salto	2 saltos	
7	0,5 s	3,58	3,55	3,54	3,55	3,52	3,55	3,57	3,56	3,55	3,54	3,55	3,54	3,55	3,56	3,55	
7	1 s	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	
9	2 s	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	

Dados entre os rádios

PDR, *mesh*, entre os rádios: a Tabela 74 apresenta os dados unificados de PDR nas distâncias do HITL-05, em rede *mesh*, do XBee, LoRa e uma análise comparativa do LoRa, em seus SFs e intervalos, em relação ao XBee nas mesmas distâncias. Além disso, quanto aos resultados dos testes com pacotes reduzidos a Tabela 75 apresenta os PDRs unificados obtidos, em 1250 m, pelo XBee e LoRa, em P2P e *mesh* com 1 e 2 saltos, e um comparativo do LoRa em relação ao XBee. Além disso, quanto aos resultados dos testes

Tabela 73 – Comparativo de desempenho do PDR LoRa com 120 bytes em relação a 232 bytes, em mesh, a 1250 m.

PDR (%) de 120 bytes comparado a 232 bytes, em 1250m				
SF	intervalo	payload (bytes)	1 salto	2 saltos
7	0,5 s	232	0%	0%
		120	33,2%	53,6%
Comparativo (%)			↑ 33%	↑ 54%
7	1 s	232	0%	0%
		120	81,2%	87,2%
Comparativo (%)			↑ 81%	↑ 87%
9	2 s	232	11,2%	38,8%
		120	98,0%	92,4%
Comparativo (%)			↑ 87%	↑ 54%

↓ inferior ao PDR de 232 bytes ↑ superior ao PDR de 232 bytes ≅ similar ao PDR de 232 bytes
 ϕ PDR nulo — não realizado

com pacotes reduzidos expostos na Figura 53(a), para XBee, e Figura 53(b), para o LoRa, a Tabela 75 apresenta os PDRs e uma análise comparativa, nesse experimento, do LoRa em comparação ao XBee, em 1250 m.

Tabela 74 – Comparativo de desempenho de PDR LoRa em relação ao XBee, nos cenários de distâncias em rede mesh.

PDR (%) LoRa comparado ao XBee (em 1 salto)							
Rádio	SF	intervalo	500m	750m	850m	1000m	1250m
XBee	—	*	97,6%	66%	35,6%	0%	—
LoRa	7	0,5 s	99,2%	89,6%	57,6%	1,6%	0%
Comparativo (%)			↑ 2%	↑ 24%	↑ 22%	↑ 2%	ϕ ϕ
LoRa	7	1 s	100%	98,8%	88,4%	12,0%	0%
Comparativo (%)			↑ 2%	↑ 33%	↑ 53%	↑ 12%	ϕ ϕ
LoRa	9	2 s	99,6%	98,0%	100%	75,6%	11,2%
Comparativo (%)			↑ 2%	↑ 32%	↑ 64%	↑ 76%	↑ 11%
PDR (%) LoRa comparado ao XBee (em 2 saltos)							
XBee	—	*	—	94,8%	68,8%	55,6%	32,4%
LoRa	7	0,5 s	—	89,6%	51,2%	28,4%	0%
Comparativo (%)			—	↓ 5%	↓ 18%	↓ 27%	ϕ
LoRa	7	1 s	—	99,6%	85,6%	35,6%	0%
Comparativo (%)			—	↑ 5%	↑ 17%	↓ 20%	ϕ
LoRa	9	2 s	—	95,6%	99,2%	82,0%	38,8%
Comparativo (%)			—	≅	↑ 30%	↑ 26%	↑ 6%

↓ inferior ao XBee ↑ superior ao XBee ≅ similar ao XBee ϕ LoRa sem PDR
 — não realizado ϕ ϕ ambos os rádios sem PDR — não configurável * sem intervalo

Tabela 75 – Comparativo de desempenho de PDR LoRa em relação ao XBee, em P2P e *mesh*, com pacotes de 120 bytes.

PDR (%) de pacotes de 120 bytes, em 1250m					
Rádio	SF	intervalo	P2P	1 salto	2 saltos
XBee	–	*	0%	0%	43,6%
LoRa	7	0,5 s	0%	33,2%	53,6%
Comparativo (%)			φ φ	↑ 33%	↑ 10%
LoRa	7	1 s	0%	81,2%	87,2%
Comparativo (%)			φ φ	↑ 81%	↑ 44%
LoRa	9	2 s	0%	98,0%	92,4%
Comparativo (%)			φ φ	↑ 98%	↑ 49%

↓ inferior ao XBee
 ↑ superior ao XBee
 ≅ similar ao XBee
 φ LoRa sem PDR
— não realizado
 φ φ ambos os rádios sem PDR
 – não configurável
 * LoRa sem PDR sem intervalo