

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

CLERISSON DOS SANTOS E SILVA

**UM ESTUDO SOBRE TECNOLOGIAS DE  
COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA APLICAÇÕES  
DE IOT EM AGRICULTURA DE PRECISÃO**

NITERÓI

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

CLERISSON DOS SANTOS E SILVA

**UM ESTUDO SOBRE TECNOLOGIAS DE  
COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA APLICAÇÕES  
DE IOT EM AGRICULTURA DE PRECISÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: Sistemas de Computação.

Orientador:  
Diego Gimenez Passos, D.Sc.

NITERÓI

2019

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

S586e Silva, Clerisson dos Santos e  
UM ESTUDO SOBRE TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA  
APLICAÇÕES DE IOT EM AGRICULTURA DE PRECISÃO / Clerisson dos  
Santos e Silva ; Diego Gimenez Passos, orientador. Niterói,  
2019.  
90 p. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Niterói, 2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PGC.2019.m.97802077168>

1. Internet das coisas. 2. Agricultura de precisão. 3.  
Wireless Sensors Networks. 4. Produção intelectual. I.  
Passos, Diego Gimenez, orientador. II. Universidade Federal  
Fluminense. Instituto de Computação. III. Título.

CDD -

Clerisson dos Santos e Silva

UM ESTUDO SOBRE TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA  
APLICAÇÕES DE IOT EM AGRICULTURA DE PRECISÃO

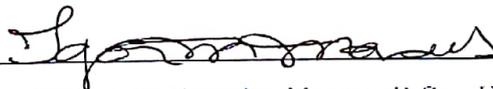
Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: Sistemas de Computação.

Aprovada em junho de 2019.

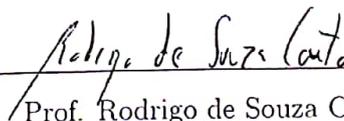
BANCA EXAMINADORA



Prof. Diego Gimenez Passos, D.Sc. - Orientador, UFF



Prof. Igor Monteiro Moraes, D.Sc., UFF



Prof. Rodrigo de Souza Couto, D.Sc., UFRJ



Prof. Marcio Cataldi, D.Sc., UFF

Niterói

2019

*“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita. A força não provém da capacidade física. Provém de uma vontade indomável”. (Mahatma Gandhi)*

*Dedico este trabalho à minha família. À minha esposa Suzana Lucia Silva aos meus filhos Nicolas Santos de Silva e Antony Augusto Santos de Silva, agradecido pelo apoio, compreensão, carinho e especialmente por serem a minha maior motivação. À minha mãe Sebastiana Oliveira dos Santos pelos ensinamentos e pela educação moral e escolar.*

# Agradecimentos

Agradeço ao grande EU SOU por todas as “portas abertas ou fechadas” durante esta jornada. Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso - Campus Cuiabá Cel. Octayde Jorge da Silva pela oportunidade e apoio financeiro. À Universidade Federal Fluminense, seus professores e corpo técnico por contribuírem com os recursos que possibilitaram minha realização, especialmente ao professor orientador Diego Gimenez Passos, D.Sc. por todo ensinamento, atenção e compreensão dedicados à minha pessoa. Aos amigos que ganhei nessa jornada, em especial, Joelias Silva Pinto Júnior por compartilhar seu conhecimento e amizade. Aos amigos, Angela Santana de Oliveira, Edna Sousa de Almeida, Mírian Angelica da Silva, Leandro Martins Moreira dos Santos e Antonio Jorge Birriel, que no trabalho ora foram inspiração, ora foram suporte, às vezes apenas emprestaram seus ombros e ouvidos e se superaram doando seu próprio tempo em meu favor. E, finalmente, agradeço também a todos aqueles que de alguma forma contribuíram.

# Resumo

Apontada como um dos domínios de aplicação da Internet das Coisas (IoT), a agricultura de precisão (AP) utiliza as WSNs (*Wireless Sensors Networks*) como uma das principais formas de prover comunicação de dados nos cenários rurais. Existem diversas opções de tecnologias para se prover conectividade nesses cenários: GPRS (*General Packet Radio Service*), Wi-Fi, 4G e ZigBee são exemplos. Porém, nas áreas rurais as tecnologias de comunicação sem fio estão frequentemente sujeitas a problemas de disponibilidade e confiabilidade. Outras vezes possuem custos proibitivos e/ou são limitadas pelas restrições de *hardware* e/ou de energia das aplicações. Da união dos paradigmas IoT e agricultura de precisão, considerando que a existência da IoT está diretamente ligada à conectividade para qualquer coisa, a qualquer hora, em qualquer lugar, surgem então relevantes problemas relacionados a área de redes de computadores. Tecnologias emergentes estão sendo desenvolvidas para atender as especificidades de comunicação de dados nos diversos cenários. O ZigBee, especificação cuja base está sobre o padrão IEEE 802.15.4, é apontado na literatura acadêmica como o padrão mais popular para prover conectividade nas WSNs aplicadas à agricultura de precisão e o LoRaWAN (*Long Range Wide-area Network*), um padrão aberto descrito pela LoRa *Alliance* que define a arquitetura e os protocolos de comunicação e de acesso ao meio para redes que tem como base a camada PHY (camada física) LoRa (*Long Range*), se destaca como uma das tecnologias de maior potencial para atender os novos requisitos. Assim, o objetivo desta dissertação de mestrado será explorar os recursos e as diferenças destas e outras seis tecnologias aplicadas neste contexto — Bluetooth, Wi-Fi HaLow, Sigfox, NB-IoT (*Narrowband - Internet of Things*), DASH7 e Weightless — em relação às arquiteturas, topologias, taxas de dados, consumo energético, complexidade de instalação, confiabilidade, cobertura de sinal, custo de implantação e segurança. Além disso, este trabalho apresenta simulações computacionais com duas das principais tecnologias (LoRaWAN e ZigBee) utilizando o simulador ns-3. Desta forma, objetiva-se apresentar um comparativo dos resultados alcançados, indicar sugestões de melhorias e contribuir com o estado da arte, auxiliando na escolha da tecnologia de comunicação mais adequada às especificidades dos cenários e usuários de IoT na agricultura de precisão. Pode-se concluir, por exemplo, que para a aplicação simulada, o desempenho do ZigBee atenderia satisfatoriamente requisitos de *uplink* (UL) e *downlink* (DL) com uma alta taxa de entrega de pacotes e um atraso médio aceitável para a maioria das aplicações rurais. Por outro lado, o LoRaWAN apresentou melhores resultados nas transmissões de UL e algumas limitações decorrentes das regulamentações estabelecidas pelos órgãos responsáveis pela padronização dessa tecnologia.

**Palavras-chave:** IoT, agricultura de precisão, WSN.

# Abstract

Pointed as one of the areas of application of Internet of Things (IoT), precision agriculture (PA) uses WSNs (Wireless Sensors Networks) as one of the main ways of providing data communication in rural settings. There are several technology options to provide connectivity in these scenarios: GPRS, Wi-Fi, 4G and ZigBee are examples. However, in rural areas wireless technologies are often subject to availability and reliability problems. Other times they have prohibitive costs and/or are limited by hardware and/or energy constraints of the applications. From the union of the IoT and precision agriculture paradigms, and considering that the existence of IoT is directly linked to connectivity for anything, anytime, anywhere, relevant problems related to the area of computer networks arises. Emerging technologies are being developed to meet the specificities of data communication in the various scenarios. ZigBee, a specification based on the IEEE 802.15.4 standard, is referred to in the academic literature as the most popular standard for providing connectivity in WSNs for precision agriculture, and LoRaWAN (Long Range Wide area Network), an open standard described by the LoRa Alliance that defines the architecture and communication and medium access protocols for networks based on the LoRa PHY layer (Long Range), stands out as one of the technologies that can fulfil most new requirements. Thus, the goal of this master's thesis is to explore the features and the differences of these and other six technologies applied in this context — Bluetooth, Wi-Fi HaLow, Sigfox, NB-IoT, DASH7 and Weightless — with respect to architectures, topologies, data rates, energy consumption, installation complexity, reliability, signal coverage, cost of deployment and security. It also presents simulations results comparing two of the main technologies (LoRaWAN and ZigBee) using the ns-3 simulator. In this way, this work seeks to present a comparison of the achieved results, to suggest improvements and to contribute with the state of the art, helping in the choice of the most appropriate communication technology for the specificities of the IoT scenarios and users in precision agriculture. Based on our results, we conclude, for example, that for the simulated application, the performance of the ZigBee would satisfactorily meet uplink (UL) and downlink (DL) requirements with a high packet delivery rate and an acceptable average delay for most rural applications. On the other hand, LoRaWAN presented better results in UL transmissions, but some limitations resulting from the regulations established by the standards organization.

**Keywords:** IoT, precision agriculture, smart agriculture, WSN.

# Lista de Figuras

2.1	Componentes básicos e aplicações possibilitadas pelo uso da IoT na AP. . .	7
2.2	Uma visão funcional da IoT (adaptado de [58]). . . . .	8
2.3	Arquiteturas WSN e WSAN (adaptado de [111]). . . . .	11
2.4	Tecnologias componentes. . . . .	12
3.1	Topologia híbrida entre uma rede em malha ZigBee e um ponto de acesso por meio de uma topologia estrela. . . . .	18
4.1	Taxa de transmissão <i>versus</i> Alcance das tecnologias (adaptado de [125]). .	21
6.1	Ambiente gráfico do NetAnim que ilustra a topologia da rede. . . . .	42
6.2	Análise de tráfego do ZigBee com o analisador de protocolos de rede <i>Wireshark</i> . . . . .	43
6.3	Representação da rede para o ZigBee ilustrando o encaminhamento e recepção de pacotes nos dezesseis quadrantes. . . . .	47
6.4	Representação da rede LoRaWAN ilustrando o encaminhamento e recepção diretas para os dispositivos finais 13, 71, 102 e 138 $\leftrightarrow$ <i>Gateway</i> . . . . .	48
6.5	Representação das camadas e protocolos dos nós simulados na rede ZigBee.	50
6.6	Representação das camadas e protocolos dos nós simulados na rede LoRaWAN. . . . .	50
6.7	Gráfico de dispersão dos valores médios de atraso (UL) na WSN para o padrão ZigBee. . . . .	55
6.8	Frequência do atraso de UL na rede ZigBee. . . . .	56
6.9	Gráfico de dispersão dos valores médios de atraso (DL) na WSN para o padrão ZigBee. . . . .	57
6.10	Frequência do atraso de DL na rede ZigBee. . . . .	58

6.11	Gráfico de dispersão dos valores médios de atraso (UL) na WSN para o padrão LoRaWAN. . . . .	59
6.12	Frequência do atraso de UL na rede LoRaWAN. . . . .	60
6.13	Gráfico de dispersão dos valores médios de atraso (DL) na WSN para o padrão LoRaWAN. . . . .	61
6.14	Frequência do atraso médio de DL na rede LoRaWAN. . . . .	62
6.15	Gráfico de dispersão comparativo dos valores Médios de Atraso (UL) na WSN para os padrões ZigBee e LoRaWAN. . . . .	63
6.16	Gráfico de dispersão comparativo dos valores médios de atraso (DL) na WSN para os padrões ZigBee e LoRaWAN. . . . .	64
6.17	Atraso médio DL e UL por quadrante para o ZigBee. . . . .	65
6.18	Gráfico de dispersão da percentagem de sucesso na entrega de pacotes UL na WSN para o padrão ZigBee. . . . .	66
6.19	Frequência das taxas de entrega (UL) para o padrão ZigBee. . . . .	67
6.20	Gráfico de dispersão da percentagem de sucesso na entrega de pacotes DL na WSN para o padrão ZigBee. . . . .	68
6.21	Frequência das taxas de entrega (DL) para o padrão ZigBee. . . . .	69
6.22	Gráfico de dispersão da percentagem de sucesso na entrega de pacotes UL na WSN para o padrão LoRaWAN. . . . .	70
6.23	Frequência das taxas de entrega (UL) para o padrão LoRaWAN. . . . .	71
6.24	Gráfico de dispersão da percentagem de sucesso na entrega de pacotes DL na WSN para o padrão LoRaWAN. . . . .	72
6.25	Frequência das taxas de entrega (DL) para o padrão LoRaWAN. . . . .	73
6.26	Gráfico de dispersão comparativo da percentagem de sucesso na entrega de pacotes UL na WSN para os padrões ZigBee e LoRaWAN. . . . .	74
6.27	Gráfico de dispersão comparativo da percentagem de sucesso na entrega de pacotes DL na WSN para os padrões ZigBee e LoRaWAN. . . . .	75

# Lista de Tabelas

4.1	Outras características de desempenho das tecnologias . . . . .	21
5.1	Casos de uso & Requisitos . . . . .	34
5.2	Prós e contras das tecnologias de comunicação . . . . .	38
6.1	Dados que seriam coletados pelos sensores da aplicação em um ambiente real	45
6.2	Parâmetros utilizados na simulação . . . . .	49
6.3	Configuração dos endereços IPv6 da rede ZigBee . . . . .	49
6.4	Configuração dos endereços e identificadores da rede para o padrão LoRaWAN	51

# Lista de Abreviaturas e Siglas

3G	: <i>Third Generation;</i>
3GPP	: <i>Third Generation Partnership Project;</i>
4G	: <i>Fourth Generation;</i>
5G	: <i>Fifth Generation;</i>
6LowPAN	: <i>IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks;</i>
ADR	: <i>Adaptive Data Rate;</i>
ANATEL	: <i>Agência Nacional de Telecomunicações;</i>
AODV	: <i>Ad-hoc On Demand Distance Vector;</i>
AP	: <i>Agricultura de precisão;</i>
API	: <i>Application Programming Interface;</i>
BLE	: <i>Bluetooth Low Energy;</i>
CoAP	: <i>Constrained Application Protocol;</i>
CSMA/CA	: <i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance;</i>
DevAddr	: <i>Device Address;</i>
DL	: <i>Downlink;</i>
DSDV	: <i>Destination-Sequenced Distance-Vector Routing;</i>
EDR	: <i>Enhanced Data Rate;</i>
ETSI	: <i>European Telecommunications Standards Institute;</i>
EUA	: <i>Estados Unidos da América;</i>
FAO	: <i>Food and Agriculture Organization;</i>
FFD	: <i>Full Function Devices;</i>
FLoRa	: <i>Framework for LoRa;</i>
GIS	: <i>Geographic Information System;</i>
GNU	: <i>General Public License;</i>
GPRS	: <i>General Packet Radio Service;</i>
GPS	: <i>Global Positioning System;</i>
GSM	: <i>Global System for Mobile Communications;</i>
GUI	: <i>Graphical User Interface;</i>
GW	: <i>Gateway;</i>

---

LPWAN	: <i>Low Power Wide Area Networks;</i>
LoRaWAN	: <i>Long Range Wide-Area Network;</i>
LoS	: <i>Line of Sight;</i>
LP-Wi-Fi	: <i>Low Power Wi-Fi;</i>
ICMPv6	: <i>Internet Control Message Protocol version 6;</i>
IEC	: <i>International Electrotechnical Commission;</i>
IEEE	: <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers;</i>
IETF	: <i>Internet Engineering Task Force;</i>
IP	: <i>Internet Protocol;</i>
IPv6	: <i>Internet Protocol version 6;</i>
IoT	: <i>Internet of Things;</i>
IMS	: <i>Irrigation Management System;</i>
ISM	: <i>Industrial, Scientific and Medical;</i>
ISO	: <i>International Organization for Standardization;</i>
ITU	: <i>International Telecommunication Union;</i>
LPWAN	: <i>Low Power Wide Area Networks;</i>
LoRa	: <i>Long Range;</i>
LoRaWAN	: <i>Long Range Wide-area Network;</i>
LR-WPAN	: <i>Low-Rate Wireless Personal Area Network;</i>
LTE	: <i>Long Term Evolution;</i>
MAC	: <i>Media Access Control;</i>
MAPA	: <i>Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento;</i>
MCU	: <i>Microcontroller Unit;</i>
MPU	: <i>Microprocessor Unit;</i>
MQTT	: <i>Message Queuing Telemetry Transport;</i>
NAN	: <i>Neighborhood Area Network;</i>
NAV	: <i>Network Avanzato per il Vigneto – Advanced Vineyard Network;</i>
NB-IoT	: <i>Narrowband - Internet of Things;</i>
NS-3	: <i>Network Simulator 3;</i>
NwkID	: <i>Network Identifiers;</i>
NwkAddr	: <i>Network Address;</i>
OSI	: <i>Open System Interconnection;</i>
OTA	: <i>Over-The-Air;</i>
PHY	: <i>Physical Layer;</i>
PSM	: <i>Power Saving Mode;</i>

---

QoS	: <i>Quality of Service;</i>
RAW	: <i>Restricted Access Window;</i>
RC	: <i>Radio Configuration;</i>
RFD	: <i>Reduced Function Devices;</i>
RSS	: <i>Received Signal Strength;</i>
RSSI	: <i>Received Signal Strength Indicator;</i>
SDOs	: <i>Standards Developing Organizations;</i>
SF	: <i>Spreading Factor;</i>
SNR	: <i>Signal-to-Noise Ratio;</i>
TCP	: <i>Transmission Control Protocol;</i>
TIC	: <i>Tecnologias de Informação e Comunicação;</i>
UDP	: <i>User Datagram Protocol;</i>
UE	: <i>União Europeia;</i>
UHF	: <i>Ultra High Frequency;</i>
UL	: <i>Uplink;</i>
UNB	: <i>Ultra NarrowBand;</i>
WiPAM	: <i>Wireless sensor network for Precision Agriculture in Malawi;</i>
WLAN	: <i>Wireless Local Area Network;</i>
WMAN	: <i>Wireless Metropolitan Area Network;</i>
WMSN	: <i>Wireless Multimedia Sensor Network;</i>
WPAN	: <i>Wireless Personal Area Network;</i>
WSAN	: <i>Wireless Sensor and Actuator Network;</i>
WSN	: <i>Wireless Sensors Network;</i>
WWAN	: <i>Wireless Wide Area Network</i>
XML	: <i>Extensible Markup Language;</i>

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos . . . . .	4
1.2	Organização . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Agricultura de precisão e IoT</b>	<b>5</b>
2.1	Agricultura de precisão . . . . .	5
2.2	Internet das Coisas . . . . .	6
2.2.1	Sensoriamento . . . . .	7
2.2.2	Processamento . . . . .	8
2.2.3	Conectividade . . . . .	9
2.2.3.1	<i>Wireless Sensors Networks</i> . . . . .	10
2.2.3.2	<i>Wireless Sensor and Actuator Networks</i> . . . . .	10
2.3	Outras tecnologias utilizadas . . . . .	11
2.3.1	<i>Hardware</i> . . . . .	12
2.3.2	<i>Software</i> . . . . .	13
2.3.3	<i>Middlewares</i> . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Principais arquiteturas e topologias de redes de comunicação sem fio</b>	<b>15</b>
3.1	Arquiteturas . . . . .	15
3.2	Topologias . . . . .	16
3.2.1	Topologia estrela . . . . .	17
3.2.2	Topologia em malha . . . . .	17

<b>4</b>	<b>Tecnologias de comunicação sem fio utilizadas na AP</b>	<b>19</b>
4.1	Curto alcance - <i>Wireless Personal Area Network</i> - WPAN . . . . .	21
4.1.1	Bluetooth . . . . .	22
4.1.2	ZigBee . . . . .	23
4.2	Médio alcance - <i>Wireless Local Area Network</i> - WLAN . . . . .	24
4.3	Longo alcance - <i>Wireless Wide Area Network</i> - WWAN . . . . .	26
4.3.1	LoRaWAN . . . . .	27
4.3.2	Sigfox . . . . .	28
4.3.3	NB-IoT . . . . .	30
4.3.4	DASH7 . . . . .	30
4.3.5	Weightless . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Características e requisitos das aplicações</b>	<b>33</b>
5.1	Casos de Uso . . . . .	34
5.1.1	Controle de Irrigação . . . . .	35
5.1.2	Telemetria . . . . .	35
5.1.3	Fertilização . . . . .	35
5.1.4	Monitoramento de vinhedos . . . . .	36
5.1.5	Rastreabilidade . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Simulações e resultados</b>	<b>39</b>
6.1	O ns-3 . . . . .	40
6.1.1	O módulo <i>Low-Rate Wireless Personal Area Network</i> (LR-WPAN) . . . . .	41
6.1.2	O módulo LoRaWAN . . . . .	41
6.1.3	O NetAnim e o Wireshark . . . . .	42
6.2	Configuração do cenário . . . . .	43
6.2.1	Configurações da simulação no módulo <i>Low-Rate Wireless Personal Area Network</i> . . . . .	47

6.2.2	Configurações da simulação no módulo LoRaWAN no ns-3 . . . . .	49
6.2.3	Limitações . . . . .	51
6.2.3.1	Limitações específicas do módulo LR-WPAN no ns-3 . . . . .	51
6.2.3.2	Limitações específicas do módulo LoRaWAN no ns-3 . . . . .	52
6.3	Parâmetros de avaliação, execução e métricas . . . . .	52
6.3.1	A coleta de dados e os <i>scripts</i> de análise . . . . .	53
6.3.1.1	A Linguagem AWK . . . . .	53
6.4	Resultados . . . . .	54
6.4.1	Atraso Médio . . . . .	54
6.4.2	Taxa de entrega . . . . .	62
6.5	Conclusões finais dos experimentos . . . . .	68
<b>7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>76</b>
	<b>Referências</b>	<b>79</b>

# Capítulo 1

## Introdução

A agricultura é uma atividade produtiva que tem vivenciado importantes transformações nas últimas décadas. O uso de renovadas técnicas de preparo do solo, plantio, acompanhamento da lavoura e colheita constituem a chamada agricultura de precisão (AP), que tem possibilitado aos agricultores automatizar o controle das operações agrícolas e melhorar seus resultados [57]. A crescente apropriação das TICs (Tecnologias de Informação e Comunicação) e a utilização de georreferenciamento e sensoriamento têm permitido aos agricultores coletar, armazenar e processar dados, sendo que os principais avanços nessa área estão na integração e na conectividade das tecnologias impulsionadas pela aproximação entre AP e Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) [101].

Os autores em [106] apresentam nove setores de negócios que podem explorar a IoT e devem necessitar de soluções otimizadas de comunicação de dados para conectar seus dispositivos finais. Um dos setores apontados é o de agricultura. A aproximação da AP, IoT e o uso do *Big Data*, ou seja, o trabalho analítico no grande volume de dados, estão trazendo novos termos a conhecimento, como agricultura 4.0 [36] ou quarta revolução agrícola [75], *smart agriculture* [104] e *smart farming* [137]. Essa nova tendência tem transicionado o conceito da agricultura de precisão para uma agricultura de prescrição onde os agricultores passam a saber antecipadamente o que esperar e como tomar as melhores medidas em um determinado momento para aumentar a qualidade e o rendimento, aumentando assim o lucro. Ao mesmo tempo, essa nova agricultura permite abordar questões ambientais importantes através da redução do uso de pesticidas e da economia de água, assim como aspectos de saúde (e.g., produção de alimentos ecologicamente corretos) [64]. A IoT e o *Big Data*, portanto, se destacam como importantes personagens da revolução ocorrida nessa nova fase.

Os números e expectativas gerados pela agricultura são também bastante expressivos.

No Brasil, por exemplo, o relatório plurianual 2004-2007 do Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento (MAPA) afirmava que o país dispunha de cerca de 388 milhões de hectares (ha) de terras agricultáveis [113]. Desse número, cerca de 100 milhões de hectares ainda não tinham sido explorados. No outro extremo, no relatório *The state of food and agriculture* de 2009, a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (*Food and Agriculture Organization* - FAO) prevê que a população mundial alcançará 8 bilhões de pessoas em 2025 e 9,6 bilhões em 2050 [38]. Sendo assim, segundo este relatório, a produção de alimentos deve aumentar em 70% nesse mesmo período a fim de suprir esta demanda. Alcançar esse objetivo traz vários desafios. A utilização de agrotóxicos, fertilizantes químicos e sementes transgênicas é questão de debates recorrentes quanto à segurança alimentar. O controle de pragas e a utilização de agrotóxicos, além de representarem os maiores gastos da agricultura, são também dois dos maiores problemas quando o assunto é a contaminação dos rios e nascentes. Ademais, estima-se que atualmente a agricultura seja responsável pelo consumo de 70% do abastecimento de água doce do mundo [127].

A AP e o paradigma de IoT apresentam-se então como solução para vários dos problemas supracitados. A União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunication Union* - ITU) associa IoT à conectividade para qualquer coisa, a qualquer hora, em qualquer lugar [53]. Transportada para a realidade da agricultura, alcançar essa visão não é trivial. No Brasil, por exemplo, as propriedades de mais de mil hectares ocupam 45% das áreas rurais [130] e, conseqüentemente, uma das principais formas de prover comunicação de dados no campo é por meio da utilização das redes de comunicação sem fio [14], mais especificamente pelo uso das WSNs e das WSANs (*Wireless Sensor and Actuator Networks*). As WSNs são consideradas redes passivas, compostas por nós sensores distribuídos espacialmente que trabalham cooperativamente para comunicar informações coletadas de uma região monitorada através de enlaces sem fio [102]. As WSANs, por outro lado, são definidas como redes ativas que, além de conter nós com processamento e sensoriamento integrados, podem atuar sobre o ambiente onde estão inseridas com diferentes funcionalidades.

Alguns dos desafios correspondentes à combinação AP e IoT são o posicionamento ótimo de sensores, restrições físicas, além de fatores ambientais como folhagem e chuva. Mas, de acordo com [14], problemas de conectividade devidos às grandes distâncias envolvidas e ao ambiente difícil de propagação são frequentemente considerados os principais empecilhos no desenvolvimento do paradigma IoT no agronegócio. Segundo a Rohde-Schwarz [107], empresa especialista em redes de comunicação sem fio, no ano de 2017,

cerca de 60% dos dispositivos de IoT nos diferentes domínios de aplicação ainda utilizavam redes de comunicação sem fio de segunda geração como o GPRS para trafegar dados a longa distância. No entanto, esta tecnologia não é a mais adequada aos cenários de IoT na AP. Outros estudos apontam, mais especificamente o ZigBee [142], que opera nas chamadas redes de área pessoal sem fio de baixa taxa de transmissão (*Low-Rate Wireless Personal Area Network* - LR-WPAN), como a principal tecnologia de comunicação de dados nas WSNs em aplicações rurais.

Tecnologias emergentes como as *Low Power Wide Area Networks* - LPWAN, da qual faz parte o LoRaWAN [77], têm recebido grande atenção. As LPWANs são um novo grupo de tecnologias que têm complementado as tecnologias celulares, baseadas na utilização de bandas ISM e transmissores de rádio de baixa potência para criar soluções com baixo custo de *hardware* e cobertura ubíqua [121]. É um padrão que opera nas bandas ISM próximas a 868 MHz e 900 MHz nas diversas regiões do globo.

Cada uma das tecnologias discutidas neste trabalho desempenha um papel importante na conexão de dispositivos no campo, pois contempla requisitos que atendem às aplicações de *smart agriculture*, permitido que as aplicações rurais alcancem um baixo consumo de energia e uma maior cobertura, em troca de taxas de transmissão bastante reduzidas. O levantamento realizado por [124] em 2652 trabalhos escritos em inglês publicados entre 2006 e 2016 demonstra o crescente interesse por publicações que discutem diversos dos conceitos apresentados nessa dissertação. No trabalho de [124], os autores se limitam a apresentar de forma quantitativa e qualitativa uma revisão das pesquisas relacionadas as potencialidades dos padrões ZigBee, LoRa e Sigfox para AP. Em [54], são classificados e comparados os protocolos utilizados por estes padrões, as aplicações recentes e as técnicas de eficiência energética relacionadas as melhores tecnologias em termos de consumo energético e distância de comunicação. Assim como em [104] e [92], são apresentadas ainda soluções existentes, plataformas de *hardware* e estudos de caso. A presente dissertação complementa os trabalhos citados, à medida que acrescenta detalhes importantes relativos às características, requisitos, arquiteturas e topologias relacionados com os cenários de AP, bem como outros padrões que também se encaixam neste contexto e não foram abordados pelos autores, como o Wi-Fi HaLow.

## 1.1 Objetivos

Os objetivos gerais deste trabalho são: fornecer ao leitor uma revisão do estado da arte na área das redes de comunicação sem fio aplicadas à agricultura de precisão no contexto de IoT e descrever algumas particularidades relativas à taxa de transmissão, cobertura de sinal e características de oito tecnologias potenciais de curto (*Wireless Personal Area Network* - WPAN), médio (*Wireless Local Area Network* - WLAN) e longo alcance (*Wireless Wide Area Network* - WWAN). Como objetivo principal, visando avaliar o comportamento e desempenho de dois padrões distintos de curto e longo alcance em um cenário idêntico, são realizadas também simulações e análises comparativas para o ZigBee e o LoRaWAN. Estas tecnologias se destacam nos cenários de AP discutidos na literatura, sendo consideradas por [54], [92], [79], [129] e [76] os padrões mais adequados para aplicações na AP. O primeiro padrão possui um expressivo número de citações e o segundo destaca-se como a mais promissora das recentes tecnologias, principalmente por fornecer longo alcance e baixo consumo de energia utilizando-se componentes de código aberto. O conhecimento obtido e avaliação dos padrões estudados na presente dissertação propiciarão aos interessados um auxílio na tomada de decisão para adoção da tecnologia que seja mais adequada às especificidades dos diversos cenários neste importante domínio de aplicação da IoT.

## 1.2 Organização

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. O próximo capítulo fornece uma visão geral sobre a AP e a IoT, descrevendo suas relações e outras tecnologias utilizadas. No Capítulo 3 são apresentadas as principais arquiteturas e topologias de rede sem fio adequadas à AP, discutindo-se suas características, funcionalidades e classificações. A complexidade que envolve as várias tecnologias de comunicação sem fio, incluindo questões de padronização e detalhes técnicos que potencializam as aplicações em AP são discutidos no Capítulo 4. No Capítulo 5 estão descritos as características e requisitos de infraestrutura de rede demandados pelas aplicações, bem como os casos de uso beneficiados pelas redes de comunicação sem fio. No Capítulo 6 são apresentados os resultados das simulações realizadas para o padrão ZigBee e para o padrão LoRaWAN. O capítulo 7 conclui a dissertação discutindo ainda alguns dos desafios e questões em aberto dessa área.

# Capítulo 2

## Agricultura de precisão e IoT

### 2.1 Agricultura de precisão

A agricultura de precisão é um conjunto de tecnologias destinadas ao manejo de solos, culturas e insumos, que visa um melhor e mais detalhado gerenciamento do sistema de produção agrícola em todas as etapas, desde a semeadura até a colheita [51]. Nesse processo, são utilizadas tecnologias de georreferenciamento e posicionamento como o GIS (*Geographic Information System*) e o GPS (*Global Positioning System*) aplicadas ao processo produtivo agrícola de forma que o manejo dos insumos seja realizado em taxas variáveis. Ou seja, na AP a aplicação de fertilizantes e corretivos é realizada de acordo com um mapeamento detalhado dos fatores de produção. Esse mapeamento considera, por exemplo, as variações espaciais e temporais mapeadas em termos de tipo e fertilidade do solo, disponibilidade de água, níveis de infestação de pragas, entre outros.

Nesse contexto, a coleta de uma grande quantidade de dados passa a ser parte das técnicas de manejo. Exemplos de dados coletados incluem medições de temperatura, umidade, condutividade elétrica do solo e de nível de produtividade durante a colheita [51]. Um dos ingredientes chave para o sucesso da AP é justamente a utilização correta dos dados coletados que são posteriormente transformados em informação.

Dentro do contexto da AP, de acordo com [91], podemos resumir quatro etapas do processo produtivo perfeitamente integradas e contínuas, que podem ser caracterizadas da seguinte maneira:

- Preparação do Solo: etapa onde são realizadas análises em busca das causas das variações de produtividade. Nesta fase, também são aplicados no solo corretivos e fertilizantes a taxas variáveis.

- Plantio: etapa realizada a taxas variáveis de acordo com o perfil produtivo mapeado.
- Acompanhamento da lavoura: etapa onde são realizadas aplicações localizadas de defensivos agrícolas e o mapeamento de pragas e doenças.
- Colheita: etapa realizada com auxílio de máquinas dotadas de sensores de produtividade que servem para gerar os mapas de produtividade utilizados na etapa inicial.

Grande parte do sucesso alcançado pela AP reside também na sua capacidade de promover e agregar diversas plataformas de *hardware* e *software*, bem como tecnologias de automação que utilizam principalmente o GPS e o GIS. Mesmo antes da conceitualização da IoT, as redes de comunicação sem fio já vinham sendo naturalmente inseridas nesse contexto, favorecendo a expansão e estruturação da base de conhecimento acerca das culturas. Pode-se citar, por exemplo, a agregação de dados geoespaciais e previsão do tempo. Desta maneira, formou-se um cenário propício para junção da AP com a IoT, possibilitando ainda mais autonomia, monitoramento e precisão no processo de produção agrícola.

Embora tenham enfoque no aumento de produtividade e gestão eficiente, os benefícios alcançados acabam propiciando ainda a sustentabilidade ambiental. Isso porque auxiliam na redução do uso de fertilizantes e insumos que, com a ajuda da tecnologia, passam a ser aplicados de forma mais seletiva.

## 2.2 Internet das Coisas

Dentre as muitas definições encontradas na literatura para Internet das Coisas, destaca-se a conceitualização fornecida por [63] que caracteriza IoT como uma infraestrutura de rede global dinâmica com capacidade de autoconfiguração baseada em padrões e protocolos de comunicação interoperáveis onde “coisas” virtuais e físicas têm identidades, atributos físicos, personalidades virtuais, usam interfaces inteligentes e são perfeitamente integradas a uma rede de informações.

Uma outra visão para IoT é fornecida pelas empresas de desenvolvimento de microprocessadores Freescale e ARM. Estas empresas apresentam como elementos participantes da sustentação tecnológica do “ecossistema” de IoT o sensoriamento, o processamento e a conectividade [58]. Como ilustra a Figura 2.1, é necessário relacionar estes três elementos para que serviços como irrigação e fertilização inteligente e monitoramento de vinhedos

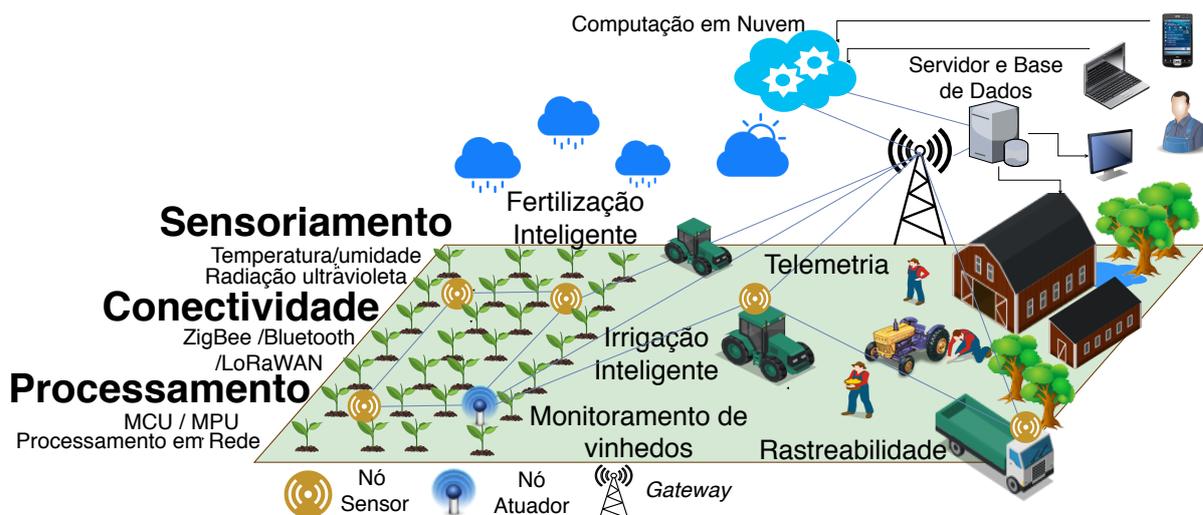


Figura 2.1: Componentes básicos e aplicações possibilitadas pelo uso da IoT na AP.

sejam possíveis. Tarefas de gerenciamento e decisão baseadas em dados podem ser aprimoradas pelo conhecimento do contexto, situação e localização [137]. Um dos fatores de destaque representado nessa figura é o monitoramento em tempo real alcançado com o uso da telemetria. Utilizada principalmente em colheitadeiras, a telemetria propicia o acompanhamento de todo o processo de produção, por meio da coleta de dados na etapa de sensoriamento, utilizando a transmissão de dados na etapa de conectividade até o processamento, servindo, por exemplo, para avaliar e gerenciar o desempenho, a velocidade de trabalho e o consumo de combustível em máquinas agrícolas, além de controlar os sinais de desgaste, proporcionando economia a longo prazo.

Boa parte das pesquisas realizadas atualmente em IoT buscam resolver desafios envolvendo os três elementos e suas relações com a interoperabilidade, heterogeneidade, restrições de memória e questões de segurança decorrentes da inovação [104]. Em uma visão funcional, a Figura 2.2 complementa a anterior, demonstrando como o sensoriamento, processamento e conectividade estão inseridos no contexto de IoT, sendo interfaceados por processos que dependem dos requisitos de implantação e das aplicações adotadas.

### 2.2.1 Sensoriamento

Nós sensores (i.e., dispositivos de comunicação munidos de sensores) são parte integrante da AP, sendo responsáveis por realizar o monitoramento, medições e a coleta de dados [103]. Nas WSAWs, os sensores atuam em conjunto com atuadores, sendo que estes últimos são programados para reagir aos dados coletados pelos primeiros [129].

O funcionamento dos sensores é baseado na detecção e respostas a sinais elétricos ou

ópticos. Um sensor basicamente realiza a conversão de parâmetros físicos (por exemplo, temperatura, umidade) em sinais que podem ser medidos eletricamente [139]. Em [129] e [92] são apresentados vários sensores que vêm sendo utilizados no domínio da AP e que utilizam o princípio no sensoriamento de solo, folhas, plantas e variações meteorológicas. Destaques são dados para os sensores de temperatura, umidade, pressão, fluxo, nível, velocidade e direção do vento.

Os nós sensores são elementos fundamentais de um sistema de IoT e a precisão nas medições é uma característica determinante das diversas aplicações, considerando que a calibragem executada nesses componentes reflete a acurácia dos resultados [81].

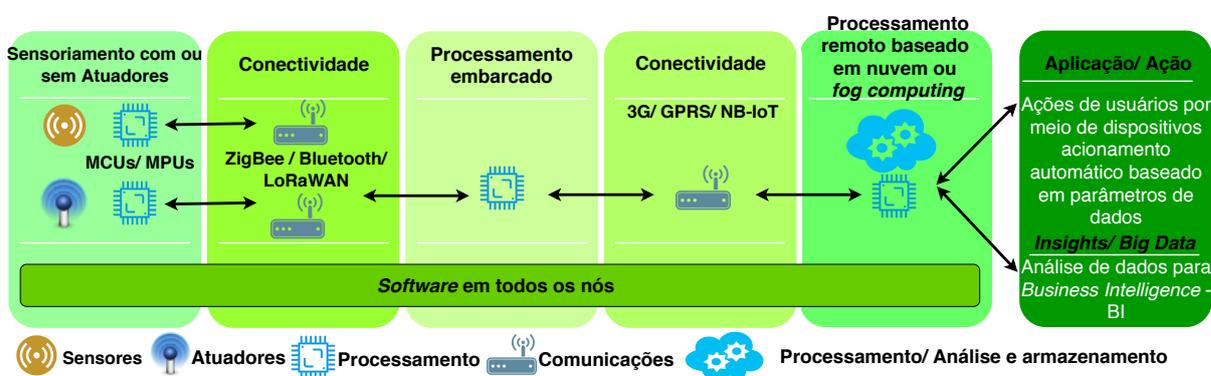


Figura 2.2: Uma visão funcional da IoT (adaptado de [58]).

### 2.2.2 Processamento

Nos cenários de IoT, os dados costumam ser trocados entre dispositivos e trafegados nas redes de comunicação sem fio de forma que sejam processados localmente por MCUs (*Microcontroller Unit*) ou MPUs (*Microprocessor Unit*), ou enviados para servidores centralizados ou aplicações baseadas em nuvem [58]. Entretanto, dispositivos de IoT geralmente possuem, entre outras restrições, capacidades limitadas de armazenamento e processamento. Desta forma, a computação em nuvem (conceito que “empurra” a inteligência e o processamento para um nível externo à área local da arquitetura da rede, processando dados fora do domínio da rede de origem) e o *Fog Computing* (conceito que “traz” a inteligência e o processamento para o nível da área local da arquitetura da rede, processando dados em um nó próximo da rede de origem) são considerados como opções complementares e/ou substitutas para o processamento de dados em ambientes de IoT [18].

Espera-se que no futuro próximo os sensores utilizados pela IoT na AP sejam respon-

sáveis pela produção de grandes bases dados para processamento, constituindo, portanto, um cenário de *Big Data* específico para AP. Esse volume de informação deverá ser processado por aplicações de mineração de dados, sistemas de reconhecimento de imagem e visualização, aquisição e mineração inteligente em rede, vigilância por vídeo, estatísticas, informações de sensoriamento e informações meteorológicas [73]. Faz-se necessária, portanto, a implementação de redes de comunicação sem fio que suportem o escoamento eficiente desses dados a partir dos sensores até os elementos processadores.

### 2.2.3 Conectividade

Segundo [103], os protocolos de comunicação formam a espinha dorsal dos sistemas IoT e permitem a conectividade da rede e o acoplamento das aplicações. Nesse contexto, as redes de comunicação sem fio têm um papel crucial frente à grande variedade de aplicações e dispositivos que devem gerar requisitos de computação e conectividade diversos. Em alguns casos de uso, os dispositivos envolvidos podem exigir comunicação de curto alcance, enquanto que em outros tipos de aplicações, como no caso mais geral da IoT na agricultura, uma cobertura ubíqua e ampla será demandada. As conexões da IoT devem exigir ainda tecnologias de conectividade heterogêneas que ofereçam diferentes níveis de otimização para atender a diferentes necessidades.

Além do ZigBee e do LoRaWAN, são ainda discutidas neste trabalho algumas características relevantes das tecnologias de comunicação sem fio *Bluetooth* (IEEE 802.15.1) [17], Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah) [136], Sigfox [118], NB-IoT [126], DASH7 [31] e Weightless [134]. A razão da escolha destas tecnologias é a capacidade destes padrões em atender aos requisitos e restrições de energia e poder de processamento limitados dos dispositivos de IoT na AP. As tecnologias citadas atendem aos requisitos da IoT na AP utilizando diferentes bandas, técnicas de modulação, mecanismos de gerenciamento de energia e protocolos de acesso ao meio.

O *Bluetooth* é um padrão de comunicação sem fio destinado a conectar diferentes dispositivos fixos, portáteis e móveis e transferir dados em curtas distâncias. O Sigfox é uma tecnologia proprietária que emprega rádios que utilizam larguras de banda muito estreitas UNB (*Ultra NarrowBand*) para permitir uma relação sinal-ruído aceitável no recebimento de sinais relativamente fracos. O Wi-Fi HaLow, também chamado de LP-Wi-Fi (*Low-Power Wi-Fi*), é um padrão que utiliza novos formatos de quadros mais curtos, mecanismos avançados de controle de acesso ao meio e de gerenciamento de energia. Foi desenvolvido para operar na faixa dos 900 MHz e outras frequências abaixo do 1 GHz,

podendo alcançar taxas de dados e distâncias superiores ao Wi-Fi. O NB-IoT é uma variante em desenvolvimento do LTE (*Long Term Evolution*) que visa atender aplicações LPWAN utilizando as faixas de frequência licenciadas 2530-2540 MHz, 2650-2660 MHz e 847-854.5 MHz. O DASH7 é um protocolo de comunicação sem fio baseado no padrão ISO/IEC 18000-7 que utiliza frequências de 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz permitindo alcances de até 10 km, com taxas de transmissão de 28 kb/s a 200 kb/s e baixa latência. O Weightless, compreende três versões de um mesmo padrão LPWAN aberto que opera no chamado espaço branco de TV e no espectro ISM sub-1 GHz com frequências nas faixas de 138 MHz, 433 MHz, 470 MHz, 780 MHz, 868 MHz, 915 MHz e 923 MHz. Todas estas tecnologias podem compor as WSNs e WSANs como paradigmas fundamentais para a conectividade na IoT. Outros detalhes sobre estas tecnologias serão discutidos no Capítulo 4.

### **2.2.3.1 *Wireless Sensors Networks***

Nas WSNs, o trabalho cooperativo que envolve os nós sensores considera ainda a utilização dos nós sorvedouros, que são aqueles responsáveis por reunir e repassar a informações coletadas nas regiões monitoradas. Dependendo do tipo de implantação, o nó sorvedouro pode ser um *gateway* (GW), que interconecta a WSN a uma rede externa, como a Internet pública. Para certos autores, as WSNs são consideradas redes passivas onde os nós sensores simplesmente registram os dados e os enviam para um ou mais sorvedouros para processamento posterior. Esses por sua vez, podem emitir novos comandos [111]. As WSNs têm sido amplamente utilizadas em todas estas etapas da AP. Domínios de aplicação incluem análise do solo, detecção de pragas e doenças, geração de mapas de produtividade, irrigação e monitoramento climático e ambiental.

### **2.2.3.2 *Wireless Sensor and Actuator Networks***

Nas WSANs, enquanto alguns nós atuam como sensores, um tipo adicional de componente, o atuador (um transdutor que converte um sinal elétrico em uma ação física [111]), é o item capaz de ampliar a aplicabilidade das WSNs [129] e caracterizar as WSANs. Sensores e atuadores podem estar embarcados em um único nó chamado mote [54]. Nas aplicações de AP, os atuadores podem estar inseridos em diferentes dispositivos, como válvulas de água, aquecedores, umidificadores, aparatos de iluminação e reguladores de consumo de energia. As WSANs têm ganhado atenção nos últimos anos principalmente no domínio dos controles de irrigação [49], monitoramento e automação do controle em parâmetros

ambientais crucias (umidade, temperatura e luminosidade) em estufas [109].

A Figura 2.3, com base em [111], ilustra as diferenças entre WSNs e WSANs. Na ilustração da WSN, além dos nós sensores, são destacados o nó sorvedouro e o GW. Nesse exemplo hipotético, esses são nós distintos. Na ilustração da WSAN, são destacados os nós atuadores responsáveis por se comunicar com os nós sensores e enviar os dados coletados através do meio sem fio para o nó sorvedouro. Por sua vez, a exemplo do que ocorre na implementação escolhida em [49], o sorvedouro pode utilizar a rede celular para enviar os dados a um centro de monitoramento e controle remoto com suporte a decisão.

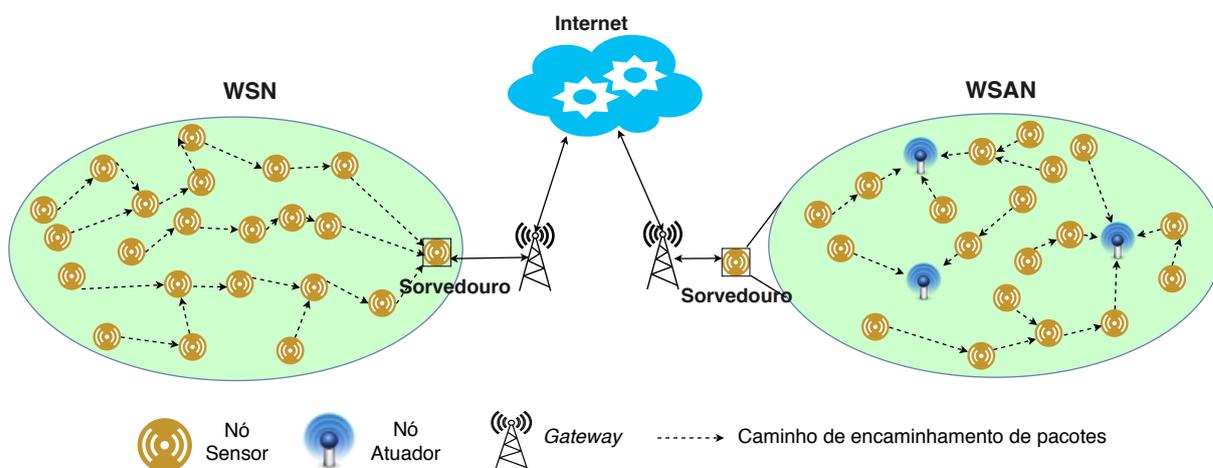


Figura 2.3: Arquiteturas WSN e WSAN (adaptado de [111]).

Grande parte dos padrões de comunicação faz uso de enlaces de rádio operando na banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) que oferece uma comunicação livre de licença na maioria dos países. Conforme será discutido mais adiante, as bandas não licenciadas, por esta característica, são amplamente exploradas pelas tecnologias de comunicação sem fio emergentes em IoT em busca de melhor desempenho em termos de consumo energético, distribuição de tarefas e uso de recursos neste tipo rede.

## 2.3 Outras tecnologias utilizadas

As aplicações de IoT utilizam uma vasta gama de tecnologias de *hardware* e *software*, conforme ilustra a Figura 2.4. Apesar de existirem produtos de rede de sensores e soluções proprietárias completas, muitas soluções são baseadas em *hardware* genérico e *software* de código aberto. Estas plataformas variam de acordo com os domínios de aplicação, embora alguns elementos se destaquem por serem utilizados recorrentemente. Critérios como viabilidade técnica e flexibilidade costumam ser decisivos para escolha [78]. Outro

componente fundamental para a construção e implantação das aplicações de IoT, em especial as que envolvem tecnologias de comunicação sem fio, são os *middlewares* [9].



Figura 2.4: Tecnologias componentes.

### 2.3.1 Hardware

Em [128], os autores apresentam um resumo de diversas plataformas de *hardware* embarcado disponíveis para aplicações de IoT em AP, identificando características como capacidade de memória, unidade de processamento e transceptores utilizados. Em [92], além da comparação entre plataformas, são apresentados também diferentes sensores comerciais aplicados nesse cenário. Os autores dividem estes sensores em 3 categorias: de medição de solo, de ambiente e de plantas. Segundo os autores, o posicionamento heterogêneo dos sensores é o que garante a inteligência e melhora a tomada de decisão. Em [104], são classificadas diversas plataformas muito utilizadas como protótipos em diversos trabalhos, que podem fazer o papel de interface de processamento e/ou ponto de acesso. Uma das soluções apresentadas por [104] é a plataforma de prototipagem eletrônica de *hardware* livre Arduino, empregada em aplicações desenvolvidas por [101] e [87]. Outros exemplos de *hardware* muito utilizados em aplicações de mesma finalidade incluem o *Raspberry Pi* e o *Libelium Plug and Sense*, ilustrados na Figura 2.4. O *Raspberry Pi* é uma plataforma de hardware barata para desenvolvimento de projetos de computação embarcada, também utilizado por [101]. O *Libelium Plug and Sense* é um *hardware* proprietário, utilizado em [68] e [66] que possui uma série sensores, módulos de rádio e APIs (*Application Programming Interface*) desenvolvidos especificamente para aplicações rurais.

Um exemplo de protótipo que se tornou uma aplicação comercial é o Yuktix. Desen-

volvido por [119], esse dispositivo é capaz de conectar vários sensores e possui diversas opções de conexão sem fio incluindo GPRS, ZigBee, LoRaWAN e Wi-Fi. Conta ainda com armazenamento e processamento local podendo atender aplicações de prevenção de doenças de culturas, estufas inteligentes, monitoramento pós-colheita e gerenciamento remoto de produtos agrícolas. Grandes fabricantes de máquinas agrícolas, como tratores, pulverizadoras e colheitadeiras, têm, da mesma forma, promovido uma corrida pelo desenvolvimento de melhores produtos e serviços, oferecendo diversas ferramentas e equipamentos para apoiar IoT na agricultura.

Outros itens importantes de *hardware* frequentemente encontrados em projetos de WSNs são: módulos de bateria, painéis solares utilizados para fornecer energia para os dispositivos em campo, microcontroladores, rádios e atuadores. Projetos que detalham o uso e descrevem alguns destes itens estão descritos em [76], [49], [78] e [141].

### 2.3.2 *Software*

Vários sistemas operacionais têm sido desenvolvidos para suportar a programação em WSNs. Exemplos incluem o TinyOS, Contiki, MantisOS e LiteOS [78]. O sistema operacional embarcado é o núcleo do *software* dos nós nas WSNs. Segundo [141], é ele quem gerencia os recursos de *software* e *hardware*, dando suporte a tarefas concorrentes e fornecendo a interface de usuário e a plataforma de programação. Vale destacar que sistemas operacionais específicos para redes de sensores são centrados na comunicação sem fio e são necessários para atender as restrições de memória, energia e segurança dos dispositivos.

Como apresentado em [101], [86] e [92], muitos dos *softwares* desenvolvidos para aplicações dessa área fornecem plataformas de armazenamento, análise e apresentação de dados, geralmente com uma interface gráfica de visualização de informações para o usuário (*Graphical User Interface* - GUI). A Figura 2.4 apresenta o *SMARTFARM* [35], um produto da empresa DVM dotado de funcionalidades que incluem: recursos de análise de dados em tempo real, monitoramento e gravação das medições dos sensores. Esta solução oferece suporte a um sistema inteligente de apoio à decisão que considera dados fornecidos pelos usuários, bem como os resultados de modelos especiais e sistemas especialistas que geram notificações e alertas em tempo real (via SMS e aplicativos de *smartphones*, por exemplo).

A escolha adequada entre os recentes protocolos de infraestrutura, como o 6LoWPAN (*IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*) [50], e os protocolos de transporte de dados, como o MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) e o CoAP

(*Constrained Application Protocol*) são também fatores decisivos no desenvolvimento de aplicativos, pois, segundo [78], estes prometem melhorar a interoperabilidade e programabilidade das redes de sensores conectadas à IoT.

### 2.3.3 *Middlewares*

Como afirmam os autores em [9], é difícil definir e impor um padrão comum em meio à diversidade de *hardware* e *software* encontrados nos domínios da IoT. Aplicações de diversos domínios exigem uma camada de abstração/ adaptação. Os *middlewares* atuam então como uma camada de ligação que une os componentes heterogêneos. Eles são os responsáveis por fornecer uma API para comunicação entre as camadas mais baixas e os serviços requeridos pelas aplicações, escondendo detalhes desnecessários. Dessa forma, diferentes protocolos, plataformas, arquiteturas, ambientes e sistemas operacionais podem operar em conjunto sem que interfiram no processo final.

Existem atualmente plataformas de *middleware* bem estabelecidas, de código aberto e que possuem diversos casos de uso na agricultura, como o OpenIoT [94] e outras proprietárias como o Carriots [82], Xively [120] e o Kaa [56], ilustrados na Figura 2.4. Outras plataformas foram levantadas e avaliadas por [55]. Todas essas plataformas preveem funcionalidades e soluções específicas para *smart agriculture*, incluindo casos de uso.

*Middlewares* multiuso como o Kaa e o Xively são chamados também de plataformas de nuvem IoT (*IoT Cloud Platforms*). Além de realizarem as tarefas típicas de um *middleware*, eles contam com elementos que garantem a segurança e integridade dos dados, suportam o balanceamento de carga entre nós, gerenciamento de servidores ativos e análises preditivas. Ou seja, esse tipo de tecnologia favorece também o desenvolvimento das aplicações à medida que propicia código adicional mínimo por parte dos desenvolvedores.

# Capítulo 3

## Principais arquiteturas e topologias de redes de comunicação sem fio

Para [12], a primeira decisão a se considerar na implantação de uma WSN diz respeito a qual será a arquitetura da rede, incluindo, entre outras questões, os protocolos de comunicação e a topologia a serem utilizados no projeto. Para [77], a arquitetura e os protocolos de rede são os maiores influenciadores na determinação da vida útil da bateria de um nó, na capacidade da rede, na qualidade do serviço, na segurança e na variedade de aplicações atendidas pela rede. Outros fatores que podem influenciar os projetos de WSNs e devem ser bem analisados são: o ambiente de operação, a tolerância a falhas, a escalabilidade, as restrições de *hardware*, os meios de transmissão e o consumo de energia da rede. Entende-se, portanto, que encontrar uma arquitetura escalável, flexível, segura, econômica e capaz de lidar com o complexo cenário de IoT é um dos principais obstáculos à adoção rápida da IoT.

Protocolos de comunicação nativamente *ad-hoc* favorecem o planejamento topológico em WSNs, um quesito muito importante das aplicações de AP. Frequentemente, neste tipo de aplicação a posição dos nós sensores não costuma variar e o planejamento da organização dos nós pode, por exemplo, trazer melhor qualidade de serviço. Tal planejamento pode ter também um impacto direto nos custos de implantação, reduzindo o número de dispositivos utilizados e aumentando a eficiência energética do sistema [54].

### 3.1 Arquiteturas

Embora deva-se considerar certas particularidades, a arquitetura de uma WSN para AP costuma ser semelhante àquelas utilizadas em outras aplicações, como as de controle

industrial, automação predial e de sistemas de segurança. Algumas classificações das arquiteturas das redes de comunicação sem fio são apresentadas por [111] e [92]. Baseando-se no movimento dos dispositivos existentes nas WSNs, os autores em [92] analisaram os tipos de arquitetura WSN utilizadas na AP classificando-as em 3 categorias:

- Arquitetura estacionária: nós sensores são implantados em uma posição fixa e, durante o funcionamento da aplicação, não alteram sua posição.
- Arquitetura móvel: dispositivos alteram sua posição com o tempo.
- Arquitetura híbrida: nós estacionários e móveis estão presentes.

Para as WSANs, os autores em [111], baseando-se no modo de operação dos dispositivos, dividem a arquitetura em 2 categorias.

- Totalmente automatizada: nesta arquitetura os nós atuadores coordenam-se entre si e decidem um plano de ação baseando-se nos dados detectados.
- Semi-automatizada: os nós sensores encaminham seus dados para atuadores através de um sorvedouro.

Em [59], considerando o contexto de IoT e computação em nuvem, os autores propõem uma arquitetura construída e testada para ser adequada a diferentes aplicações de agricultura de precisão. A arquitetura idealizada é composta por três camadas: uma camada de *front-end* que coleta a informação ambiental e aplica as ações agrícolas necessárias; uma camada com o GW que conecta a camada de *front-end* à Internet e uma camada de *back-end* em que ocorre o armazenamento e o processamento de dados.

## 3.2 Topologias

As topologias nas redes de comunicação sem fio são em sua natureza dinâmicas, estando sujeitas a falhas nos nós e degradação do desempenho, principalmente naquelas implantações em grande escala, em condições ambientais difíceis ou com presença de mobilidade. A exemplo do que é demonstrado em [7], duas se destacam nas diversas aplicações, sendo citadas em vários trabalhos: a topologia estrela e a topologia em malha. Ambas as topologias têm seus desafios, vantagens e desvantagens.

### 3.2.1 Topologia estrela

Nesta configuração todos os nós se comunicam com uma estação base, não havendo nenhum tipo de comunicação não intermediada por ela. Neste tipo de topologia, a área de cobertura fica limitada ao alcance de comunicação da estação base. A topologia em estrela é preferida quando a área de cobertura é pequena e baixa latência é requerida pela aplicação [102]. Segundo [106], boa parte das novas tecnologias LPWAN de baixa potência utiliza a topologia em estrela. O autor destaca ainda que, em relação à topologia em malha, a combinação topologia em estrela e LPWAN forneceria um melhor desempenho no consumo de energia, visto que, em uma rede em malha, boa parte da energia seria desperdiçada por conta das retransmissões necessárias ao encaminhamento do tráfego.

Uma das desvantagens da topologia estrela, no entanto, ocorre quando um ponto de acesso e um determinado nó estão ligados por um enlace muito longo. Nesse caso, mais energia é consumida para enviar uma mensagem, visto que, também podem ocorrer retransmissões.

### 3.2.2 Topologia em malha

Nesta configuração, os nós atuam como roteadores, encaminhando pacotes de outros nós da rede. A comunicação ocorre entre os nós e o GW (que conecta à rede externa) ou entre os próprios nós. Neste modo de operação, obstáculos que impeçam a comunicação podem ser contornados através dos nós intermediários, ampliando-se assim a confiabilidade da rede. Múltiplos caminhos podem ser construídos dinamicamente para levar os dados de uma extremidade à outra da rede e a área de cobertura pode ser ampliada. Padrões de comunicação de curto e médio alcance como o ZigBee podem se aproveitar desta característica para ampliar o alcance de comunicação em áreas rurais extensas. Esta topologia é adequada, por exemplo, para uma grande área de cobertura onde a latência não seja um fator crítico, como demonstra [102]. Graças a protocolos e algoritmos específicos, a topologia em malha propicia às redes de comunicação sem fio a capacidade de auto-organização, roteamento e cooperação, ao custo de uma maior complexidade na implementação. A abordagem de gerenciamento auto-organizado dos nós pode melhorar consideravelmente a robustez da rede, resultando em uma tecnologia de rede em malha inteligente [52].

Os autores em [5] afirmam que uma das grandes vantagens da topologia em malha é a possibilidade de se implantar redes de grande abrangência com baixo custo. Como des-

vantagem, o autor de [106] aponta para a possibilidade de ocorrência de congestionamento quando o tráfego é encaminhado através de vários saltos em direção a um nó sorvedouro, devido à rápida queda de desempenho da comunicação ao se aumentar o número de saltos. Acrescenta-se a esta o fato de que a utilização desta topologia para cobrir grandes áreas pode acarretar custos desnecessários, pois pode ser necessário adicionar nós repetidores apenas para garantir que a rede atinja pontos mais distantes.

As topologias podem ser combinadas formando uma topologia híbrida com a vantagem de aliar o baixo consumo de energia da topologia estrela com a capacidade de cobrir grandes áreas da topologia em malha (*ad hoc*). Por exemplo, este tipo de topologia pode ser utilizado em aplicações agrícolas onde vários sensores são conectados em malha a um nó sorvedouro que, por sua vez, se conecta a um ponto de acesso operando como um GW responsável por completar a ligação com a Internet pública. A ilustração deste tipo de topologia é mostrada na Figura 3.1.

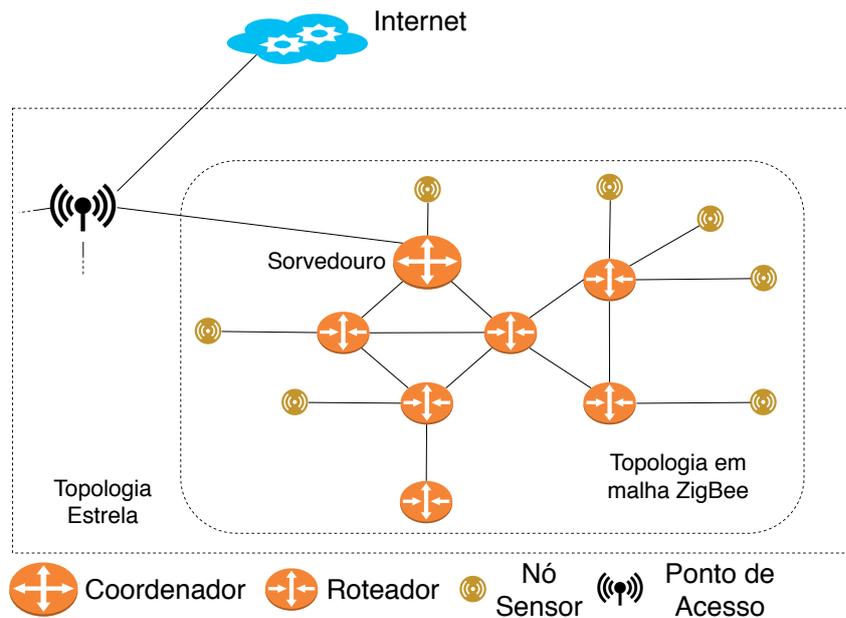


Figura 3.1: Topologia híbrida entre uma rede em malha ZigBee e um ponto de acesso por meio de uma topologia estrela.

# Capítulo 4

## Tecnologias de comunicação sem fio utilizadas na AP

Na literatura, é possível encontrar sugestões de diversas tecnologias de comunicação sem fio de diferentes características para aplicações de IoT em agricultura de precisão. Em geral, o uso de tecnologias de comunicação mais sofisticadas (em particular, com maiores taxas de transmissão e alcance) está associada ao emprego de nós com maiores capacidades de *hardware*, incluindo armazenamento, processamento e energia. Tecnologias como GPRS e Wi-Fi (e.g., IEEE 802.11a/b/g/n/ac) não foram originalmente desenvolvidas para atender aplicações de medição, comunicação e controle da IoT, mas são utilizadas para esse fim, ainda que apresentem diversas limitações. Outras tecnologias como LoRaWAN, Sigfox, Wi-Fi HaLow, DASH7 são projetadas para atender aos requisitos específicos de comunicação neste novo cenário. Entretanto, elas também possuem limitações e especificidades.

A padronização destas tecnologias está sob responsabilidade de diversas alianças industriais e organizações de desenvolvimento de padrões (*Standards Developing Organizations - SDOs*) como ZigBee Alliance, LoRa Alliance, DASH7 Alliance, WEIGHTLESS-SIG, IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) e IETF (*Internet Engineering Task Force*). Esses e outros órgãos têm se empenhado para desenvolver soluções de baixa potência, unificar interfaces, protocolos e serviços para que vários sistemas possam ser interligados na IoT.

Mesmo havendo um número elevado de tecnologias competidoras diferentes, algumas características são comuns. Exemplos incluem o uso do 6LoWPAN, de mecanismos “*low duty cycle*” e de bandas sub-1 GHz [106]. O 6LoWPAN padroniza uma camada de adaptação entre a camada de rede e as camadas mais baixas da pilha de protocolos do IEEE

802.15.4, permitindo assim o uso do IPv6. O *low duty cycle* pode ser definido como a proporção de tempo que um dispositivo de rede sem fio transmite um sinal em relação a um ciclo de tempo “ligado/ desligado”. Além de ser utilizado em transceptores e outros componentes de *hardware* para reduzir o consumo de energia e aumentar a vida útil da bateria, o uso de *duty cycle* ainda serve, no LoRaWAN e Sigfox, como instrumento para estabelecer regras de compartilhamento do canal de comunicação. O uso de bandas de rádio sub-1 GHz não licenciadas ISM e de técnicas de modulação de faixa estreita com espalhamento espectral diferem entre países ou regiões devido a regulamentações locais, leis ou outras restrições operacionais, mas faixas comuns incluem as bandas sub-1 GHz de 902–928 MHz (EUA/ Brasil), 868–870MHz (UE), 433,05–434,79MHz (EUA/ UE) e 314–316MHz (Japão) [133].

De modo geral, quanto mais baixa a frequência de um sinal, menor a atenuação sofrida por este por conta da distância percorrida [100]. As técnicas de modulação de faixa estreita transmitem informação em uma largura de banda menor e proporcionam um ganho de *link budget*, um cálculo final de potência realizada em todo percurso da comunicação que leva em consideração a potência de transmissão, as diversas perdas em equipamentos, ganhos de antena, de amplificadores e efeitos da propagação [89]. A utilização desta técnica permite a redução de “ruídos” na comunicação. O espalhamento espectral propaga um sinal por uma faixa de frequência mais ampla com a mesma densidade de potência, garantindo uma maior robustez e resiliência à interferência. Todas estas características são particularmente atrativas aos dispositivos de comunicação para IoT na AP, pois permitem o aumento da área de cobertura dos dispositivos e colaboram com a coexistência de milhares de dispositivos em áreas rurais amplas.

Dependendo das distâncias típicas entre os nós, as tecnologias de acesso existentes podem ser classificadas em quatro categorias como rede de área local sem fio (*Wireless Local Area Network* - WLAN), rede de área pessoal sem fio (*Wireless Personal Area Network* - WPAN), rede de área de longa distância sem fio (*Wireless Wide Area Network* - WWAN) e rede de área metropolitana sem fio (*Wireless Metropolitan Area Network* - WMAN) [52]. A maioria dos trabalhos pesquisados em [124], (cerca de 40%) utilizaram em seus projetos de AP tecnologias WPAN, como *Bluetooth* e o *ZigBee*. As WWANs, suportadas principalmente pelas tecnologias celulares GSM, GPRS, 3G e 4G, foram utilizadas em 36% dos trabalhos. Para melhor organizar a discussão sobre essas tecnologias, essa seção foi dividida em três grupos: soluções de curto (WPAN), médio (WLAN) e longo (WWAN) alcance. A Figura 4.1 apresenta uma representação abstrata da relação entre as taxas de transmissão e o alcance das tecnologias discutidas. Nesse contexto, são destacadas carac-

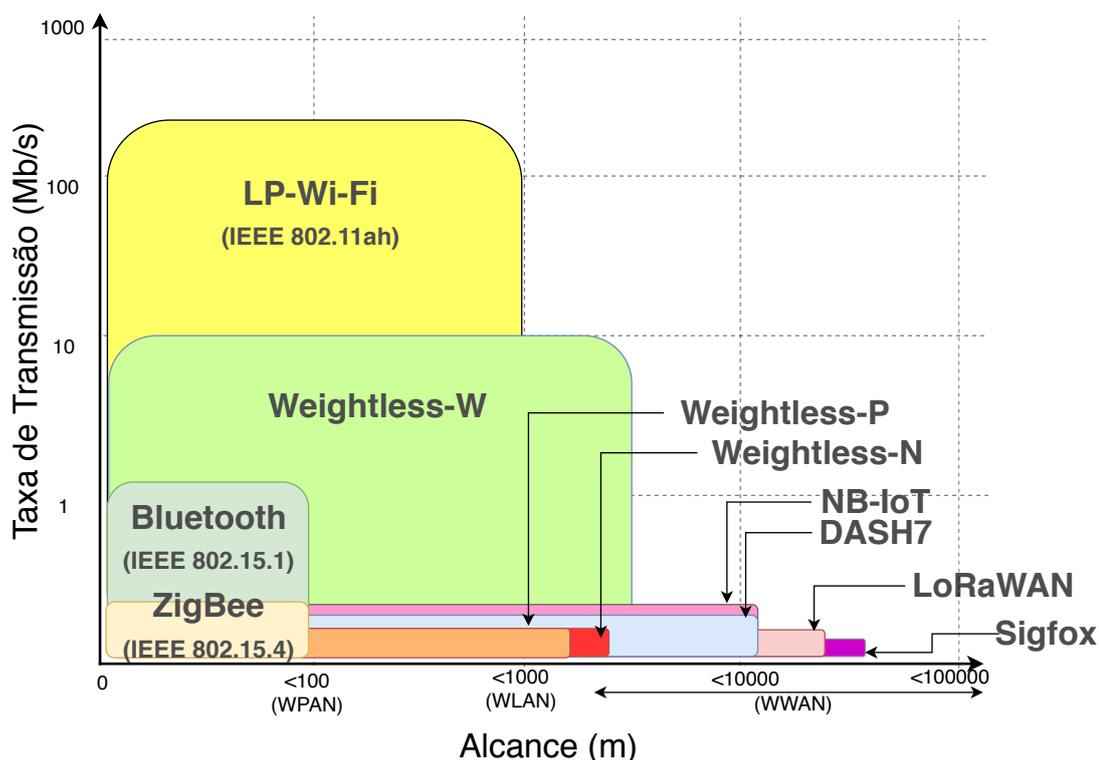


Figura 4.1: Taxa de transmissão *versus* Alcance das tecnologias (adaptado de [125]).

terísticas de cada tecnologia relevantes às aplicações de IoT na AP. Com base nisso, as tecnologias são comparadas em termos de parâmetros como taxa de transmissão de UL e DL, quantidade de dispositivos por ponto de acesso, topologia, faixa de frequência e alcance do sinal. A Tabela 4.1 complementa o resumo destas características.

Tabela 4.1: Outras características de desempenho das tecnologias

Tecnologia	Número de dispositivos	Topologia	Tipo
Bluetooth (IEEE 802.15.1)	limitado pela aplicação	Malha, Estrela	WPAN
ZigBee (IEEE 802.15.4)	até 65,000	Malha, Estrela	WPAN
Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah)	até 8,000	Estrela	WLAN
LoRaWAN	até 100,000	Estrela	WWAN
Sigfox	até 1,000,000	Estrela	WWAN
NB-IoT	até 50,000	Estrela	WWAN
DASH7	N/A (comunicação sem conexão)	Malha, Estrela	WWAN
Weightless	Não especificado	Estrela	WWAN

## 4.1 Curto alcance - *Wireless Personal Area Network* - WPAN

Nesse grupo encontram-se as tecnologias baseadas nos padrões integrantes do IEEE 802.15, estabelecido pela comissão responsável por redes de área pessoal sem fio do IEEE. Os

dois tipos de tecnologia WPAN que são frequentemente citados nos trabalhos envolvendo aplicações em AP são *Bluetooth* e ZigBee. De acordo com [8], a maioria das soluções comerciais atuais de WSNs são baseadas no padrão IEEE 802.15.4, a principal delas é o ZigBee. Para [104], o *Bluetooth* é uma das tecnologias de maior potencial para IoT.

### 4.1.1 Bluetooth

Nas versões iniciais, o *Bluetooth* oferecia taxas de transmissão de até 1 Mb/s e comunicação de curto alcance (até 10 m) utilizando as bandas ISM na faixa de 2,4 GHz. Estas versões utilizavam uma topologia estrela composta por *piconets* (um agrupamento de dispositivos *Bluetooth* emparelhados que pode se formar dinamicamente à medida que os dispositivos entram ou deixam a proximidade uns dos outros [43]) ou *scatternets* (uma coleção de *piconets*) [4]. A rede *ad hoc* de uma *piconet* podia ser formada por um nó mestre com até sete nós escravos conectados a ele.

A versão 4.2, chamada de *Bluetooth Low Energy* (BLE) ou *Bluetooth Smart* [103], constitui uma alternativa de mais baixa potência e custo que utiliza o mecanismo de *low duty cycle* para conservar energia utilizando o modo de suspensão para prolongar a vida útil das baterias em meses ou anos. Segundo [54], o BLE chega a superar o ZigBee neste último quesito. Entretanto, o primeiro é utilizado em um menor número de aplicações agrícolas por possuir uma cobertura menor. Em [46], os autores afirmam que o alcance efetivo de operação entre dois dispositivos *Bluetooth* pode ser de 10 a 100 metros. Entretanto, esse alcance pode ser estendido até aproximadamente 1,6 km utilizando-se antenas direcionais e um amplificador. Essa versão permite ainda uma taxa de transmissão de até 3 Mb/s ao se utilizar uma modulação opcional, resultando no chamado EDR (*Enhanced Data Rate*). Ao contrário de seus antecessores, o BLE não limita mais explicitamente a quantidade máxima de dispositivos em uma rede, sendo esse valor limitado apenas pela aplicação [54].

Uma nova geração do *Bluetooth*, chamada de *Bluetooth 5*, objetiva melhorar e expandir ainda mais a aplicabilidade do BLE no cenário de IoT [33]. Novos recursos e protocolos de comunicação estão sendo adicionados nesta atualização do padrão visando uma eficiência energética ainda maior para dispositivos com restrição de recursos e processamento. Taxas de transmissão duas vezes maiores também devem fazer parte dessa nova versão do padrão. Outros objetivos incluem um alcance quatro vezes maior que no *Bluetooth 4.2* e melhorias nas funcionalidades de localização, navegação e segurança [105]. Outro recurso recente introduzido no *Bluetooth 5* foi o suporte à topologia em malha [116]. Este recurso permite

a criação de redes de dispositivos em grande escala superando assim as limitações de alcance, tamanho de rede e confiabilidade das versões anteriores.

Um dos potenciais problemas do *Bluetooth*, descrito em [16], diz respeito ao seu compartilhamento de faixa de frequência com várias outras tecnologias de comunicação. Dessa forma, o tráfego de dados pode ser prejudicado ao se conectar uma grande quantidade de dispositivos em áreas em que atuam tecnologias que usam a mesma banda. Mesmo assim, diversas aplicações de IoT em AP têm se beneficiado do consumo energético reduzido e das altas taxas de transmissão do *Bluetooth* BLE.

### 4.1.2 ZigBee

O padrão ZigBee especifica as camadas mais altas (i.e., da camada de rede em diante) tendo como referência o modelo OSI (*Open System Interconnection*) — padrão que serve como base genérica, representando as camadas que separam as funções de cada parte da rede. O ZigBee estabelece os circuitos lógicos de roteamento e de gerência de interface das aplicações [142]. As camadas superiores que definem o ZigBee estão implementadas sobre o padrão IEEE 802.15.4, que especifica as camadas física (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC). O ZigBee define ainda para o padrão os métodos de segurança e seus protocolos. Ele utiliza bandas de rádio ISM de 2,4 GHz e frequências sub-1 GHz de 915 MHz e 868 MHz para se comunicar com taxas de transmissão de 250 kb/s, 40 kb/s e 20 kb/s respectivamente, fornecendo um alcance de 10 a 100 m, e permitindo a conexão de até 65.000 dispositivos [54]. Assim como o *Bluetooth*, o ZigBee foi desenvolvido para prover comunicação de baixo custo, baixa potência e curto alcance, podendo utilizar o mecanismo de *low duty cycle* para economizar energia.

O modo de operação do ZigBee depende, entre outras coisas, da topologia adotada e da função de cada nó. Existem basicamente dois tipos de nós: os de capacidade plena ou FFD (*Full Function Devices*) e os de capacidade limitada ou RFD (*Reduced Function Devices*) [20]. Dependendo da aplicação, as redes ZigBee podem assumir a topologia estrela ou malha. Na topologia em estrela, por exemplo, a comunicação é estabelecida entre nós e uma única entidade central, chamada de nó coordenador. Na topologia em malha, cada nó da rede pode se comunicar com qualquer outro dispositivo, desde que estejam na área de cobertura um do outro [42].

Embora o ZigBee seja enquadrado como um padrão sem fio de curto alcance, assim como o *Bluetooth* na versão 5, ele possui a capacidade de utilizar a topologia em malha que permite estender a cobertura, propiciando implantações densas de dispositivos conectados

em redes descentralizadas de múltiplos saltos, como descrito em [106] e [54]. Os autores em [138] e [8] descrevem o uso do 6LoWPAN entre as camadas PHY/MAC e a camada de aplicação do ZigBee servindo como suporte ao roteamento IP nas redes em malha. Quando o ZigBee está especificado dessa forma, é chamado de ZigBee IP [43].

Segundo [96], somente no ano de 2012 após emendas conduzidas por grupos de trabalho do IEEE e IETF que alteraram características do protocolo da camada MAC, combinando sincronização de tempo, salto de canal e o 6LoWPAN na camada superior, o ZigBee pôde atender aos requisitos necessários para funcionar na IoT. O padrão passou então a oferecer maior eficiência energética e alta confiabilidade nas comunicações em malha de múltiplos salto com redução de interferências, de desvanecimento de sinal e da latência. Mesmo com estes avanços, os autores em [3] não consideram que o ZigBee seja adequado para cobrir grandes áreas com milhares de dispositivos de IoT competindo simultaneamente por um mesmo canal. Segundo eles, o protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) da camada MAC do padrão perde eficiência por conta de colisões que podem ocorrer em cenários com esta característica. Nestas condições, segundo [3], a melhor opção seria o Wi-Fi HaLow, descrito a seguir.

## 4.2 Médio alcance - *Wireless Local Area Network* - WLAN

O padrão IEEE 802.11 serve como base para uma família de variantes resultantes de emendas (e.g., IEEE 802.11a/b/g/n/ac) que especificam camadas PHY e MAC para WLANs nas faixas de frequência ISM de 2,4 GHz ou 5,8 GHz [52]. O padrão IEEE 802.11 é considerado a tecnologia WLAN dominante, tendo um alcance típico de 20 a 100 m. Considerando suas várias emendas, o IEEE 802.11 prevê taxas de transmissão que variam de 1 Mb/s a 6,75 Gb/s [103]. Entretanto, suas versões originais não são adequadas a aplicações de IoT, devido principalmente à sobrecarga de quadros, consumo de energia e custos mais elevados que as outras tecnologias avaliadas nessa dissertação [11]. Essas limitações levaram o grupo de trabalho IEEE 802.11ah (TGah) a desenvolver uma emenda específica para aplicações industriais e IoT com o nome comercial de Wi-Fi HaLow.

Segundo [43], o Wi-Fi HaLow alcança distâncias de até 1000 m sem ser necessário o uso de repetidores. Suporta mais de 8000 dispositivos por ponto de acesso utilizando um método hierárquico que define grupos de estações que cooperam e compartilham o sinal entre si, semelhante ao que ocorre com as redes em malha ZigBee. As taxas de

transmissão podem alcançar até 347 Mb/s [6], dando suporte ao monitoramento agrícola, medidores inteligentes e automação industrial conforme descrevem [11] e [96]. Diferente do que ocorre no *Bluetooth* e *ZigBee*, o Wi-Fi HaLow sozinho pode fornecer uma estrutura de comunicação combinando as WSNs e o *backhaul* para uma cobertura maior com grande número de dispositivos [3].

A possibilidade de colisões é reduzida no Wi-Fi HaLow, principalmente, por conta do emprego de dois mecanismos: o RAW (*Restricted Access Window*) e o EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*). De acordo com [98], o RAW restringe o tempo em que uma estação pode competir pelo meio, de acordo com o grupo à qual pertence, melhorando significativamente o desempenho da rede. O EDCA, segundo [10], é uma variante do CSMA/CA que tem filas de transmissão com tempos de espera diferenciados para gerenciar o tráfego por prioridade. Estes são alguns dos motivos pelos quais autores como [3] consideram este o padrão mais indicado para aplicações que possuem um grande número de dispositivos de IoT. O Wi-Fi HaLow utiliza também mais de um mecanismo para economizar energia. Um deles é apresentado em [11] e faz uso de cabeçalhos mais curtos e mecanismos de confirmação implícita onde os quadros de controle ACK não são necessários em alguns casos.

Alguns estudos de avaliação de desempenho, como o realizado por [1], demonstram que o Wi-Fi HaLow é capaz de suportar um grande conjunto de cenários de IoT, incluindo o monitoramento em aplicações de agricultura com um nível de QoS (*Quality of Service*) superior. Algumas das vantagens deste padrão estão descritas em [62] e [3]. Elas incluem a alta penetração de sinal, o baixo tempo de associação e autenticação, as altas taxas de transmissão, o baixo atraso e o alcance. À medida que este padrão oferece uma das maiores taxas de transmissão das tecnologias disponíveis, ele desponta como uma boa opção para implementar aplicações rurais de sensoriamento remoto por imagem e vídeo como as apresentadas em [62], [42], [49] e [12].

Algumas desvantagens do Wi-Fi HaLow são citadas em [11]. Em busca de uma visão mais completa da viabilidade deste padrão, os autores calcularam os custos de implantação desta tecnologia considerando um cenário característico de IoT. Comparando esse padrão com outras tecnologias como LoRaWAN e Sigfox, eles concluíram, que os custos de implantação, em valores aproximados, do Wi-Fi HaLow em um cenário hipotético são cerca de 10% maiores. Todavia, estes custos são aproximadamente 33% menores se comparado às tecnologias celulares. Em relação ao *ZigBee*, os autores afirmam que o Wi-Fi HaLow é menos eficiente em termos de consumo de energia sob condições de tráfego saturado.

O autor de [106] destaca ainda que a tecnologia não tem simetria nas taxas utilizadas para UL e DL, sendo as do primeiro mais baixas que as do segundo. Por outro lado, há menor alcance nos enlaces de DL, sendo necessário o uso de esquemas de codificação mais robustos, maior potência de transmissão e antenas de maior ganho para compensar a diferença.

Em resumo, o padrão Wi-Fi HaLow busca atender aplicações que requerem largura de banda e alcances maiores à custa de um maior consumo de energia se comparado com tecnologias LPWAN como o LoRaWAN.

### 4.3 Longo alcance - *Wireless Wide Area Network* - WWAN

As WWANs são responsáveis por fornecer serviços de comunicação para áreas geográficas maiores do que uma única área urbana [52]. Para [96], elas compreendem redes de comunicação sem fio que oferecem uma ampla cobertura, custos razoáveis, altos níveis de segurança, acesso a espectro dedicado e simplicidade de gerenciamento. Por esse motivo, são tecnologias muito atraentes no moderno cenário de conectividade de IoT. Exemplos incluem as tecnologias celular 3G, 4G, especialmente o 3GPP LTE, operando em espectro licenciado. Além disso, o 5G promete trazer o aumento da taxa de transmissão, a redução da latência e a melhoria da cobertura em relação ao 4G. Enquanto o 5G não se estabelece, o LTE e suas tecnologias derivadas, como o LTE Cat-1, LTE Cat-M, EC-GSM e o NB-IoT, vêm sendo desenvolvidos e aprimorados em paralelo como alternativas para a comunicação de longo alcance. Um exemplo de atualização relevante dessa tecnologia é o mecanismo de *low duty cycle* acrescentado ao LTE chamado *Power Saving Mode* (PSM) [82]. Deve-se observar, no entanto, que as tecnologias celulares demandam maiores custos com infraestrutura de rede e o uso de bandas licenciadas, apresentando ainda um consumo energético mais elevado. Estas considerações são apontadas como fatores preponderantes para o crescimento das tecnologias LPWANs.

A LPWANs são especificamente adequadas para os casos de uso que são tolerantes a atrasos, não precisam de altas taxas de transmissão e tipicamente requerem baixo consumo de energia [82]. As aplicações deste último grupo contrastam com aplicações críticas que exigem latência ultra-baixa e alta confiabilidade, sendo mais bem atendidas pelas tecnologias celulares.

Cinco tecnologias têm se destacado e podem constituir soluções de longo alcance

para AP na IoT: LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, DASH7 e Weightless. Outras tecnologias proprietárias, como INGENU [2] e QOWISIO [106], são menos populares e não serão discutidas nesse trabalho, embora possuam características semelhantes e possam fornecer também interessantes contribuições para as aplicações de IoT na AP.

### 4.3.1 LoRaWAN

O LoRaWAN está definido sobre o LoRa, sendo que este último utiliza uma técnica de modulação de espalhamento espectral proprietária da empresa Semtech para permitir enlaces de comunicação de longo alcance [77], enquanto que o LoRaWAN é o padrão de rede responsável por proporcionar a comunicação entre vários dispositivos LoRa, transferindo a carga de gerenciamento da rede para um ponto de controle central (servidores de rede de aplicação), aliviando a carga dos dispositivos. Na camada física, o LoRa utiliza bandas de frequência não licenciadas que podem variar de acordo com leis locais. Essa tecnologia utiliza uma topologia do tipo estrela e assume que a comunicação entre nós é geralmente *unicast*, embora também suporte a operação *multicast*. Esse suporte a comunicação multicast viabiliza a atualização de *software Over-The-Air* (OTA) e reduz o tempo de transmissão de outras mensagens de distribuição em massa. As taxas de transmissão de DL e UL variam entre 27 kb/s e 100 kb/s, dependendo de aspectos regulatórios de cada país [43]. Segundo [11] e [2], cerca de 100.000 dispositivos podem ser conectados nestas redes com uma área de cobertura de 2 a 5 km em regiões urbanas e 15 km em regiões suburbanas. Entretanto, alguns autores como em [99], reportam experimentos práticos nos quais um nó operando na banda ISM de 868 MHz obteve um alcance máximo de comunicação de mais de 15 km no solo e perto de 30 km sobre a água.

Na arquitetura de rede LoRaWAN, os pontos de acesso funcionam como GWs agindo como uma ponte transparente na retransmissão de mensagens entre os dispositivos finais e um servidor de rede central no *backend*. Os pacotes recebidos de nós finais são encaminhados para servidores de rede baseados em nuvem por meio de algum *backhaul* (celular, Ethernet, satélite ou Wi-Fi), enquanto os dispositivos finais utilizam comunicação sem fio com um único salto para um ou vários pontos de acesso. A comunicação entre dispositivos finais e pontos de acesso é espalhada em diferentes canais e pode utilizar taxas de transmissão adaptativas (*Adaptive Data Rate* - ADR) [77].

Existem três classes diferentes de estações cliente LoRaWAN: dispositivos classe A, B e C. O objetivo é flexibilizar o padrão de comunicação, adequando-o a uma ampla gama de aplicações. Dispositivos de classe A permitem comunicações bidirecionais, onde

a transmissão de UL de cada dispositivo final é seguida por duas janelas breves de DL, podendo ocorrer retransmissões caso a primeira tentativa de UL ou DL fracasse. Os dispositivos classe A ficam inativos por um período de tempo até a próxima transmissão e com isso alcançam o menor consumo de energia entre as três classes. Dispositivos Classe B, podem agendar recepções de DL para receber mensagens de aplicação e os dispositivos Classe C são tipicamente alimentados pela rede elétrica, tendo a capacidade de escutar continuamente e receber transmissões de DL com a menor latência possível a qualquer momento [106].

De acordo com regulações impostas por órgãos de padronização como o ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), na Europa e ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), no Brasil, só é permitido que dispositivos transmitindo nas bandas de frequências utilizadas pelo LoRaWAN enviem mensagens em 1% do tempo no período de uma hora, ou seja, um dispositivo só pode transmitir durante 36 segundos por hora, sendo que cada transmissão posterior a uma já iniciada deve aguardar no mínimo 1,8 s para uma nova transmissão [80]. Este tipo de regulamentação faz parte de uma política de ocupação do canal (*Fair Access Policy*) que visa evitar o congestionamento da rede. Conforme veremos na Seção 7, estes fatores determinam no desempenho desta tecnologia.

Entre as vantagens do padrão LoRaWAN estão os custos de implantação reduzidos em relação a outras tecnologias, principalmente porque é possível cobrir uma mesma área com uma menor quantidade de pontos de acesso e longa vida útil dos equipamentos. No entanto, segundo [2], o padrão LoRaWAN pode sofrer com excesso de colisões, caso pontos de acesso sejam implantados de forma não planejada, visto que, este padrão utiliza um protocolo de acesso ao meio do tipo ALOHA. À medida que o número de dispositivos finais cresce para centenas ou milhares por ponto de acesso, cresce também o número de trabalhos questionando a questão escalabilidade em termos de capacidade das redes LoRaWAN, exemplos são os trabalhos de [19], [131] e [85]. De toda forma, a ampla cobertura e o baixo consumo da tecnologia LoRaWAN têm feito com que neste momento uma grande atenção esteja sendo dada a esta tecnologia nas aplicações agrícolas.

### 4.3.2 Sigfox

O Sigfox é uma tecnologia proprietária que opera nas faixas de frequência não licenciadas de 862 a 928 MHz. No entanto, devido a regulamentações locais e outras restrições operacionais, as configurações da rede podem diferir de um país para outro. As operações globais estão atualmente divididas em seis regiões geográficas, chamadas de RC (*Radio*

*Configuration*), RC1 a RC6 [118]. Na Europa (região RC1), utiliza-se a frequência de 868 MHz, nos EUA e Brasil (região RC2), utiliza-se a frequência de 902 MHz. Segundo [43], esse padrão oferece enlaces com cobertura de 3 a 10 km em áreas urbanas e 30 a 50 km em áreas rurais. As taxas de transmissão variam entre 100 b/s UL e 600 b/s DL [106].

Assim como acontece com o LoRaWAN, o Sigfox também utiliza frequências de rádio ISM que devem cumprir restrições legais limitando o compartilhamento de canal com o *duty cycle* de 1%. Na região RC1, por exemplo, o número máximo de transmissões realizadas por dia está limitado a 144 mensagens de 8 a 12 *bytes*. Como o Sigfox mantém 4 mensagens para uso do protocolo, restam 140 mensagens/dia “úteis” para os dispositivos. Na comunicação bidirecional, que depende do modelo de negócio contratado, o número máximo de mensagens de DL chega a 4 mensagens por dia [40]. Nas regiões RC2 e RC4 que incluem Brasil, EUA e outros países das Américas, o Sigfox utiliza o *frequency hopping*. Neste caso, os dispositivos transmitem cada mensagem 3 vezes em 3 frequências diferentes, com um tempo máximo de funcionamento de 400 ms por canal e nenhuma nova emissão antes de 20 s. Nas regiões R3 e R5, que incluem Japão e Coreia, os dispositivos utilizam o método *listen before talk* que verifica se o canal de 200 kHz operado pela Sigfox está livre de qualquer sinal mais forte que  $-80$  dBm antes de transmitir.

O sistema UNB empregado no Sigfox faz uso de um canal de banda estreita separado para cada transmissão, onde o espectro utilizado é canalizado para que múltiplas transmissões UL e DL possam ocorrer simultaneamente. A fim de fornecer uma rede escalável de maior capacidade com baixo consumo de energia, esta tecnologia faz uso de canais mais estreitos que os do NB-IoT, por exemplo [106]. A alta sensibilidade dos receptores permite um alcance estendido, embora as taxas de transmissão sejam muito baixas.

O Sigfox está sendo comercialmente implantado em diversos países. O Brasil já possui implantações que incluem vastas áreas rurais do estado do Mato Grosso, um dos principais estados agrícolas do país [45]. Em [118] estão destacadas algumas das vantagens desse padrão, que incluem a possibilidade de utilização de técnicas de QoS. O Sigfox se destaca como opção para aplicações em que o sistema necessite enviar pequenas quantidades de dados com pouca frequência. São considerados inconvenientes da tecnologia o fato de ela não ser um protocolo aberto e o número limitado de mensagens bidirecionais permitidas por dia. Estas limitações comprometem a quantidade de aplicações que podem utilizar esta tecnologia. Em particular, essa tecnologia não é apropriada para casos de uso onde a comunicação de DL é um fator importante [44].

### 4.3.3 NB-IoT

Desenvolvido pela organização 3GPP como uma tecnologia de comunicações sem fio para IoT compatível com as tradicionais redes celulares, esse padrão pode conectar até 50 mil dispositivos por setor de estação base em um raio de cobertura de cerca de 10 km. O NB-IoT pode alcançar taxas de transmissão de até 4 Mb/s [62]. Tipicamente, no entanto, essa taxa alcança 234,7 kb/s (DL) e 204,8 Kb/s (UL) [121].

Os autores em [121] descrevem as diferenças técnicas do NB-IoT comparadas ao LoRaWAN em termos de características físicas, arquitetura de rede, protocolo MAC, QoS, vida útil da bateria, latência, cobertura e alcance da rede, modelos de implantação e custos. O trabalho demonstra que o NB-IoT leva vantagem para as aplicações que necessitam de QoS, baixa latência, alta taxa de transmissão e maior cobertura. Em [62], esses dois padrões são comparados ao Wi-Fi HaLow. Para os autores, o NB-IoT seria, do ponto de vista técnico, o mais avançado e promissor padrão, graças às bases herdadas do LTE.

O padrão NB-IoT suporta 3 cenários de implantação diferentes, *In-band operation*, *Standalone* e *Guard-band operation*. Na operação *In-band* o NB-IoT compartilha a estação base, o *hardware* e a potência de transmissão, utilizando uma banda reservada no mesmo canal do LTE. No modo *Standalone*, o NB-IoT trabalha de forma independente utilizando toda a potência de transmissão da estação base, aumentando a cobertura. No modo de operação *Guard-band* o NB-IoT compartilha o canal com o LTE, mas é transmitido entre duas bandas, compartilhando o mesmo amplificador de potência e o poder de transmissão do canal LTE [40].

Os últimos avanços na tecnologia NB-IoT buscam estendê-la para permitir maior acurácia na localização e rastreamento de objetos e nos serviços de *multicast* (por exemplo para atualização de *software*) [112]. Segundo [121], no caso das aplicações rurais, algumas dificuldades podem acometer implantações NB-IoT que se limitem a aproveitar o uso de estações base 4G/LTE, já que muitas áreas rurais e suburbanas não possuem essa cobertura.

### 4.3.4 DASH7

DASH7 é o nome comercial do padrão que surgiu sob o nome de DASH7 Mode 1. Atualmente há uma nova estrutura de especificações chamada Mode 2 que visa atender os requisitos de mercado para os próximos dez anos [100]. A topologia em estrela é utilizada por padrão [106]. Existem três perfis de dispositivos DASH7: o GW, o *endpoint* e o

*subcontroller*. O segundo e último apresentam características semelhantes. Entretanto, o *subcontroller*, apresenta um conjunto maior de recursos e pode assumir alguns serviços do GW [135]. Em uma topologia de rede típica, os dispositivos finais se comunicam via *subcontroller* com o ponto de acesso. Este tipo de configuração requer que os dispositivos finais acordem periodicamente em busca de comandos dos *subcontroller* [100].

Os autores em [100] defendem que, para as aplicações rurais, o DASH7 apresenta diversas vantagens sobre outras tecnologias sem fio. Eles demonstram por meio de um estudo que, ao se realizar a transmissão de dados entre nós sem fio colocados a uma distância de 500 m um do outro, o DASH7 necessitou de uma infraestrutura com poucos nós. Os resultados obtidos mostram que, em relação ao DASH7 (433 MHz), o ZigBee operando a 868 MHz e 2,45 GHz necessita, respectivamente, de 9 e 99 nós a mais nas mesmas condições. Como esperado, frequências de operação e taxas de transmissão baixas como as utilizadas pelo DASH7 no experimento são fatores que contribuem para o aumento do alcance e redução no número de nós necessários para cobrir uma determinada área. Foram alcançados também com o DASH7 latências mais baixas, menos interferência, menor consumo de energia e custo total de implantação reduzido. Para os autores de [106], uma outra vantagem do DASH7 é que, ao contrário de outras tecnologias LPWAN, ele define uma pilha de protocolos completa, permitindo que as aplicações e dispositivos finais se comuniquem sem ter que lidar com complexidades das camadas PHY ou MAC subjacentes.

Os pontos fracos do DASH7 em comparação aos seus concorrentes são, segundo [100], a baixa taxa de transmissão (28 kb/s no Modo 1) e os tamanhos das antenas na versão de 433 MHz devido ao comprimento de onda de cerca de 69 cm.

Embora não seja um padrão LPWAN tão popular como os apresentados anteriormente, esta tecnologia está ganhando aceitação por, além das características apresentadas, fornecer uma plataforma de código aberto, precisão de localização e segurança robusta [84] e por permitir uma ótima penetração em materiais diversos, podendo ser muito útil em aplicações de AP como as de monitoramento de vinhedo que costumam apresentar um ambiente de rádio bastante severo com colinas ondulantes, densas folhagens, quilômetros de arames e postes de metal sustentando as videiras [13].

### 4.3.5 Weightless

O Weightless é desenvolvido em três versões, Weightless-W, Weightless-N e Weightless-P sob o controle da organização Weightless SIG. As taxas de transmissão e alcance são

flexíveis. Segundo [43], o Weightless-W, possui em área urbana um alcance de cerca de 5 km com uma taxa de transmissão variando entre 1 kb/s e 10 Mb/s. O Weightless-N, atinge 3 km de alcance e cerca 100 kb/s de taxa de transmissão. Por último, o Weightless-P cobre cerca de 2 km com taxas de transmissão variando entre 200 b/s a 100 kb/s. O número de dispositivo suportado por rede não é especificado.

Todas as versões utilizam a topologia em estrela. O Weightless-W foi desenvolvido como uma solução bidirecional para operar em espaços brancos de TV (470-790 MHz) com vida útil da bateria podendo alcançar de 3 a 5 anos. O Weightless-N foi projetado para que as aplicações obtenham um consumo de energia ainda menor, com vida útil estimada de até 10 anos. Ao contrário do Weightless-W, o Weightless-N é baseado na tecnologia UNB e opera na faixa UHF (*Ultra High Frequency*) de 800 a 900 MHz. Além disso, ele permite apenas comunicação em UL. Já o Weightless-P propõe uma comunicação bidirecional que pode operar em diversas bandas de frequência. Ele compartilha sua camada MAC com o Weightless-W, o custo dos terminais e o consumo de energia são maiores do que no Weightless-N, com uma vida útil da bateria de 3-8 anos [2].

Assim como o Sigfox, o Weightless também inclui suporte a QoS na versão Weightless-P [43]. No entanto, a comunicação unidirecional do Weightless-N é vista como desvantagem desta tecnologia, pois limita o número de casos de uso [106]. O número limitado de fornecedores também é citado como uma limitação. Já a versão Weightless-W tem sofrido com problemas legais relacionados ao uso do espaço branco de TV [43].

Assim como o DASH7, o Weightless ainda não é um padrão muito popular e carece de mais casos de uso que comprovem sua eficiência.

# Capítulo 5

## Características e requisitos das aplicações

O desenvolvimento de projetos que incluem redes de comunicação na AP pode envolver várias dificuldades devido principalmente à ausência de infraestrutura e custos elevados, sobretudo em extensas áreas rurais. Tecnologias que apresentam como características simplicidade de instalação, de manutenção e menores custos operacionais tornam-se, então, mais atraentes. Se por um lado as redes de comunicação sem fio oferecem um gama de possibilidades, por outro lado, as demandas em termos de consumo energético, taxa de transmissão de UL e DL, quantidade de dispositivos por ponto de acesso das aplicações são também diversificadas.

De acordo com [11], baixas taxas de transmissão são suficientes para atender a maioria das aplicações de IoT. Em [118], pode-se verificar exemplos de medições de dados que poderiam ser utilizadas na AP, como coordenadas de GPS, de temperatura e relatórios de velocidade, apresentando comumente tamanhos de *payload* de 6 bytes, 2 bytes e 1 byte, respectivamente. Dessa forma, vários casos de uso conseguem ser atendidos por redes ZigBee que têm como limite taxas de transmissão de até 250 kb/s. Exemplos deste tipo podem ser encontrados nos trabalhos de [39], [49] e [79]. Entretanto, existem exemplos de aplicações que podem requisitar taxas de transmissão maiores, como aquelas aplicadas na vigilância de insetos invasivos por vídeo, detecção e monitoramento de pragas e aquisição de dados de monitoramento de culturas que utilizam as redes de sensores multimídia sem fio (*Wireless Multimedia Sensor Networks* - WMSN) descritas em [140].

Os trabalhos em [79] e [110] reportam requisitos de tolerância a atrasos de alguns casos de uso. Para eles, boa parte das aplicações não necessitam coletar e enviar dados constantemente. Portanto, a latência não costuma ser um requisito estrito. Exemplos incluem as aplicações de monitoramento do solo que podem utilizar coletas periódicas

para enviar dados algumas vezes por dia ou em intervalos de alguns minutos. Há casos, no entanto, onde a transmissão de informação em tempo real é importante para que problemas possam ser detectados pelos sensores antes mesmo de serem visíveis no campo, evitando que o rendimento da safra seja reduzido ou outros danos ocorram [54]. É o caso da aplicação de monitoramento de incêndios com ZigBee testada em [61], onde os requisitos incluem transmissões de dados em tempo real com baixa latência e alta confiabilidade.

Os autores em [54] descrevem ainda a relação direta entre o alcance da comunicação e a vida útil da bateria. Para eles, como em boa parte dos casos de uso os dispositivos de IoT estão espalhados por grandes áreas, este acaba sendo a principal influência no consumo energético. Dispositivos que utilizam GPRS e Wi-Fi costumam comprometer este requisito. Outras questões como desempenho da rede, tolerância a falhas, escalabilidade, quantidade de mensagens perdidas, capacidade de processamento, tráfego e quantidade de dispositivos conectados podem influenciar na implantação das aplicações. Diante a diversidade de características, não é possível definir uma só tecnologia de comunicação que seja mais adequada para uma determinada aplicação.

## 5.1 Casos de Uso

Os levantamentos realizados por [124] demonstram que os casos de uso de aplicações de controle de irrigação constituem cerca de 72% das referências publicadas na área de IoT aplicadas AP. O trabalho de [124] descreve treze subdomínios de aplicação da IoT na AP, entre eles o monitoramento atmosférico, monitoramento de solo, monitoramento de água, monitoramento de plantas, controle de irrigação, controle de fertilizantes e pesticidas e controle de iluminação. Alguns casos de uso e requisitos referentes a esses domínios de aplicação são descritos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Casos de uso & Requisitos

Domínio	Aplicação	Tecnologia de rede sem fio	Geração de tráfego	Latência tolerada	Referência
Controle de irrigação		Wi-Fi HaLow	4 minutos	Não informado	[1]/2019
Monitoramento de incêndio		ZigBee	1 segundo	2 segundos	[61]/2011
Monitoramento de vinhedos		LoRaWAN e 3G	30 minutos	Não informado	[67]/2019
Monitoramento de plantas		Wi-Fi Mesh	5 a 15 minutos	Não informado	[69]/2017
Monitoramento atmosférico		Wi-Fi e 4G	10 minutos	Não informado	[70]/2019
Monitoramento de vinhedos		4G	15 minutos	Não informado	[71]/2019
Telemetry		Wi-Fi e Bluetooth	1 minutos	2 minutos	[72]/2019

Detalhes que descrevem aplicações de controle de irrigação telemetria, fertilização, rastreabilidade e monitoramento de vinhedos são apresentados a seguir.

### 5.1.1 Controle de Irrigação

Nestes casos de uso, sensores de umidade e temperatura são utilizados para medir condições climáticas e ambientais, podendo trabalhar coletivamente no envio de dados para processamento local ou remoto. Um exemplo é o WiPAM (*Wireless sensor network for Precision Agriculture in Malawi*), um sistema de gerenciamento de irrigação — ou IMS (*Irrigation Management System*) — desenvolvido por [79]. Esta aplicação utiliza o ZigBee e GPRS para automatizar o processo de irrigação e investigar o desempenho e a qualidade do enlace de rádio através de medições com o indicador de potência RSSI (*Received Signal Strength Indicator*). Além disso, os autores monitoraram a vida útil da bateria para os nós sensores e puderam verificar como o tempo de vida da bateria do sensor afeta na robustez da implantação da WSN. Eles demonstraram também como o posicionamento de sensores no campo agrícola e a alta densidade de nós pode melhorar notavelmente a resiliência do sistema, considerando, no entanto, que os custos se elevam proporcionalmente.

Um exemplo de arquitetura WSN que fez uso das tecnologias ZigBee e Wi-Fi foi utilizada por [49] em um sistema inteligente de irrigação. Esse sistema foi desenvolvido e estendido a outras aplicações de AP incluindo um subsistema de vigilância capaz de monitorar o crescimento de plantas, prevenir a invasão de animais e a propagação de pragas. Os resultados obtidos descrevem, por exemplo, que para uma WSN com 18 nós sensores, 3 nós atuadores e um GW, quanto maior a altura das antenas em relação as distâncias dos nós, melhores são o alcance da transmissão e a taxa de entrega de pacotes.

### 5.1.2 Telemetria

Os sistemas de telemetria têm sido utilizados na AP para medição, comando e rastreamento. Produtos como JDlink [32] e STARA TELEMETRY [123] fazem uso de tecnologias de comunicação sem fio como as redes celular. Estes sistemas têm como finalidade a criação de mapas de gestão de maquinários que servem a medir e controlar a trajetória, emitir alertas de velocidade, realizar a gestão de peças e quilometragem e o abastecimento e consumo de combustível. Desta forma, produtores e gerentes conseguem acompanhar remotamente o desempenho de máquinas nas lavouras.

### 5.1.3 Fertilização

A forma como é feita a fertilização nas lavouras na etapa de plantio afeta diretamente o crescimento de plantas e a qualidade dos alimentos. O desafio de se aplicar dosagens

corretas tem sido fonte de pesquisas que se baseiam no sensoriamento de umidade, condutividade, temperatura, pH do solo, umidade, concentração de CO<sub>2</sub> no ar e iluminação.

O sistema de *hardware* e *software* de apoio à decisão para fertilização desenvolvido por [47] utiliza o Wi-Fi e análises de GPS para adquirir dados em tempo real das variáveis ambientais que podem auxiliar a tomada de decisão.

#### 5.1.4 Monitoramento de vinhedos

Vinhedos são especialmente sensíveis às condições do entorno e podem demandar um monitoramento em tempo real para o sucesso da plantação. Diante dessa necessidade, é crescente também a quantidade de casos de uso que utilizam WSNs para coletar e analisar dados vitais de temperatura do ar, umidade das folhas e do solo e radiação ultravioleta.

Os autores em [101] implementaram uma plataforma de nuvem IoT privada que pode ser usada como base para pesquisa e desenvolvimento nos domínios de agricultura de precisão e monitoramento ecológico. Esta plataforma foi utilizada em um sistema especialista em pulverização que reporta a temperatura do ar, umidade relativa, pressão, temperatura do solo, velocidade do vento e umidade da folha. Todos os nós da rede foram equipados com um modem GPRS e configurados para enviar dados coletados pelo sensor a cada 15 minutos. Sua finalidade é a previsão de umas das principais doenças em videiras, o Míldio da Videira (*Plasmopara viticola*).

O NAV (*Network Avanzato per il Vigneto – Advanced Vineyard Network*) [83] é um outro exemplo de sistema utilizado neste contexto. Ele foi composto por uma WSN desenvolvida com o objetivo de realizar o monitoramento remoto em tempo real e coletar parâmetros micrometeorológicos em um vinhedo na Itália. Para tal, os pesquisadores desenvolveram dispositivos sem fio utilizando módulos transmissores de rádio proprietário (Aurel mod. XTR903) que podiam se comunicar com um máximo de 255 nós operando na faixa de frequência ISM de 433 MHz a distâncias que dependiam do tipo de antena (plano terra ou direcional) e dos obstáculos entre o transmissor e o receptor. Um protocolo de transmissão foi desenvolvido para minimizar o consumo de energia. Os dados coletados pelos nós eram então transmitidos para um servidor central remoto utilizando dispositivos GSM/GPRS. Em [104], são fornecidos detalhes de uma implantação semelhante realizada em um vinhedo na Espanha. Esta, por sua vez, fez uso de *hardware* proprietário da empresa *Libelium* e desta forma podia suportar diversas tecnologias de comunicação sem fio como Wi-Fi, 3G, GPRS, LoRaWAN, ZigBee e Bluetooth 4.0.

### 5.1.5 Rastreabilidade

A rastreabilidade é entendida como um mecanismo utilizado para identificar a origem do produto desde o campo até o consumidor [74]. É um sistema bastante complexo que, além de agregar valor ao produto final, monitora e registra todas as movimentações do mesmo, da produção à embalagem, transporte e venda, podendo assim atestar a sua qualidade.

Em [108], os autores estudam uma estrutura baseada na IoT para monitorar entregas de *e-commerce* de frutas. Este sistema coleta dados do ambiente em fazendas e veículos de transporte utilizando equipamentos como sensores de temperatura, umidade, luminosidade, CO<sub>2</sub>, câmeras e dados de GPS. Em termos de comunicação, a solução utiliza tecnologias WLAN e WWAN (em particular, GPRS) para monitorar o frescor de frutas entregues a consumidores finais.

A Tabela 5.2 apresenta um resumo qualitativo para cada uma das tecnologias discutidas, considerando características que são relevantes para as aplicações de IoT em AP.

Tabela 5.2: Prós e contras das tecnologias de comunicação

	<b>Pros</b>	<b>Cons</b>
Bluetooth (IEEE 802.15.1)	- Taxa de transmissão - Energia - Segurança	- Interferência
ZigBee (IEEE 802.15.4)	- Energia - Segurança - Custos	- Taxa de transmissão
LP-Wi-Fi (IEEE 802.11ah)	- Alcance - Taxa de transmissão	- Custos
LoRaWAN	- Alcance - Energia - Segurança - Custos	- Taxa de transmissão
Sigfox	- Alcance	- Taxa de transmissão - Latência - Limite de tráfego de dados diário - Tecnologia Proprietária
NB-IoT	- Alcance - Taxa de transmissão - Latência - QoS	- Custos - Tecnologia Proprietária
DASH7	- Alcance - Energia - Latência - Penetração nos materiais - Interferência - Custos	- Taxa de transmissão - Poucos casos de uso
Weightless	- Alcance - Taxa de transmissão (-W) - Latência - QoS (-P)	- Taxa de transmissão (-N e -P) - Custos (-W) - <i>Espaço em branco inter canais de TV</i> (-W) - Poucos casos de uso

# Capítulo 6

## Simulações e resultados

Neste capítulo são apresentados resultados de simulações comparativas entre ZigBee e LoRaWAN em um cenário típico de aplicação de IoT para AP. O objetivo destas simulações não foi apontar uma ou outra como a melhor tecnologia, visto que, cada uma delas tem suas particularidades. Objetiva-se, no entanto, avaliar o desempenho e analisar o comportamento destas tecnologias aplicadas a cenários e condições idênticas em uma área rural e dessa forma obter conclusões que subsidiem os avanços e projetos relacionados a IoT em AP.

As simulações de rede são um componente essencial na validação de protocolos, evolução de tecnologias, redução de custos e de tempo em projetos de redes sendo referenciadas em diversos trabalhos acadêmicos como [22], [34] e [42] que reforçam sua importância para os variados tipos de redes de comunicação. Sendo também um dos objetivos desta pesquisa, as simulações de rede permitem, por exemplo, realizar o levantamento de métricas de desempenho como atraso médio fim-a-fim ou latência e a taxa de recepção de pacotes para o ZigBee e o LoRaWAN. No entanto, são características inerentes a todo trabalho envolvendo simulações as limitações decorrentes da complexidade e impossibilidade de se medir todas as variáveis encontradas em ambientes reais [48]. Isso também ocorre neste trabalho, visto que não é possível considerar por completo alguns fatores como condições climáticas, relevo, obstáculos e ruídos eletromagnéticos que poderiam influenciar os resultados obtidos. Dessa forma, como será apresentado no decorrer deste capítulo, são utilizadas algumas suposições/pressupostos e simplificações.

Como discutido nas seções anteriores, o ZigBee é um dos padrões mais utilizados nos casos de uso e trabalhos envolvendo as WSNs em agricultura de precisão. O LoRaWAN se destaca como uma das mais proeminentes tecnologias para IoT em AP. Considerando que [54], [92], [79], [129] e [76] destacam diversas características destes dois padrões apontando-

os como mais adequados para aplicação em sistemas agrícolas, complementam-se os objetivos gerais deste trabalho selecionando-se ambas as tecnologias para uma avaliação de desempenho. Dessa forma, buscou-se um simulador de rede capaz de recriar para ambas as tecnologias de conectividade um ambiente de testes com a possibilidade de simulação de um cenário real com parâmetros confiáveis já validados em trabalhos anteriores.

As opções encontradas foram o ns-3 [27] e o OMNet++ [93]. Os módulos LR-WPAN [28] e LoRaWAN [80] permitem simular, respectivamente, o ZigBee e o LoRaWAN no primeiro. No segundo, pode-se simular o ZigBee com o módulo OMNeT++ *ZigBee Module* [93] e o LoRaWAN com o módulo FLoRa (*Framework for LoRa*) [24], [122]. Os critérios utilizados para escolha do simulador basearam-se no estágio de evolução dos respectivos módulos, na documentação disponível e no número de publicações relacionadas. Assim, o ns-3 foi escolhido pois, de acordo com [93], o OMNeT++ *ZigBee* está apenas 32% completo, enquanto que, para os objetivos deste trabalho, os módulos do ns-3 apresentam um estágio mais avançado, já tendo sido utilizados em diversos estudos relacionados.

## 6.1 O ns-3

O *Network Simulator 3* (ns-3) é um dos principais simuladores disponíveis para utilização em pesquisas em redes de comunicação com e sem fio, tendo sido utilizado nos trabalhos como [80], [10] e [15]. Desenvolvido por uma comunidade de usuários sob a licença GPL (*General Public License*), o ns-3 substituiu o ns-2 [26] com diversas melhorias em relação ao seu antecessor no que tange a organização de novos conjuntos de módulos que passaram a ser implementados sobre a linguagem C++ [90]. Ele permite simular recentes e tradicionais padrões e tecnologias de comunicação de rede como o ZigBee, o Bluetooth, o LTE, o Wi-Fi, o Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah), o LoRaWAN e protocolos como o TCP, IP, UDP e o CSMA utilizando abstrações para dispositivos finais, enlaces ponto-a-ponto, placas de rede, canais de comunicação, pacotes de dados e aplicações [48]. Ele possibilita ainda a realização de experimentos utilizando escalonadores de eventos para coletar dados que produzem resultados baseados em modelos realísticos e em cálculos matemáticos e físicos.

Os autores em [95] realizaram um comparativo que avaliou o desempenho de 4 importantes simuladores de redes disponíveis, incluindo o NS-2 e o OMNet++. Este experimento demonstrou a eficiência do ns-3 diante dos concorrentes em quesitos como uso de memória e tempo de computação.

### 6.1.1 O módulo *Low-Rate Wireless Personal Area Network* (LR-WPAN)

O LR-WPAN é o módulo disponibilizado pela comunidade de desenvolvimento do ns-3 que está em conformidade com as especificações do padrão IEEE 802.15.4-2006 [65]. Em conjunto com outras classes e APIs disponíveis para o ns-3 ele disponibiliza implementações de modelos que especificam a arquitetura e operação para as camadas PHY e MAC. As demais camadas complementares e protocolos superiores que definem o ZigBee (6LowPAN, IPv6, UDP/TCP, ICMPv6 e de aplicação) estão disponibilizadas em módulos separados. Este módulo foi utilizado também em simulações para o padrão ZiBee em [60] e [41]. Para que as simulações com este módulo fossem possíveis foi necessário configurar também modelos de mobilidade (*Mobility Model*), de atraso de propagação (*Propagation Delay Model*) e de perda por propagação (*Propagation Loss Model*).

### 6.1.2 O módulo LoRaWAN

O módulo LoRaWAN disponível para ns-3 foi desenvolvido por [80], [21]. Ele abstrai o funcionamento dos chips *Semtech SX1272* [114] para dispositivos finais e *Semtech SX1301* [115] para o GW, representando as arquiteturas de rede do tipo ponto-multiponto. Além do GW e servidor, atualmente só são representados no simulador dispositivos LoRa de classe A, ou seja, aqueles que permitem comunicações bidirecionais, de modo que as transmissões UL de cada dispositivo final são seguida por duas janelas curtas de recepção de DL. Assim como ocorre com dispositivos reais, na representação da comunicação dos dispositivos classe A no simulador ns-3 os dispositivos somente requerem comunicação DL (mensagens dos GWs/servidores para os dispositivos finais) pouco depois dele ter enviado uma transmissão UL. As comunicações de DL advindas do servidor em qualquer outro momento terão que esperar até o próximo UL agendado. Podem ainda ocorrer retransmissões caso seja necessário.

O GW implementado no módulo LoRaWAN emula 8 canais receptores trabalhando em paralelo em uma mesma antena. Caso um pacote direcionado a ele não encontre canais disponíveis, só será descartado após uma segunda janela de recepção malsucedida. Na rede LoRaWAN, os GWs desempenham basicamente o papel de encaminhadores de pacotes entre a rede LoRaWAN e a rede IP, enquanto o servidor fica obrigado a gerenciar diretamente cada nó conectado aos GWs. Diferentemente do que acontece no módulo LR-WPAN, no módulo LoRaWAN, o *low duty cycle* está implementado em conformidade com as limitações regulamentadas pelos órgãos de padronização. Conforme é descrito no

decorrer deste capítulo, estas são características decisivas para os resultados obtidos na simulação.

### 6.1.3 O NetAnim e o Wireshark

O ns-3 é compatível ainda com a ferramenta gráfica NetAnim [25]. Essa ferramenta utiliza um arquivo de *trace XML* (*Extensible Markup Language*) coletado durante a simulação que permite, entre outras coisas, a visualização dos pacotes através de enlaces com e sem fio, das estatísticas de posição dos nós com plotagem de trajetória e da topologia do cenário estudado. Um exemplo de utilização neste trabalho está ilustrado na Figura 6.1. Nela pode-se visualizar o funcionamento do tráfego de pacotes, a topologia da rede e o posicionamento dos nós para a simulação com o módulo LR-WPAN simulando o ZigBee. Os nós de 0 a 143 representam os dispositivos finais e os nós 144 e 145 representam, respectivamente, o GW e o servidor de rede.

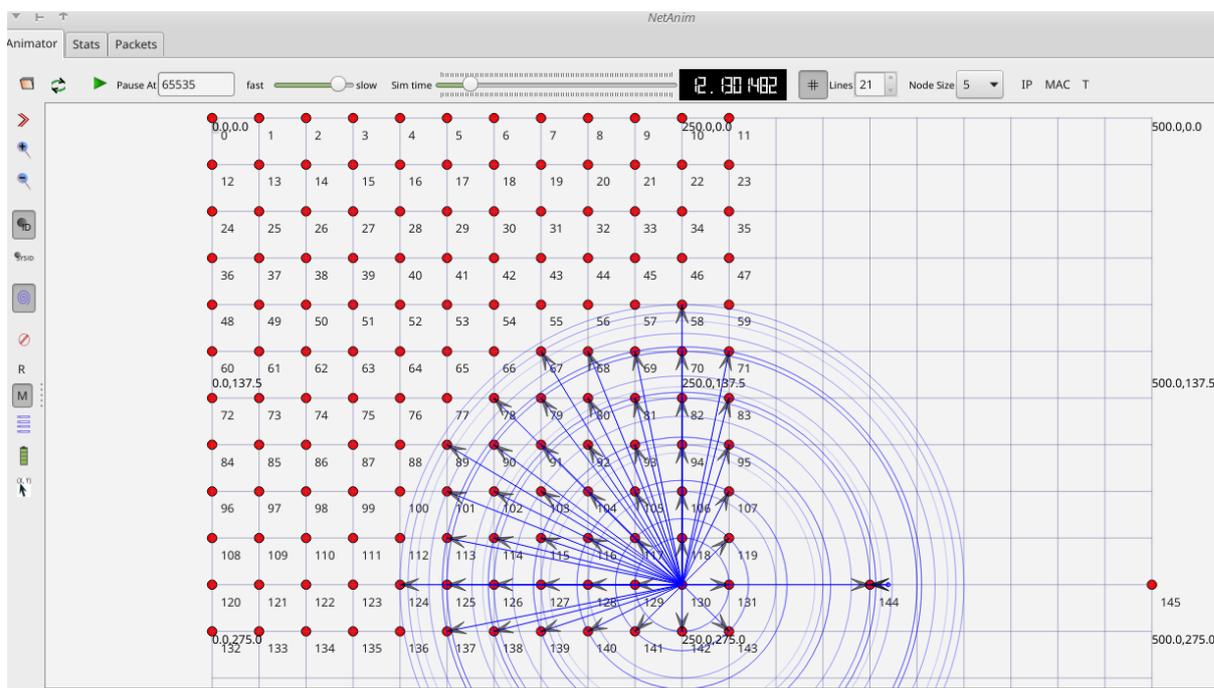


Figura 6.1: Ambiente gráfico do NetAnim que ilustra a topologia da rede.

Outra ferramenta muito importante utilizada neste trabalho foi o analisador de protocolos de rede *Wireshark* [30]. Sua utilização permitiu a confirmação do funcionamento do encaminhamento de pacotes, dos endereçamentos e do roteamento para o ZigBee nas etapas de modelagem e configuração da rede. Na Figura 6.2 pode-se ver uma ilustração da utilização dessa ferramenta no contexto das simulações. O item 1 representa os endereços de origem e destino de um pacote UDP. No item 2, pode-se visualizar os protocolos

UDP e ICMPv6 funcionando juntamente com os demais protocolos que fazem parte do ZigBee. No item 3, é possível visualizar também a presença do protocolo 6LoWPAN. A funcionalidade de dissecação de pacotes LoRa no *Wireshark* ainda passa por uma fase de implementação, não tendo sido possível utilizá-la nas análises com o módulo LoRaWAN. Felizmente a implementação do módulo fornece a opção de geração de *logs* que permitem compreender e analisar o funcionamento e comportamento da rede.

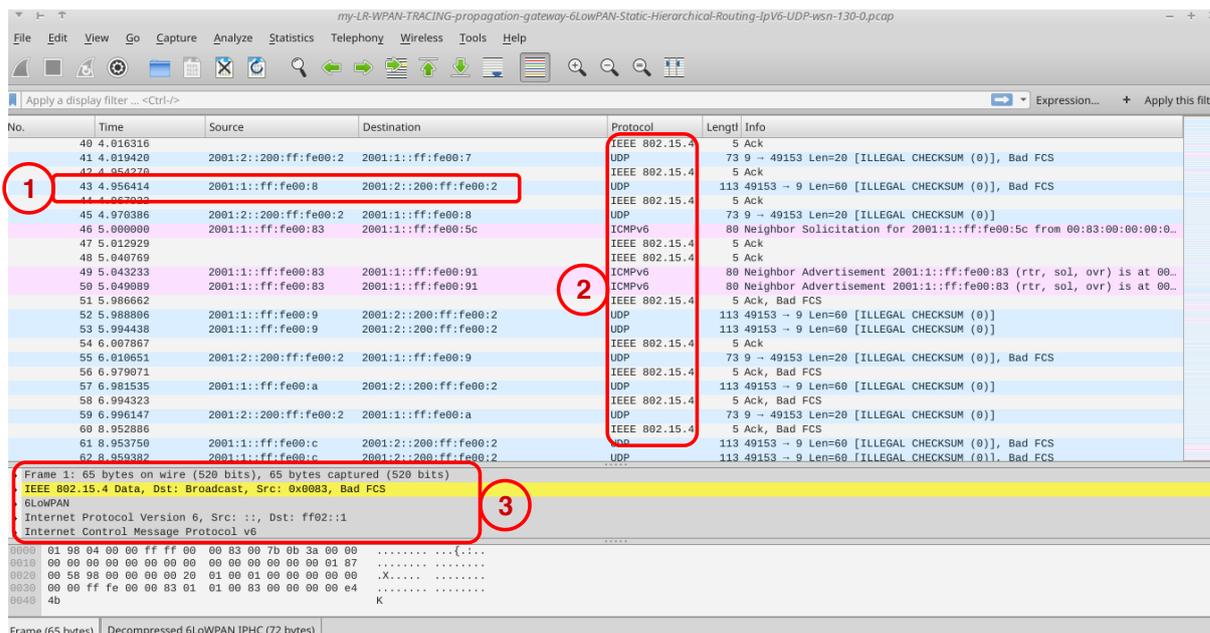


Figura 6.2: Análise de tráfego do ZigBee com o analisador de protocolos de rede *Wireshark*.

## 6.2 Configuração do cenário

A simulação em estudo modela uma aplicação inspirada em projetos de IoT no subdomínio de monitoramento de vinhedos. A topologia é composta por 146 nós que incluem 144 dispositivos finais representando conjuntos sensor/atuador distribuídos em um ambiente em campo aberto (*outdoor*) de  $325 \times 325 \text{ m}^2$  (aproximadamente 10,5 hectares), um GW e um servidor. Essa aplicação modela um cenário hipotético com requisitos semelhantes àqueles descritos no capítulo anterior baseando-se nos trabalhos práticos de [13] e [117] e nos experimentos de simulação realizados por [88] e [132].

Do primeiro e segundo trabalhos foram adaptados, respectivamente, o tipo de aplicação e o mapa conceitual em grade propostos. Em [13], a aplicação real de monitoramento de vinhedos utilizou uma WSN densa de 65 nós sensores distribuídos em uma área de cerca de dois acres (menor que um hectare) funcionando durante 6 meses na coleta de dados de temperatura e telemetria referentes ao desempenho da bateria, perda de pacotes

e roteamento enviados na rede a cada 5 minutos, um tempo três vezes mais frequente que em aplicações convencionais. O objetivo do trabalho foi descobrir maneiras pelas quais este tipo de configuração poderia propiciar um retorno sobre o investimento. Segundo os autores, este tipo de aplicação requer uma distribuição densa de sensores, principalmente em regiões onde a temperatura varia com maior frequência podendo causar prejuízos de longo prazo. No segundo trabalho, os autores avaliam um cenário rural com foco na agricultura de precisão utilizando uma WSN composta por 6 nós sensores dispostos em uma área de lavoura irrigada de 300 m x 300 m (9 hectares), contendo no centro um pivô de irrigação com raio de 300m. O experimento prático realizado serviu para monitorar e coletar dados de umidade do solo com intervalos de coletas de 15 minutos por um período de 90 dias. Foram analisados ainda outros eventos relacionados à qualidade da comunicação e eventos do ambiente que afetaram o funcionamento das WSNs. Este experimento serviu como proposição para o modelo de arquitetura de comunicação utilizada na presente dissertação, cujas vantagens esperadas são a estabilidade da rede, autonomia dos setores para tomada de decisão, o gerenciamento mais efetivo por parte do *gateway* e uma visão clara dos ambientes monitorados para uma tomada de decisão global.

Do terceiro e quarto trabalhos foram adaptados, respectivamente, a topologia em árvore hierárquica utilizada na rede ZigBee simulada na presente dissertação e as avaliações de métricas da aplicação de monitoramento de vinhedos. Em [88], realizou-se uma simulação de uma WSN com mesmas dimensões do trabalho em [117]. Neste último caso a área foi dividida em 9 quadrantes compostos por 100 nós distribuídos com o foco de definir e avaliar as regras de funcionamento relativas à melhor configuração para a montagem de uma WSNs hierárquica. Foi identificada a quantidade de nós sensores necessários para cobrir toda a área de monitoramento, incluindo questões de consumo energético que auxiliam a tomada de decisão. No quarto trabalho o autor utilizou o ns-2 para simular e analisar WSNs aplicadas no monitoramento de vinhedos. Neste trabalho, o autor realizou três experimentos com 48, 60 e 168 nós distribuídos numa área simulada de 100 m X 100 m (1 hectare) com espaçamentos entre nós sensores de 7 em 7 metros; 10 em 10 metros e 12,5 em 12,5 metros, respectivamente, buscando identificar qual a melhor densidade de nós WSN para este tipo de aplicação, analisando as métricas de atraso médio e de perda de pacotes sobre os protocolos de roteamento AODV (*Ad-hoc On Demand Distance Vector*) e DSDV (*Destination-Sequenced Distance-Vector Routing*).

Na presente dissertação, os 144 dispositivos finais representam estações de coleta para *uplink* e *downlink* de dados micrometeorológicos visando uma análise operacional da rede com objetivos específicos de obter métricas de atraso médio e perda de pacote

Tabela 6.1: Dados que seriam coletados pelos sensores da aplicação em um ambiente real

Tipo de Dado	Estimativa do tamanho dos pacotes de dados
Nível de bateria	2 <i>bytes</i>
Precipitação	2 <i>bytes</i>
Temperatura do sensor	2 <i>bytes</i>
Temperatura do ar	2 <i>bytes</i>
Umidade relativa do ar	2 <i>bytes</i>
Umidade relativa do solo	2 <i>bytes</i>
Velocidade e direção do vento	2 <i>bytes</i>
Ponto de orvalho	2 <i>bytes</i>
Nível de água	2 <i>bytes</i>
Temperatura foliar	2 <i>bytes</i>
Insolação	2 <i>bytes</i>
Radiação solar	2 <i>bytes</i>
Posição dos nós	2 <i>bytes</i>
Total de <i>bytes</i>	26 <i>bytes</i>

em um cenário específico para esse fim. Na aplicação simulada, após o UL dos pacotes contendo os dados coletados, os dispositivos finais recebem como respostas mensagens de DL, que poderiam conter comandos vindos do servidor para que os atuadores realizem, por exemplo, a irrigação inteligente. Os dados coletados e enviados em uma aplicação prática poderiam incluir para nós distintos, medidas de temperatura e umidade relativa, velocidade e direção vento e demais medidas apresentadas na Tabela 6.1. A ideia principal é que neste tipo de aplicação o servidor de rede trabalhe com o cruzamento de dados de forma colaborativa, combinando dados coletados em sua área de atuação com dados recebidos de outras redes em áreas rurais próximas e/ou de estações oficiais. Assim, às medições realizadas se somariam as previsões oficiais auxiliando na abrangência das previsões meteorológicas de microclimas para regiões de interesse, beneficiando projetos de AP na redução do desperdício de água e energia, além de danos ao meio ambiente, visto que essa aplicação poderia ajudar na precisão das medições baseadas em parâmetros ambientais. Este tipo de sistema de monitoramento agrícola poderia ainda registrar e armazenar toda a informação coleta para estabelecer um sistema de banco de dados agrícola que fornecesse análises do crescimento da cultura e da previsão da colheita por meio de padrões e mudanças medidos pela variabilidade temporal nas condições das áreas rurais. As WSNs são uma boa opção para coletar grandes quantidades de dados climáticos de forma integrada e praticamente sem a intervenção humana auxiliando, por exemplo, na melhoria dos modelos de previsão do tempo. Para isso é necessária a implantação de mais micro estações de monitoramento de forma integrada, pois aumentando-se a quantidade de dados analisados a precisão dos modelos pode ser melhorada [132].

Após a definição dos requisitos da aplicação e do cenário pretendido, foram utilizadas as classes C++ de exemplo disponíveis nos repositórios do ns-3 para o módulo LR-WPAN

e nos repositórios do GitHub para o módulo LoRaWAN. Essas classes serviram como modelo e embasaram as configurações e modificações necessárias para as especificidades do projeto. Estas modificações, em conjunto com APIs relacionadas, permitiram recriar, entre outras coisas, para cada uma das tecnologias:

- a topologia da rede
- a configuração dos enlaces e canais de comunicação
- os modelos de atraso e perda por propagação e encaminhamento
- os dispositivos finais, GW e servidor
- os modelos de mobilidade
- as atribuições de endereços (IPv6 para o ZigBee, os identificadores de rede — *Network Identifiers* - NwkID — e os endereços de rede — *Network Address* - NwkAddr — para o LoRaWAN)
- a geração do tráfego de dados e a estruturação da rede e dos protocolos de comunicação das aplicações
- a coleta de dados para extração de resultados

Os nós representados no ns-3 foram distribuídos e numerados de 0 a 145, com uma distância de 25 m entre os dispositivos finais, conforme ilustram as Figuras 6.3 e 6.4. A maior distância direta entre um nó e o GW foi de 430,3 m (nó 0) e a menor distância foi de 76,4 m (nó 131). Os dispositivos finais (nós 0 a 143) nas diferentes localizações da área rural foram configurados para transmitir periodicamente dados coletados que simularam pacotes de 60 *bytes* incluindo os endereços e portas de origem e destino dos nós. Estes pacotes eram então enviados ao GW (nó 144) e deste para o servidor (nó 145) com um intervalo de tempo de 1 segundo entre um nó e o nó seguinte na ordem de numeração — evitando que todos os dispositivos estivessem sincronizados. O intervalo de envio entre pacotes coletados por um mesmo dispositivo final foi de 10 minutos, correspondendo ao envio/recepção de 288 pacotes/dia (144 UL/144 DL), considerando que após o recebimento do pacote o servidor responde ao dispositivo final com um outro pacote de 20 *bytes* simulando o envio de pacotes *ACK*, endereços e portas de origem e destino e/ou comandos para irrigação pelos atuadores presentes nos dispositivos finais. Demais parâmetros são descritos na Tabela 6.2.

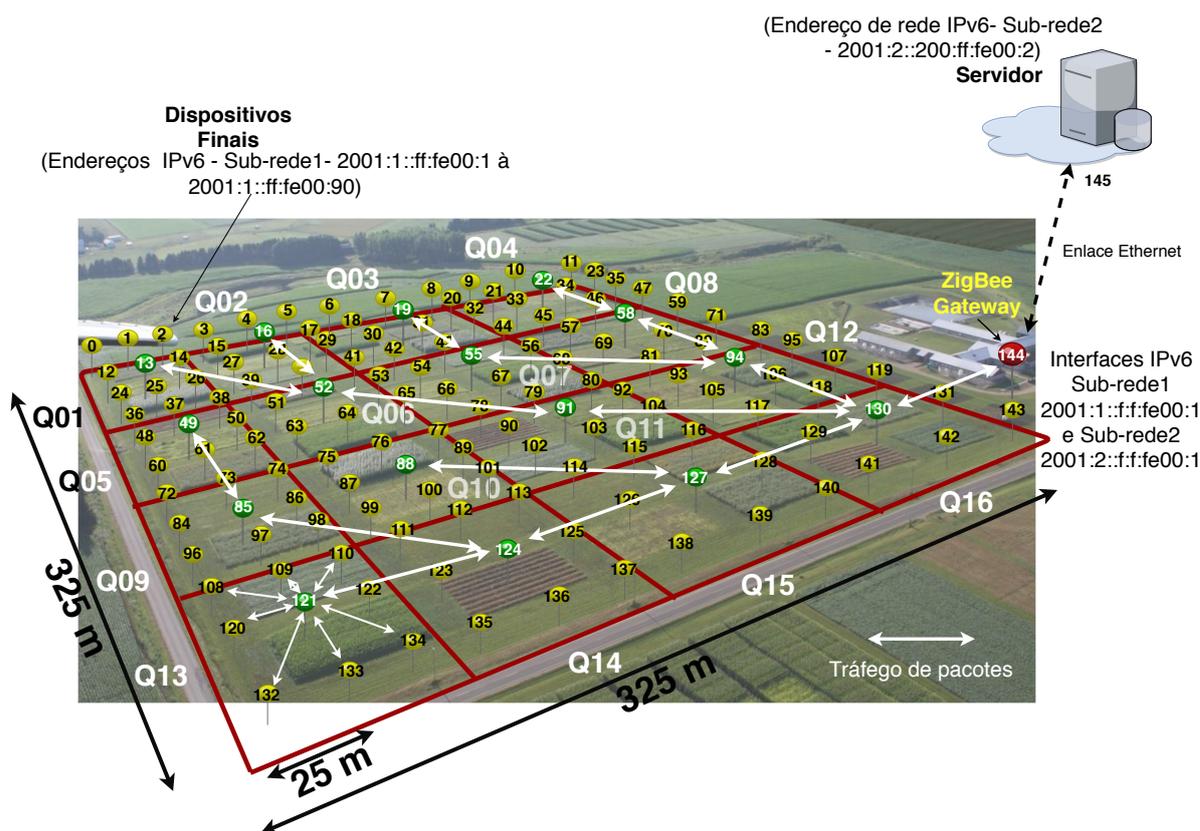


Figura 6.3: Representação da rede para o ZigBee ilustrando o encaminhamento e recepção de pacotes nos dezesseis quadrantes.

### 6.2.1 Configurações da simulação no módulo *Low-Rate Wireless Personal Area Network*

Na simulação realizada com o módulo LR-WPAN no ns-3 a mesma área foi modelada e dividida em dezesseis quadrantes (Q1 a Q16), de forma a garantir o alcance da comunicação entre os dispositivos ZigBee. A topologia escolhida foi a de árvore com roteamento hierárquico. O roteamento de pacotes foi realizado pelos nós centrais de cada quadrante (nós 13, 16, 19, 22, 49, 52, 55, 58, 85, 88, 91, 94, 121, 124, 127 e 130) ilustrados com a cor verde na Figura 6.3. Assim como descrito na arquitetura proposta por [117], os nós centrais de cada quadrante têm a função de gerenciar e transmitir dados coletados no seu quadrante. Para fazer isto, eles mantêm uma tabela com todos os endereços dos nós coletores, além dos valores de identificação de todos os outros nós centrais com quem se relaciona no caminho da comunicação. Desta forma, a distância máxima entre os nós centrais com garantias de conexão para o enlace ZigBee foi de aproximadamente 106 m. Os pacotes recebidos pelos nós centrais são então encaminhados até o GW (nó 144, na cor vermelha) como ilustrado para o nó central 121 presente no quadrante Q13 da Figura

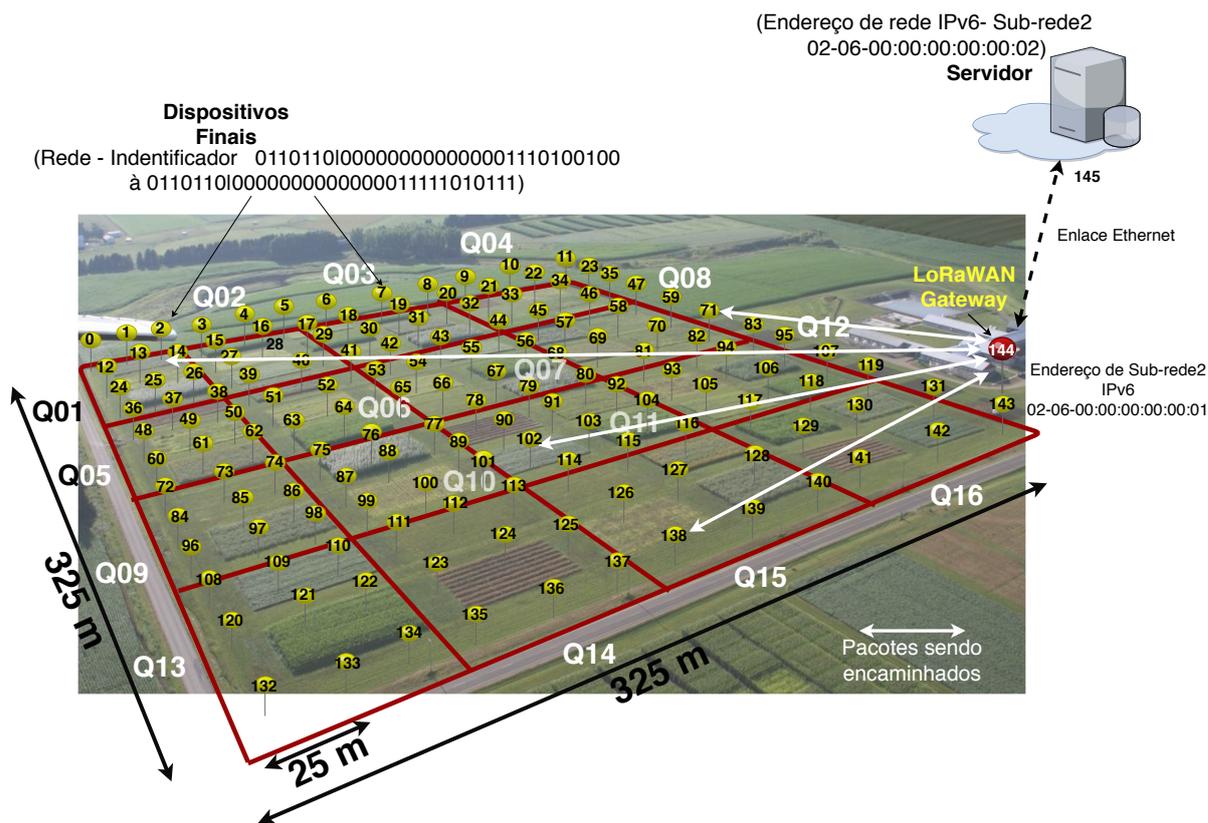


Figura 6.4: Representação da rede LoRaWAN ilustrando o encaminhamento e recepção diretas para os dispositivos finais 13, 71, 102 e 138  $\leftrightarrow$  Gateway.

6.3. Este nó é responsável por receber e reenviar os pacotes oriundos/destinados aos nós 108, 109 110, 120, 122, 132, 133 e 134. Estes últimos nós, mesmo estando com visada e alcance de transmissão para outros nós de outros quadrantes, só se comunicam com o nó 121, garantindo assim a autonomia dos quadrantes. Uma das vantagens desta abordagem é que as mensagens não precisam ser inundadas por toda a rede tornando-a bastante escalável. No entanto, uma desvantagem pode ocorrer caso um dos nós centrais sofra alguma falha, fato que poderia impedir a comunicação de diversos dispositivos finais, degradando o desempenho da rede. Para contornar tal situação poder-se-ia utilizar um protocolos de roteamento como AODV e DSDV capazes de encontrar automaticamente as melhores rotas disponíveis.

Os dispositivos finais são representados por nós do tipo RFD e FFD, sendo estes últimos os nós responsáveis por atuar como roteadores no reencaminhamento das mensagens advindas dos nós RFD. A configuração dos endereços IPv6 dos dispositivos da rede ZigBee está descrita na Tabela 6.3. Na Figura 6.5 estão representadas as camadas e protocolos implementados no módulo para cada dispositivo final, no GW e no servidor da rede ZigBee.

Tabela 6.2: Parâmetros utilizados na simulação

Parâmetros	LR-WPAN	LoRaWAN
Topologia	Árvore	Estrela
Modelo de mobilidade	Estático	Estático
Nº de nós (incluindo GW e Servidor)	145	145
Área	(325mX325m) $\approx$ 10,5 ha	(325mX325m) $\approx$ 10,5 ha
Distância entre nós	25m	25m
Duração	24h	24h
Largura de banda	32 MHz	125 kHz
Frequência	2,4 GHz	868 MHz
Taxa de transmissão	250 Kb/s	50 Kb/s
Tamanho do pacote de <i>upload</i>	60 <i>bytes</i>	60 <i>bytes</i>
Tamanho do pacote de <i>download</i>	20 <i>bytes</i>	20 <i>bytes</i>
(Nº pacotes enviados/recebidos por nó)/24h	288 (144 UL/144 DL)	288 (144 UL/144 DL)
Intervalo de tráfego entre nós vizinhos	1 seg	1 seg
Intervalo de geração de tráfego por nó	10 min	10 min
Nº de simulações realizadas	30	30

Tabela 6.3: Configuração dos endereços IPv6 da rede ZigBee

Equipamentos de Rede	Endereço de Sub-rede	Nós
Dispositivos finais	2001:1::ff:fe00:1 à 2001:1::ff:fe00:90	0 à 143
<i>Gateway</i>	2001:1::ff:fe00:91 e 2001:2::200:ff:fe00:1	1 e 2
Servidor	2001:2::200:ff:fe00:2	1

### 6.2.2 Configurações da simulação no módulo LoRaWAN no ns-3

Para avaliar o desempenho do padrão LoRaWAN no ambiente *outdoor* em questão, diferente do que aconteceu com o ZigBee, devido ao alcance maior do LoRaWAN, pode-se considerar que todos os nós estão com linha de visada (*Line of Sight* - LoS). Foi necessário configurar parâmetros de rede para o módulo LoRaWAN que incluíram um dos principais parâmetros da modulação, o fator de espalhamento (*Spreading Factor* - SF). O LoRa opera com SF variando de 7 a 12, sendo que a cada aumento do SF duplica-se o tempo no ar para transmitir a mesma quantidade de dados [37]. A escolha do SF influencia fortemente o alcance da transmissão, sendo que um valor maior significa uma maior distância com robustez à interferência ou ao ruído. Em compensação a taxa de transmissão de dados é reduzida.

Nas simulações realizada com os dois padrões as distâncias máximas de alcance entre os nós em questão não ultrapassaram 430 m. Conseqüentemente, no cenário com o LoRaWAN todos os nós foram configurados para selecionar automaticamente o SF 7. São três as larguras de banda possíveis para utilização neste padrão (125, 250 ou 500 kHz), cada uma correspondendo a uma taxa de transferência, dependendo também do SF escolhido. Na simulação, o módulo já está pré-configurado para utilizar a largura de banda de 125 kHz que, conforme documentação disponível em [80], corresponde a taxa de transmissão de 6835 bits/s com SF 7. O *duty cycle* segue a normatização do padrão e vem configurado

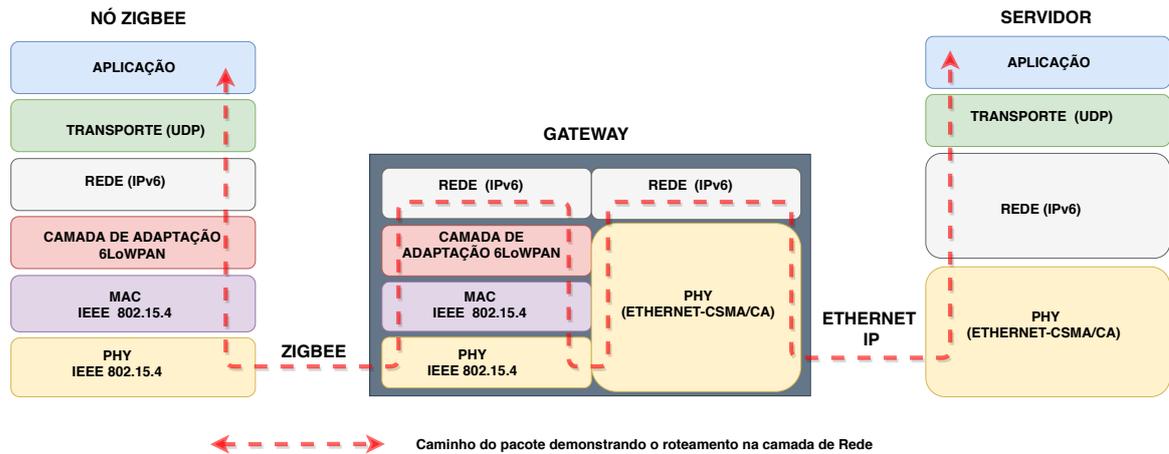


Figura 6.5: Representação das camadas e protocolos dos nós simulados na rede ZigBee.

com o valor de 1%, significando a porcentagem máxima de tempo que um nó pode transmitir com uma potência de 14 dBm no período de uma hora. Quanto à parametrização da frequência, o módulo só oferece até o momento configurações baseadas nas regulamentações locais da UE. A faixa de frequência de 868 MHz é dividida igualmente, resultando em canais com frequências centrais de 868,1, 868,3 e 868,5 MHz, com, respectivamente, 3, 3 e 2 canais de recepção do GW que são escolhidos aleatoriamente durante a transmissão. A Figura 6.6 representa as camadas e protocolos dos nós simulados para cada dispositivo final, no GW e no servidor da rede LoRaWAN.

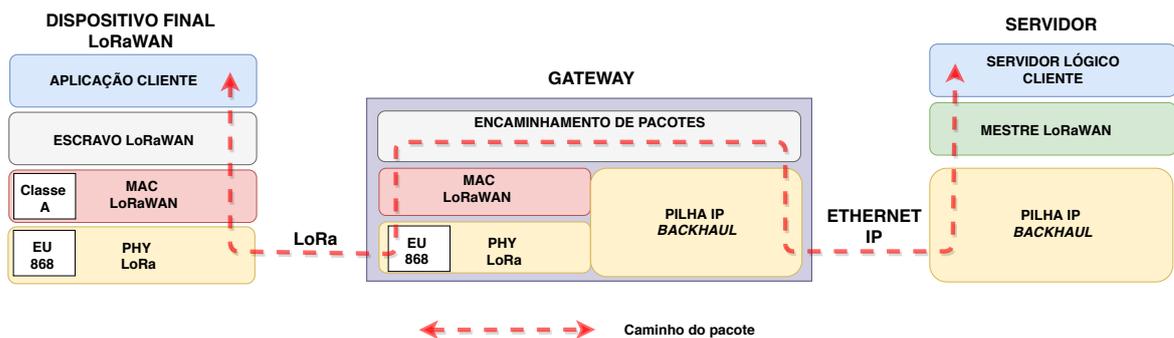


Figura 6.6: Representação das camadas e protocolos dos nós simulados na rede LoRaWAN.

Os dispositivos finais modelados no módulo foram adaptados para gerarem tráfego de acordo com as necessidades da simulação em estudo. Mas, diferente da configuração realizada no módulo LR-WPAN, nesta não foi necessário utilizar nós retransmissores, visto que, conforme ilustra a Figura 6.4, os dispositivos finais se encontram ao alcance do GW formando um par transmissor-receptor na topologia estrela. Os endereços da rede LoRaWAN estão descritos na Tabela 6.4. Os endereços correspondem ao identificador

de 32 bits do dispositivo final (*Device Address* - DevAddr) numerados com um valor binário em ordem crescente, os primeiros 7 dígitos representam o endereço de rede e os dígitos restantes correspondem ao identificador do dispositivo. *Gateway* e servidor possuem endereços IPv6 para comunicação via Ethernet.

Tabela 6.4: Configuração dos endereços e identificadores da rede para o padrão LoRaWAN

Equipamentos de Rede	Endereço	Nós/interfaces
Dispositivos finais	0110110 00000000000000011101001000 à 0110110 00000000000000011111010111	0 à 143
<i>Gateway</i>	02-06-00:00:00:00:01	1
Servidor	02-06-00:00:00:00:02	1

### 6.2.3 Limitações

Para cada um dos módulos que simulam as tecnologias objetos de estudo, foi necessário configurar enlaces, métodos de acesso, protocolos e algoritmos para a comunicação entre os dispositivos, de acordo com as especificações dos respectivos padrões avaliados. Este trabalho não pôde considerar ainda o fato de que culturas agrícolas diferentes podem apresentar resultados diferentes para cada rede de comunicação, dependendo entre outras questões, do tipo de folhagem [100]. Uma das alternativas para contornar esta limitação foi considerar o fato de que projetos de redes em áreas rurais envolvendo comunicações sem fio têm comumente como característica grandes campos abertos e grandes distâncias a serem percorridas pelos dados no meio sem fio. Dessa forma, o modelo de perda de propagação disponível no simulador ns-3 que mais se aproximou desta consideração foi o *Two-Ray Ground*. Este modelo permite avaliar as perdas decorrentes da propagação do sinal entre uma antena transmissora e uma antena receptora quando elas estão em LoS [15]. Além disso, ambos os padrões simulados possibilitam em implementações reais a parametrização de mecanismos de segurança. No entanto, estas opções não estão implementadas em nenhum dos módulos utilizados nas simulações neste estudo.

#### 6.2.3.1 Limitações específicas do módulo LR-WPAN no ns-3

O módulo LR-WPAN no ns-3 não implementa todas as características do ZigBee. Uma das ausências é o coordenador de rede, simulações abstraem as atribuições do coordenador como a associação, sincronização (*slotted CSMA/CA*), *beacons*, comandos e segurança, considerando que após a configuração do módulo todos os nós já estão associados e prontos para os endereçamentos e geração de tráfego na rede. Outro aspecto ainda em desenvolvimento é a possibilidade de utilização do *low duty cycle* e medições de energia sobre os

protocolos do ZigBee.

### 6.2.3.2 Limitações específicas do módulo LoRaWAN no ns-3

Conforme discutido na Capítulo 4, nas implementações reais com o LoRaWAN é previsto que o GW pode solicitar aos dispositivos finais que estes modifiquem não somente o SF empregado, mas também a taxa de transmissão ideal para comunicação por meio do ADR (*Adaptative Data Rate*). Neste caso, o SF pode ser aumentado e a taxa de transmissão diminuída caso a margem da relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* — SNR) seja muito baixa, valendo-se do mesmo artifício para as situações opostas [80]. Esse comportamento pode otimizar a capacidade do canal. Entretanto, como a ADR ainda não possui um algoritmo padronizado, este mecanismo ainda não está disponibilizado no módulo.

## 6.3 Parâmetros de avaliação, execução e métricas

Após a realização das configurações possíveis no ns-3, procedeu-se com a execução das simulações. Como resultado, foram obtidos arquivos de *trace* e *logs* gerados pelos eventos de transmissão e recepção de pacotes. Estes forneceram dados necessários para extração dos resultados e conclusões discutidas a seguir. O foco da análise de desempenho neste trabalho se concentrou em métricas e medidas estatísticas recorrentes em estudos de redes de comunicação: o atraso médio ou latência fim-a-fim e a taxa de entrega de pacotes. O objetivo é medir o desempenho no encaminhamento de dados caracterizados desde a geração do pacote na camada de aplicação no nó de origem até a recepção deste pacote na camada de aplicação no nó de destino e entender como restrições decorrentes podem afetar o desempenho geral da rede.

Para conferir significância, a metodologia estatística utilizada considerou na obtenção e interpretação dos resultados a média e o intervalo de confiança dos valores medidos. Foram realizadas 30 rodadas de simulações com diferentes sementes de aleatoriedade e intervalos de confiança de 95%, sendo que cada rodada representou um ciclo de trabalho de 24 horas da aplicação, considerando os parâmetros descritos na Tabela 6.2. Na etapa final do projeto todos os dados coletados foram tabulados considerando os fluxos de cada nó e seus respectivos valores de atraso médio e taxa de entrega de pacotes para as 30 simulações. Por fim, foram gerados todos os gráficos discutidos na próxima seção.

### 6.3.1 A coleta de dados e os *scripts* de análise

As simulações com o módulo LR-WPAN utilizaram o *framework* estatístico *FlowMonitor* disponível para o ns-3 com objetivo de medir o desempenho dos protocolos de rede. Instanciado diretamente no *script* de simulação, este *framework* permite, em tempo de execução, para cada fluxo, rastrear, coletar e medir vários parâmetros para os pacotes trocados pelos nós. Ao final, as estatísticas são exportadas para um arquivo no formato XML. Para o módulo LoRaWAN foram utilizados *logs* nativos do ns-3 disponíveis nos *scripts* de simulação que podem ser gerados ao se habilitar as opções *LogComponents*.

#### 6.3.1.1 A Linguagem AWK

O AWK [23] é uma linguagem procedural interpretada que pode ser utilizada como uma ferramenta de extração e geração de relatórios de dados. Como nem todas as métricas necessárias podem ser extraídas diretamente dos arquivos de *trace* gerados pelo *FlowMonitor* e pelos *logs*, o AWK foi utilizado no desenvolvimento de *scripts* elaborados especificamente para extrair e tabular somente as métricas desejadas. Através do *FlowMonitor* gerado nas simulações com o módulo LR-WPAN, os *scripts* gerados no AWK possibilitaram calcular a taxa de entrega de pacotes e o atraso médio expresso como:

$$AtrasoMedio = \frac{SomaAtrasos}{PacotesRecebidos}; \quad (6.1)$$

onde *SomaAtrasos* é a soma dos atrasos para um fluxo ponta-a-ponta dividido por *PacotesRecebidos*, o total de pacotes recebidos durante o fluxo da transmissão.

A taxa de entrega de pacotes, calculada através da Equação (6.2), é taxa entre o número de pacotes recebidos pelo receptor e o número de pacotes enviados pelo transmissor:

$$TaxaDeEntrega = \frac{PacotesRecebidos}{PacotesRecebidos + PacotesPerdidos} \quad (6.2)$$

onde *PacotesRecebidos* indica o número de pacotes recebidos e (*PacotesRecebidos* + *PacotesPerdidos*) o número total de pacotes enviados para o nó.

## 6.4 Resultados

A análise dos resultados buscou avaliar a capacidade e o desempenho da WSN utilizando distintamente os padrões ZigBee e LoRaWAN para lidar com comunicações em um cenário com um alto tráfego de pacotes em uma rede sem fio distribuída em um campo aberto (*outdoor*), semelhante àqueles comumente encontrados nas áreas rurais. Com isso, buscou-se entender como a rede se comporta diante da ocorrência de um tráfego de pacotes razoavelmente grande introduzido pelos diversos nós.

Cada rodada de simulação produziu uma de média de 4000 amostras para cada um dos 288 fluxos (somados UL e DL) gerados por cada nó sensor em cada uma das 30 rodadas de simulação. Estas amostras possibilitaram calcular para o ZigBee o intervalo de confiança de 95% para a média de atrasos e das taxas de entrega e plotar os gráficos representados a seguir. Nos experimentos com o padrão LoRaWAN, devido às pequenas distâncias entre os nós da rede, as variações foram pouco significativas para medições realizadas com o módulo fazendo com que os intervalos de confiança calculados não produzissem resultados significativos. Por isso, estes não foram representados nos gráficos.

### 6.4.1 Atraso Médio

Os gráficos das Figuras 6.7 a 6.17 apresentam os resultados obtidos para as métricas de atraso médio em milissegundos (ms) em relação ao posicionamento e às respectivas distâncias geográficas, em metros, de cada um dos dispositivos finais até o GW. Embora o número de saltos seja menor para o padrão LoRaWAN — já que as distâncias máximas de comunicação representadas para os dispositivos finais em relação ao GW são de pouco mais de 400 m, considerada uma distância pequena em relação às possibilidades de alcances de quilômetros da tecnologia — resultados importantes foram obtidos principalmente para aplicações de IoT na AP que necessitem utilizar comunicações de DL que ocorrem no sentido servidor → dispositivo final.

A Figura 6.7 representa o gráfico de dispersão dos atrasos médios para cada nó no encaminhamento de pacotes UL coletados nos dispositivos finais e enviados para o servidor pela rede ZigBee. Ele demonstra a latência em relação ao posicionamento dos nós e suas respectivas distâncias ao GW. O eixo horizontal mostra as distâncias geográficas de cada nó até o GW, enquanto a linha preta representa a linha de tendência que ajuda a demonstrar a correlação (crescente ou decrescente) entre o atraso médio e a distância dos nós.

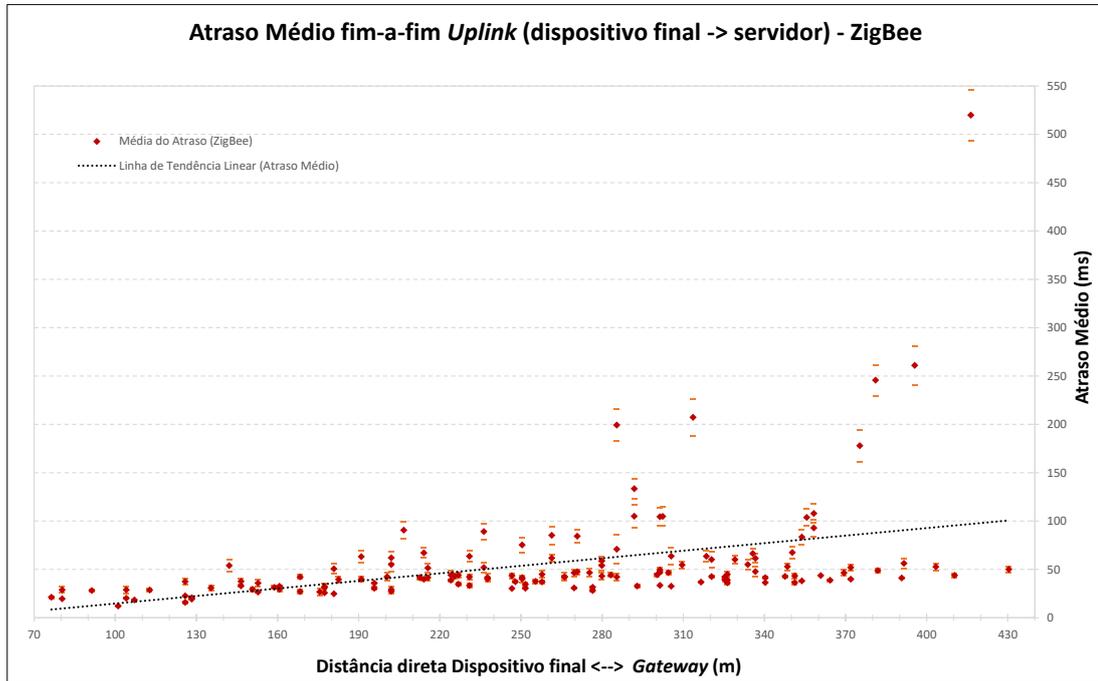


Figura 6.7: Gráfico de dispersão dos valores médios de atraso (UL) na WSN para o padrão ZigBee.

Observa-se que os nós localizados no quadrante mais próximo ao GW (Q16), a aproximadamente 76 m (nó 131) e 80 m (nós 119 e 143), apresentaram alguns dos menores atrasos médios entre os dispositivos finais da rede, 21,23 ms, 28,89 ms e 19,63 ms, respectivamente. Já os nós localizados a cerca de 416 m (nó 12), 395 m (nó 13) e 381 m (nó 48), que estão posicionados nos quadrantes Q1 e Q5, os mais distantes do GW, obtiveram alguns dos maiores atrasos médios entre todos os outros nós da WSN, 519,88 ms, 245,65 ms e 261,03 ms, respectivamente.

A linha de tendência em destaque no gráfico ajuda a ilustrar a correlação entre o atraso médio e a distância dos nós que pode ser calculada utilizando-se o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), que quantifica a força de associação linear entre duas variáveis de uma dada amostra, onde  $(-1)$  significa uma correlação negativa perfeita (ou seja, se uma variável aumenta, a outra sempre diminui). O valor  $0$  representa que as duas variáveis não apresentam correlação linear e um valor de  $r$  igual a  $(+1)$  significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis [97]. Na simulação em estudo o resultado demonstrou uma correlação positiva  $r$  igual a 0,401641933. Segundo a quantificação de Pearson, considera-se que este valor descreve uma baixa correlação. Desta forma, a correlação entre

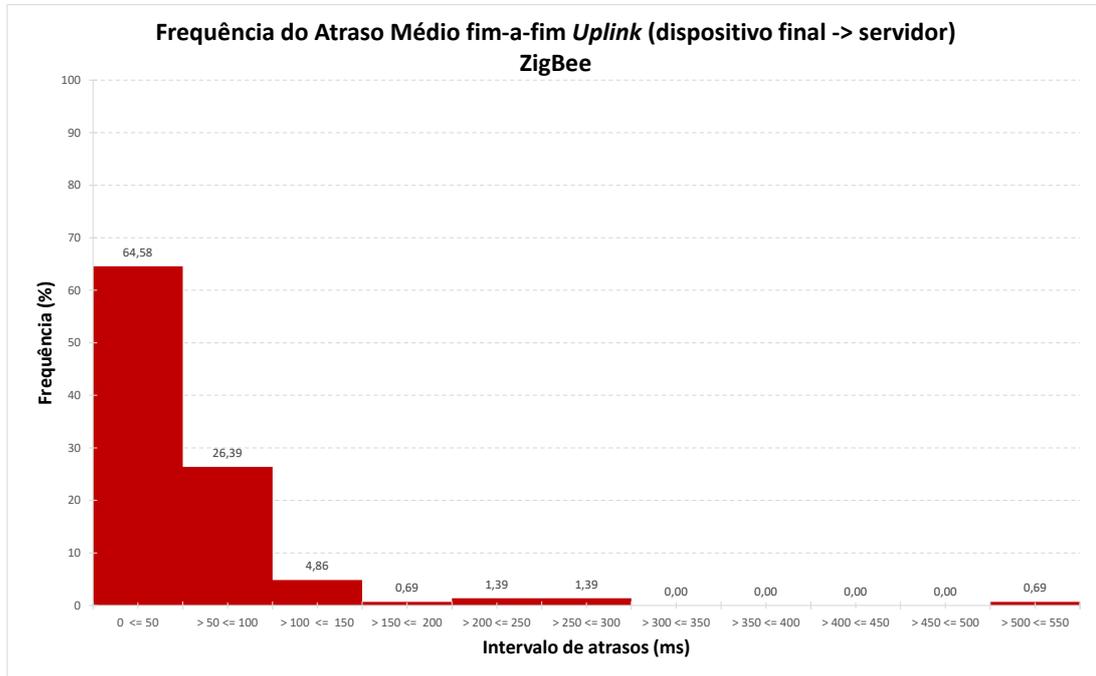


Figura 6.8: Frequência do atraso de UL na rede ZigBee.

as variáveis não deve ser considerada como regra, visto que, alguns nós mais próximos ofereceram uma latência maior que outros mais distantes do GW, como acontece com o nó 4 (localizado no quadrante Q2), mais distante do GW que o nó 90 (localizado no quadrante Q11). Estes nós, localizados, respectivamente, a distâncias de aproximadamente 353 m e 214 m do GW, obtiveram, atrasos médios de cerca de 38,33 ms e 67,15 ms.

Pode-se verificar também no gráfico da Figura 6.8 que cerca de 64 % dos dispositivos finais obtiveram atrasos médios de até 50 ms, totalizando em cerca de 91 % aqueles que ofereceram atrasos médios menores do que 100 ms. O nó 12, que se encontra no quadrante mais distante, foi o dispositivo final com o maior atraso médio, aproximadamente 520 ms, com intervalo de confiança de [493-546] ms, representando menos de 1 % dos nós da rede.

Os gráficos das Figuras 6.9 e 6.10 fornecem a ilustração para o comportamento da latência no sentido contrário ao apresentado anteriormente. Neste caso as análises consideraram o atraso médio fim-a-fim no encaminhamento de pacotes de DL no sentido servidor → dispositivos finais na rede ZigBee.

A análise do gráfico da Figura 6.9 apresenta ocorrências de latência até 25% menores comparadas ao sentido oposto. O gráfico da Figura 6.10 demonstra que, neste sentido,

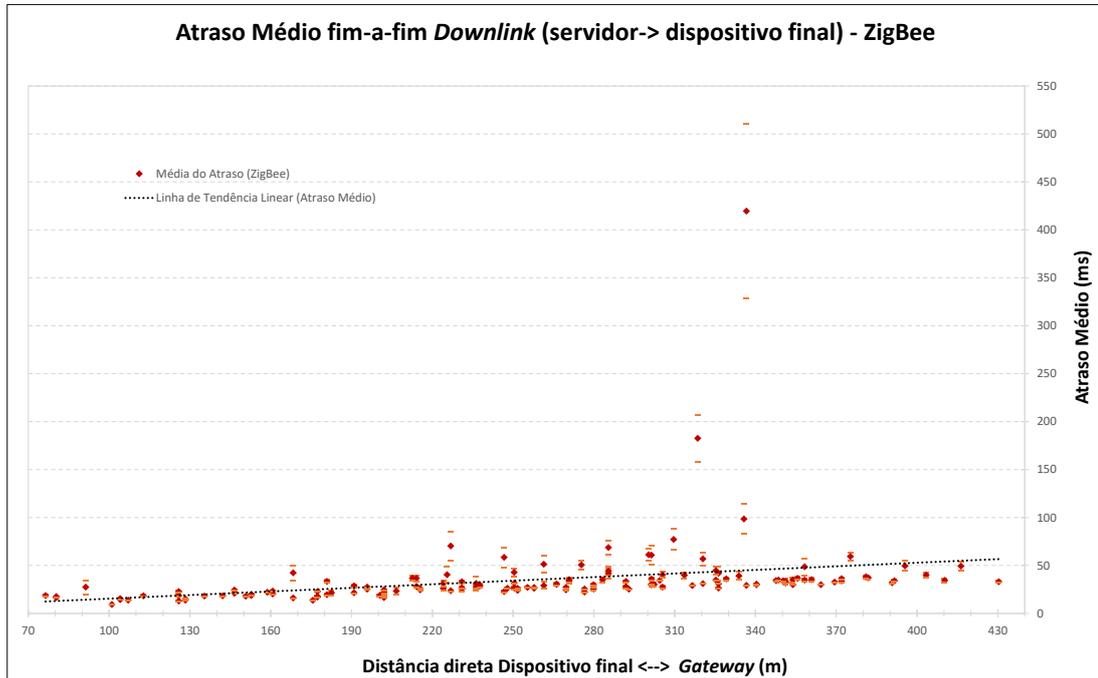


Figura 6.9: Gráfico de dispersão dos valores médios de atraso (DL) na WSN para o padrão ZigBee.

cerca de 91 % dos pacotes direcionados sofreram atrasos médios variando entre 9 a 50 ms. Neste caso, menos de 2% dos nós sofreram atrasos médios maiores do que 100 ms, sendo que o nó 5 foi o dispositivo final com o maior atraso médio, cerca 419 ms, com um intervalo de confiança de [328-510] ms. Nesta análise, semelhante ao que ocorreu com a anterior, verifica-se uma baixa correlação do atraso em relação às distâncias dos nós. O coeficiente de correlação  $r$  calculado neste caso foi de 0,284590231, menor que o medido na análise anterior.

O atraso médio na entrega de pacotes UL no sentido dispositivo final  $\rightarrow$  servidor para o padrão LoRaWAN demonstrou a capacidade desta tecnologia em atender aplicações que requisitam somente pacotes de UL em longas distâncias com pequena variação nos tempos de atraso para todos os nós conforme ilustra a Figura 6.11. A utilização da largura de banda de 125 kHz com o SF 7 forneceu para o UL de pacotes um desempenho variando somente nas casas decimais do valor 114 (ms), demonstrando uma variação pouco significativa entre os dispositivos finais da rede. Dadas as pequenas distâncias dos dispositivos finais ao GW em relação aos alcances maiores possibilitados pela tecnologia, os valores desta amostra apresentaram praticamente uma correlação perfeitamente positiva

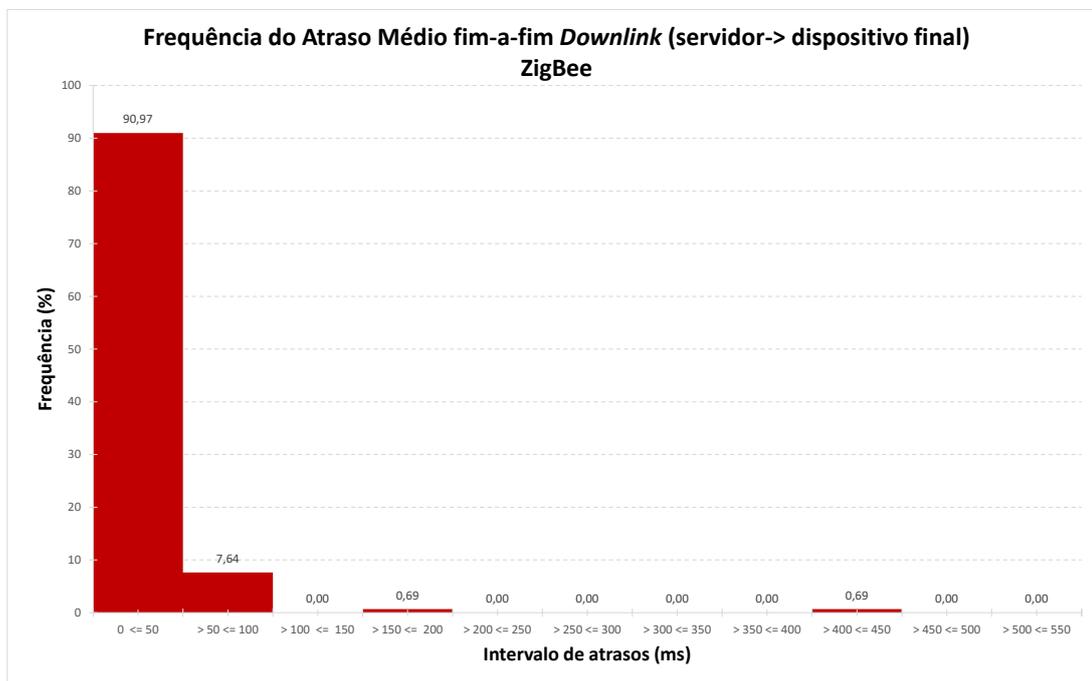


Figura 6.10: Frequência do atraso de DL na rede ZigBee.

(+1) entre os atrasos médios fim-a-fim e a distância dos dispositivos finais ao GW com um coeficiente de correlação  $r$  de 0,999999467. Isso indica que a pequena diferença entre os valores de atraso aferidos para cada nó (114,995453 ms a 114,996634 ms) tem como fator determinante o crescimento linear com a distância do atraso de propagação do sinal.

É importante reforçar que em todas as medições realizadas com o módulo LoRaWAN, estes valores variaram numa escala muito pequena para as amostras fornecidas. Por isso, não foram demonstrados os intervalos de confiança para as medições realizadas para este padrão. Esse comportamento também decorre principalmente do fato de que a distância direta em estudo é considerada pequena em relação ao alcance máximo da tecnologia LoRaWAN.

O gráfico da Figura 6.12 demonstra que 100% dos dispositivos finais da rede LoRaWAN alcançaram atrasos no intervalo de 100 a 150 ms.

Neste último sentido todos os os pacotes encaminhados foram recebidos no destino. Já no sentido contrário (servidor  $\rightarrow$  dispositivo final), deve-se considerar que houve ausência de comunicação para alguns nós da rede. Conforme pode ser verificado nos gráficos das Figuras 6.13 e 6.14, somente 36 dispositivos finais receberam pacotes oriundos do servidor.

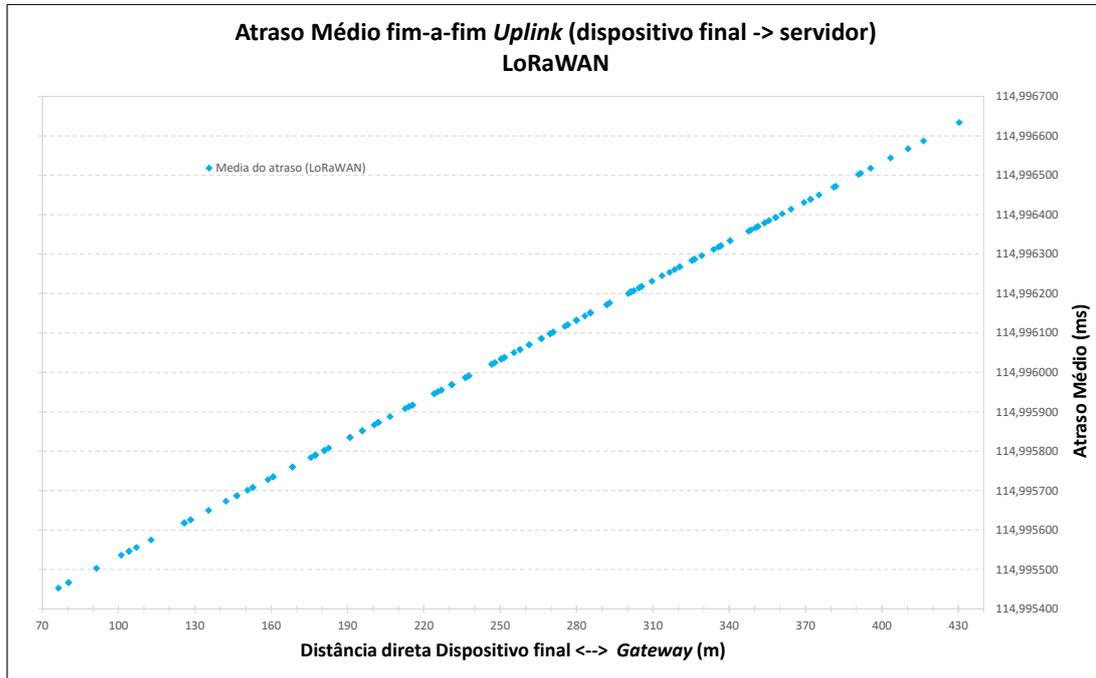


Figura 6.11: Gráfico de dispersão dos valores médios de atraso (UL) na WSN para o padrão LoRaWAN.

Este resultado deve-se, entre outras questões, conforme será detalhado no decorrer desta seção, ao fato de que o GW não pode lidar com todas as tentativas de transmissão encaminhadas pelo servidor.

Assim como aconteceu com o ZigBee, verifica-se também uma redução no atraso médio neste sentido de comunicação para maioria dos nós (24 dos 36 dispositivos finais que receberam do servidor ao menos um pacote). Os atrasos para estes 24 nós variaram entre os valores de 58,61 ms para o nó 138 e 58,12 ms para o nó 0. No entanto, são identificados também atrasos superiores aos do ZigBee para o restante dos nós da rede. O atraso médio para os 12 nós restante das transmissões bem-sucedidas com o LoRaWAN só variou entre 1320,948284 ms e 1320,948567 ms. A variação de atrasos entre os nós que tiveram tempos na casa de 58 ms e 1320 ms ocorreu porque o padrão LoRaWAN, conforme discutido na seção anterior, possibilita aos dispositivos e ao servidor retransmissão em uma segunda janela de envio e recepção caso não seja possível ao GW receber e reencaminhar pacotes de dados na primeira tentativa por estar com todos os canais ocupados, ou considerando ainda as limitações de *duty cycle*. Obviamente, consome-se um tempo maior com os pacotes que necessitam ser encaminhados na segunda janela, conforme ilustra o gráfico

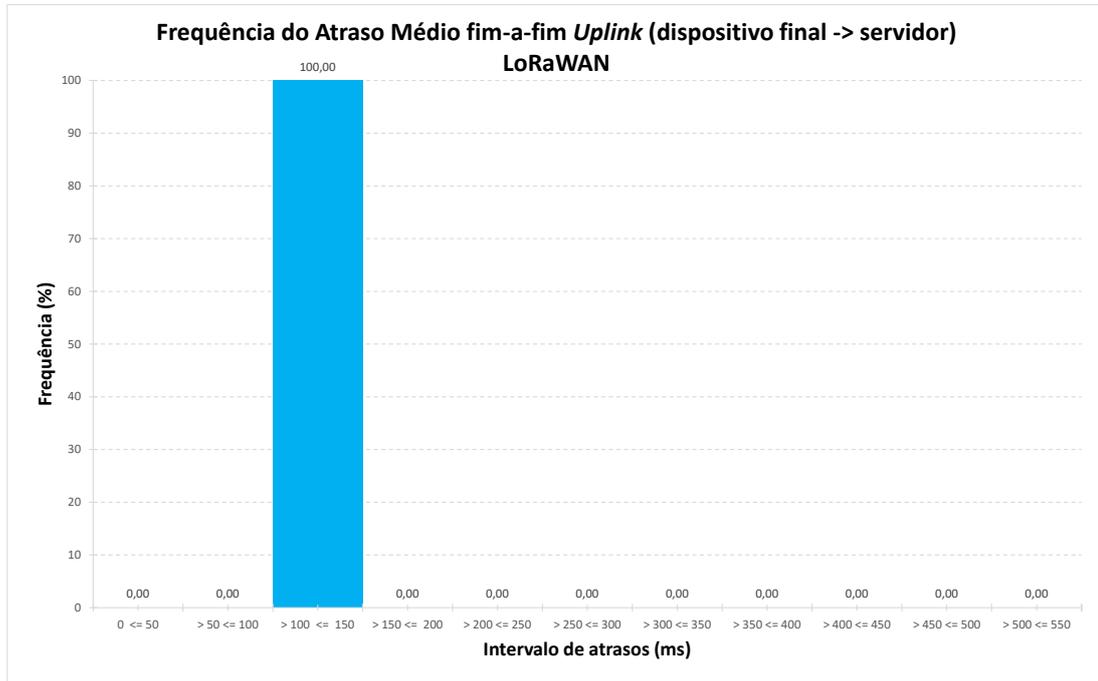


Figura 6.12: Frequência do atraso de UL na rede LoRaWAN.

### 6.13.

Para comparar o comportamento do ZigBee e LoRaWAN no cenário estudado, todos os dados relativos ao caso de UL representados nos gráficos anteriores foram mesclados em uma única plotagem, como demonstra a Figura 6.15.

Verifica-se que, embora a rota caracterizada pela topologia estrela no LoRaWAN resulte em um único salto entre fonte e destino, a latência apresentada por este padrão alcançou valores em geral mais altos, na sua totalidade superiores a 100 ms. Para o ZigBee estes valores chegaram a ser 89% menores alcançando 12 ms, embora apresentassem uma tendência crescente.

Ao analisar o gráfico da Figura 6.16, que representa a comparação entres os atrasos médios fim-a-fim obtidos com os padrões ZigBee e LoRaWAN no sentido servidor → dispositivo final, verifica-se que as diferenças no experimento de DL também foram representativas, principalmente quando se comparam os resultados do atraso médio obtidos com o ZigBee àqueles obtidos pelo LoRaWAN nos casos em que os pacotes são entregues aos dispositivos finais somente na 2ª janela de transmissão. Observa-se que os atrasos médios obtidos com o segundo padrão chegam a ser 26 vezes maiores do que os obtidos

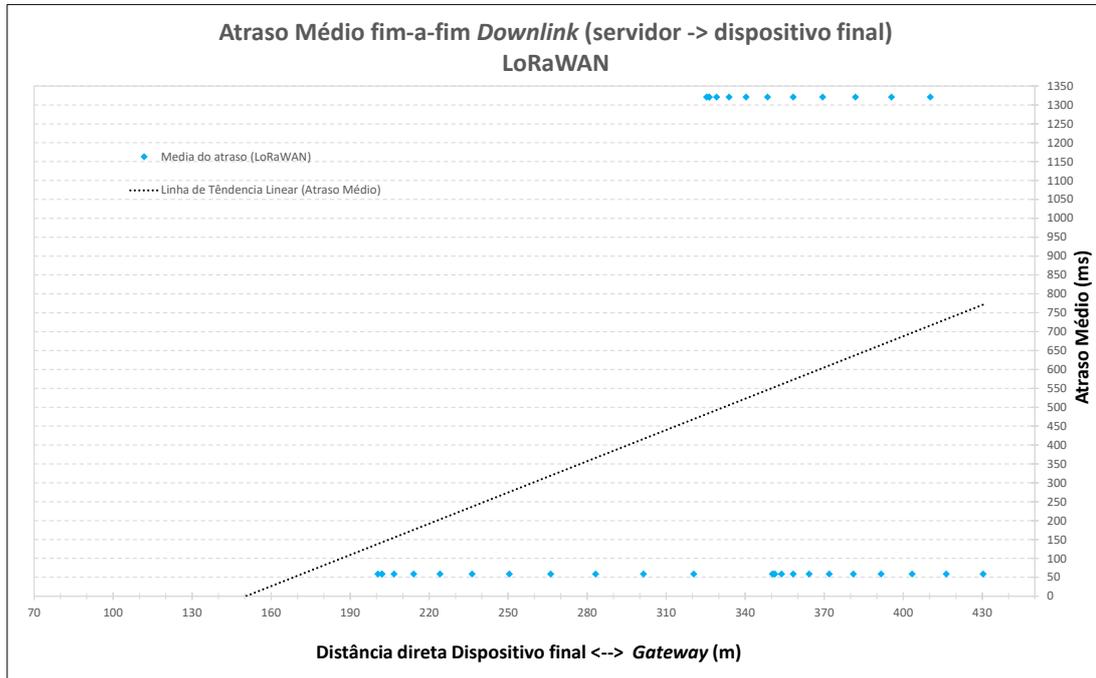


Figura 6.13: Gráfico de dispersão dos valores médios de atraso (DL) na WSN para o padrão LoRaWAN.

com o primeiro. Por outro lado, a diferença nos atrasos médios entre os nós da rede LoRaWAN que entregaram todas as mensagens na 1<sup>a</sup> janela e os nós do ZigBee diminuiu, visto que os valores de atraso médio do LoRaWAN estiveram próximos a 58 ms e os do ZigBee variaram em sua maioria entre 9 ms e 100 ms.

O ZigBee é o padrão que obteve os menores atrasos médios. Porém, estes aumentaram ligeiramente à medida que aumentou a distância dos dispositivos finais para o GW, devido também, à crescente utilização de mais dispositivos reencaminhadores no caminho da comunicação. Observa-se ainda das análises dos gráficos da Figura 6.16 que os nós que foram condicionados a reenviar o pacote na 2<sup>a</sup> janela e que obtiveram atrasos na casa de 1300 ms estão localizados principalmente nos quadrantes com distâncias superiores a 320 m, nas extremidades mais distantes da rede, a exemplo dos quadrantes Q1, Q4 e Q13. Conjectura-se que, dadas as características da aplicação, quando finalmente chega o momento de os nós localizados nestes quadrantes receberem os pacotes de DL direcionados pelo servidor, os nós mais próximos ao GW estão ocupando os canais com pacotes sendo encaminhados no sentido contrário (UL). Dessa forma, o servidor só obtém algum sucesso na 2<sup>a</sup> tentativa de envio dos pacotes DL.

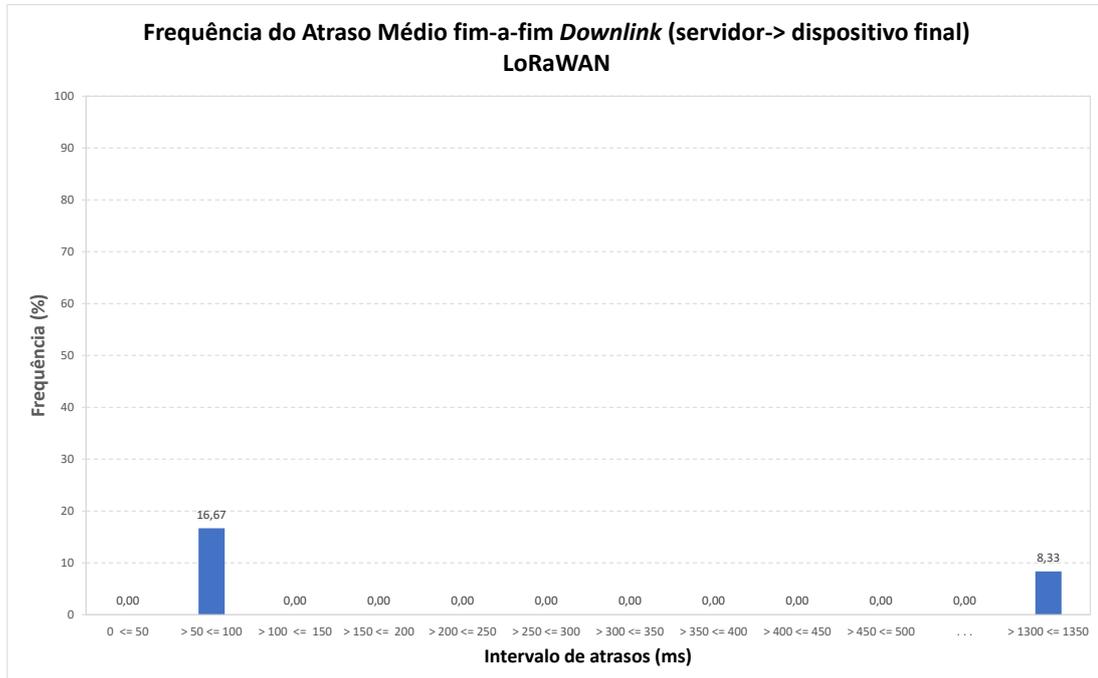


Figura 6.14: Frequência do atraso médio de DL na rede LoRaWAN.

A fim de modelar o atraso médio causado pelos nós localizados em um mesmo quadrante e obter uma média dos atrasos, produziu-se também o gráfico da Figura 6.17 que apresenta os atrasos médios para cada quadrante comparando ambos os sentidos de comunicação UL e DL.

Ao analisar o gráfico da Figura 6.17, observa-se o aumento gradual do atraso médio para os quadrantes mais distantes do GW. Fica evidente que os pacotes transmitidos que necessitaram de menos encaminhamentos no caminho dispositivo final → servidor tiveram uma latência reduzida. Este comportamento pode ser observado em ambos os sentidos com a diferença que os atrasos médios foram em média 30% menores no caminho servidor → dispositivos finais.

### 6.4.2 Taxa de entrega

O segundo parâmetro de avaliação estudado foi a taxa de entrega de pacotes em função da distância entre os dispositivos finais e o GW. Os gráficos apresentados nas Figuras 6.18 a 6.27 demonstram a variação da taxa de entrega de acordo com as distâncias dos

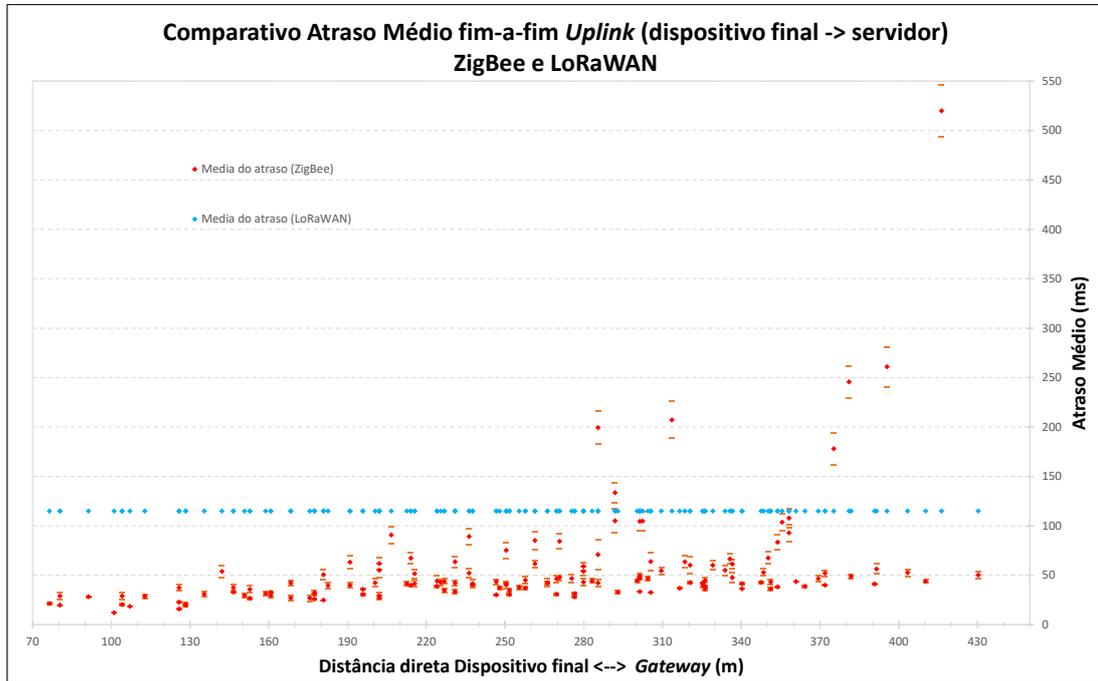


Figura 6.15: Gráfico de dispersão comparativo dos valores Médios de Atraso (UL) na WSN para os padrões ZigBee e LoRaWAN.

dispositivos em relação ao GW.

Nos gráficos das Figuras 6.18 e 6.19, pode-se avaliar os resultados apresentados para a taxa de entrega de pacotes UL no sentido nó  $\rightarrow$  servidor sobre a rede ZigBee e verificar no primeiro gráfico que mesmo o nó mais distante (nó 0) do GW obteve taxas de entrega superiores a 90%. Já no segundo gráfico as taxas de entrega de pacotes se mantiveram acima de 90% para 78,47% dos nós da rede (116 dos 144 dispositivos finais), alcançando 99% em 33 nós da WSN. Taxas de entrega entre 70 e 90% foram obtidas em 17,36% dos nós.

No caso em questão, embora a linha de tendência ilustrada no gráfico da Figura 6.18 indique que há uma maior perda de pacotes para os nós mais distantes, fica evidente que a correlação distância/taxa de entrega de pacotes é menos significativa, com várias taxas de entrega dispersas além da linha de tendência. O coeficiente de correlação desta amostra demonstrou uma correlação negativa com  $r$  igual a  $-0,256650469$ . Indicando uma baixa correlação entre as distâncias e as taxas de entrega de pacotes. Um exemplo que reforça este resultado é dado pelo dispositivo final 0 que possui a maior distância do GW, mas,

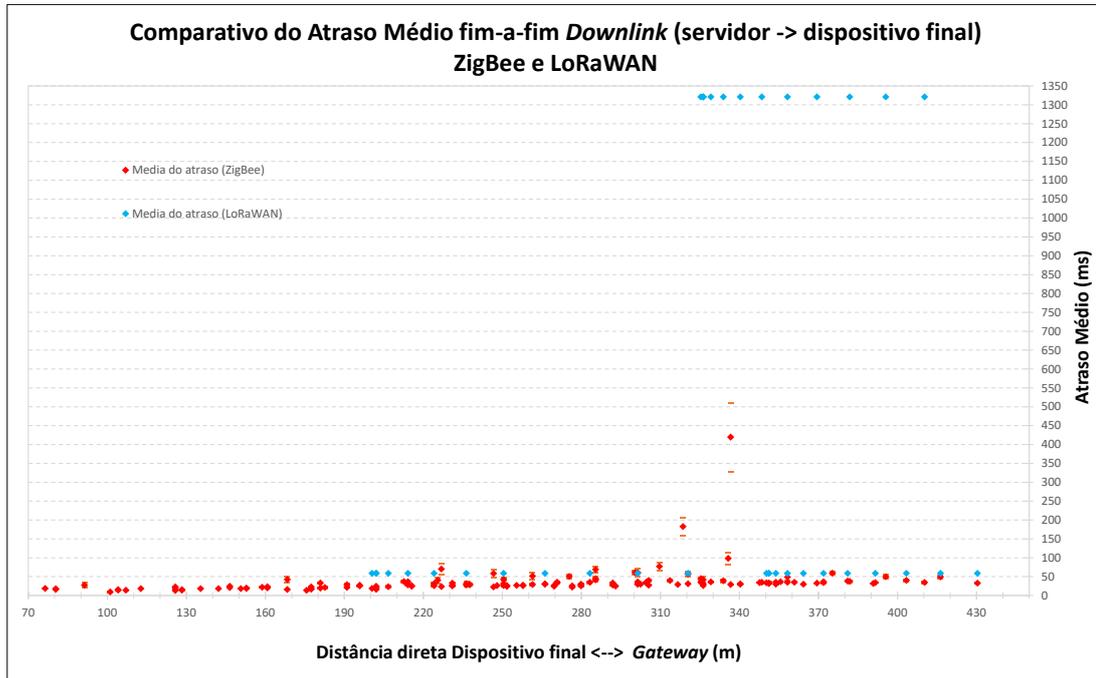


Figura 6.16: Gráfico de dispersão comparativo dos valores médios de atraso (DL) na WSN para os padrões ZigBee e LoRaWAN.

mesmo assim, obteve uma taxa de entrega de pacotes de 96%. Por outro lado, verifica-se também que são alcançados valores de taxa de entrega de pacotes entre 70% e 80% mesmo para nós posicionados a menos de 250 m do GW.

Os gráficos das Figuras 6.20 e 6.21 apresentam o desempenho da rede ZigBee em relação à taxa de entrega de pacotes de DL no caminho servidor  $\rightarrow$  dispositivo final. Pode-se observar um comportamento muito semelhante àquele descrito para o sentido inverso. No entanto, como ilustra o gráfico da Figura 6.20, nesse sentido, as taxas de entrega foram ainda maiores que sentido anterior, alcançando praticamente 100% em 20 nós da rede, incluindo alguns com distâncias superiores a 370 m. Neste caso, conforme ilustra o gráfico 6.21, houve uma maior quantidade de nós que obtiveram taxas de entrega superiores a 90%, 134 dispositivos finais, ou seja, cerca 91% do total dos 144 nós que receberam pacotes alcançaram esta marca. Mesmo assim, neste caso também o índice de correlação foi baixo com  $r$  igual a  $-0,106335788$

O gráficos das Figuras 6.22 e 6.23 representam o número total de pacotes de dados UL transmitidos da fonte (dispositivo final) para o destino (servidor) atestando que a taxa de

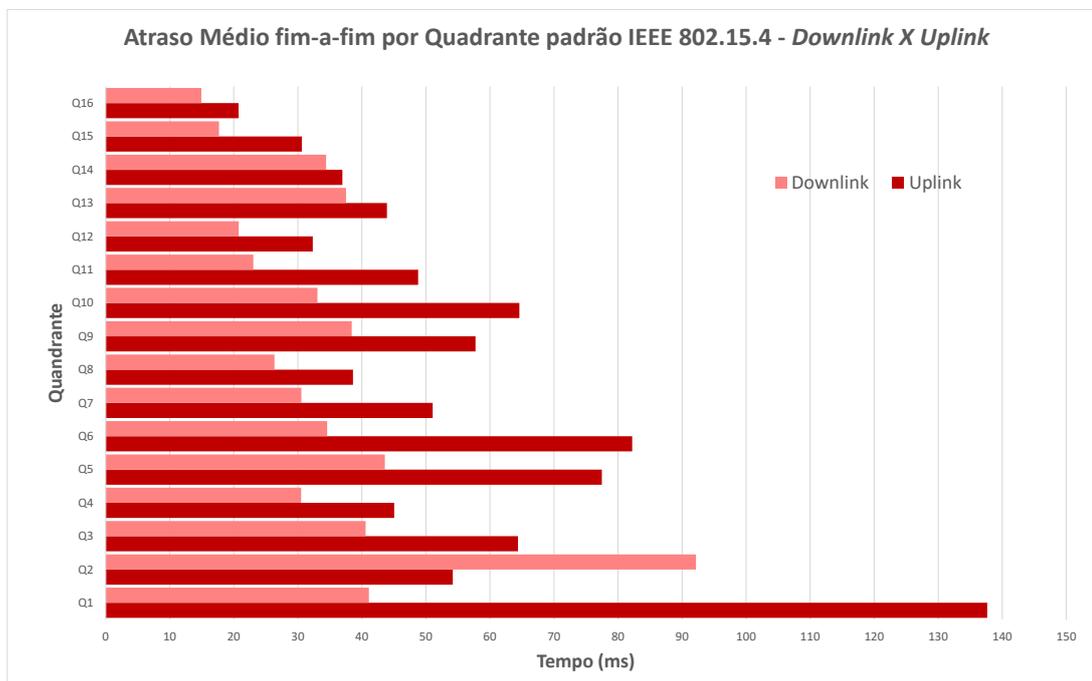


Figura 6.17: Atraso médio DL e UL por quadrante para o ZigBee.

entrega de pacotes LoRaWAN é sempre máxima para todos os nós.

As análises demonstraram que, além do fato de os dispositivos finais estarem muito próximos ao GW para o alcance do LoRaWAN, de acordo com a padronização da tecnologia, os pacotes de UL têm prioridade sobre os de DL. Estas características levaram aos resultados obtidos com a garantia de entrega em 100% das transmissões realizadas na rede no sentido dispositivo final → servidor.

Dos gráficos das Figuras 6.24 e 6.25 que representam a taxa de entrega de pacotes de DL na rede LoRaWAN para o sentido servidor → dispositivo final, pode-se constatar que a maioria dos nós da rede LoRaWAN não conseguiu completar a transmissão, obtendo 0% de pacotes entregues. O gráfico da Figura 6.25 demonstra especificamente que 75% dos nós sofreram essa restrição. É importante reforçar, conforme demonstra o gráfico da Figura 6.14 referente ao atraso médio para essa tecnologia e sentido de comunicação, que somente 8,33% dos 25% de nós que conseguiram receber os pacotes de dados oriundos do servidor, receberam estes pacotes na 1ª janela de transmissão do LoRaWAN.

A hipótese reforçada pelos experimentos indica que os resultados obtidos nesta última análise se devem a fatores como o intenso tráfego de pacotes de UL acontecendo na rede

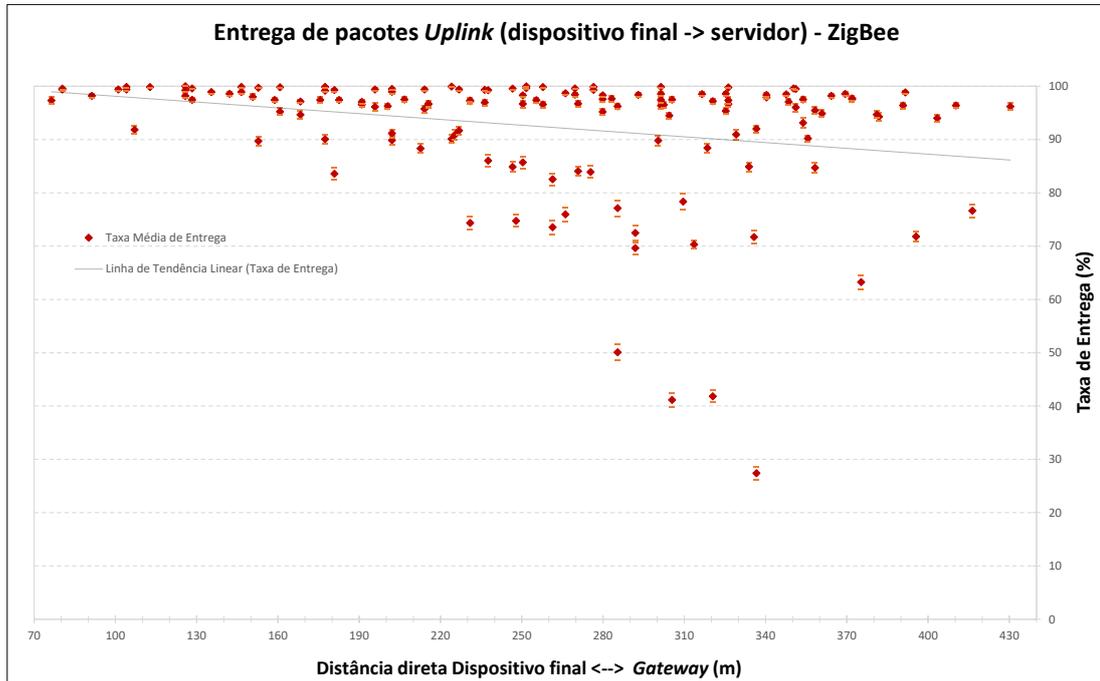


Figura 6.18: Gráfico de dispersão da percentagem de sucesso na entrega de pacotes UL na WSN para o padrão ZigBee.

ao mesmo tempo que o tráfego de DL, a quantidade de canais disponíveis e o tipo de GW, as limitações de *duty cycle* impostas pelo padrão somadas ao fato de que os pacotes de UL são beneficiados pela padronização estabelecida em priorizar àqueles originados nos dispositivos finais.

Constata-se ainda nesta última análise, como demonstrado no gráfico da Figura 6.13 referente ao atraso médio, que os nós mais próximos ao GW são ainda mais prejudicados no recebimento de pacotes DL, visto que os nós mais distantes são os primeiros a encaminhar pacotes UL e, conseqüentemente, são os primeiros a receber a resposta. Como estes nós ainda estão sujeitos a ocupar os canais de recepção na 2ª janela de transmissão, o resultado é uma latência mais alta que reforça a possibilidade de perdas de pacotes na rede. Dessa forma, quando chega o momento de os nós mais próximos receberem pacotes de resposta, estes pacotes acabam sendo descartados, visto que, nós mais distantes mantêm a ocupação dos canais disponíveis. Numa hipótese adicional, este comportamento afetaria diretamente o consumo de energia dos dispositivos na rede LoRaWAN.

Através dos resultados obtidos nas análises anteriores, pode-se comparar no gráfico

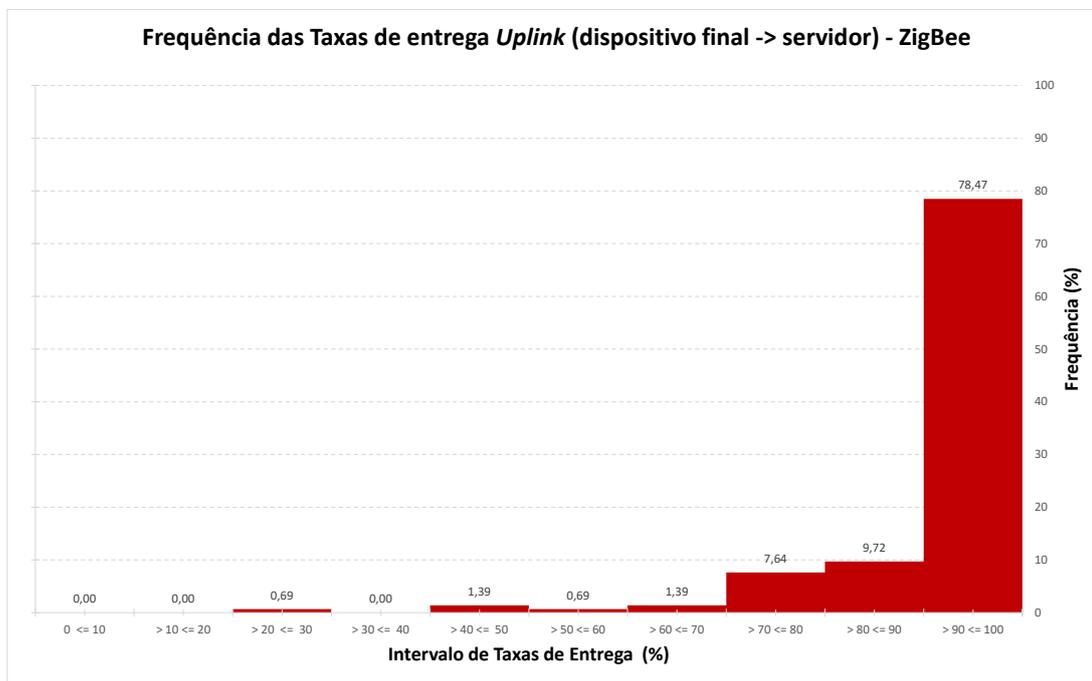


Figura 6.19: Frequência das taxas de entrega (UL) para o padrão ZigBee.

da Figura 6.26 os valores para métrica taxa de entrega de pacotes UL na orientação dispositivo final  $\rightarrow$  servidor de ambos os padrões ZigBee e LoRaWAN.

Nota-se nos resultados ilustrados na Figura 6.26 que fatores como a distância dos nós da rede até o GW, o posicionamento, o número de nós e a priorização de pacote UL favoreceram o padrão LoRaWAN no sentido dispositivo final  $\rightarrow$  servidor, fazendo com que 100% das mensagens enviadas pelos nós da rede fossem entregues no destino. Todavia, pode-se considerar satisfatório o desempenho do ZigBee para uma grande porção da rede, uma vez que somente 17 dos 144 dispositivos finais tiveram taxa de entrega inferior a 80%. A depender da aplicação, este resultado não inviabilizaria o uso deste último padrão.

O gráfico da Figura 6.27 apresenta o comparativo para a taxa de entrega de pacotes de DL no sentido servidor  $\rightarrow$  dispositivo final para os padrões ZigBee e LoRaWAN. Este gráfico ilustra novamente que no caso do segundo padrão, somente o fato de os nós estarem em visada direta e próximos ao GW não é suficiente para garantir a entrega de pacotes.

Em termos gerais, observa-se que neste neste último sentido o padrão ZigBee teve um desempenho ainda mais satisfatório por ter atendido a todos os nós da rede com apenas 11 deles oferecendo taxa de entrega de pacotes menor que 90%. Já para o LoRaWAN, se

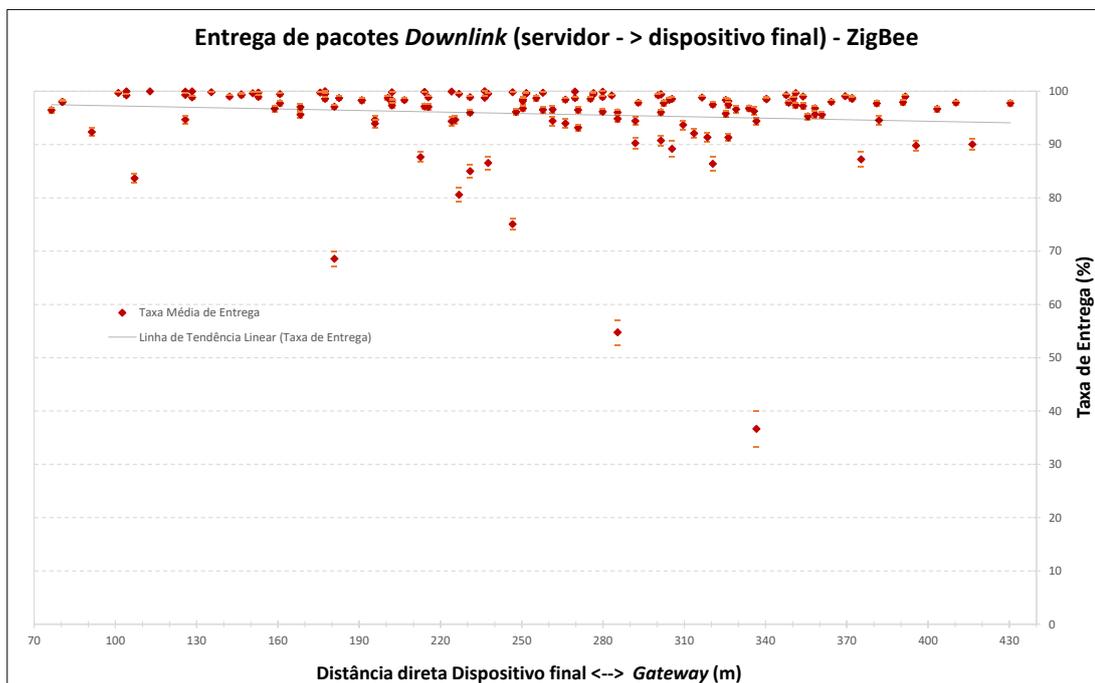


Figura 6.20: Gráfico de dispersão da percentagem de sucesso na entrega de pacotes DL na WSN para o padrão ZigBee.

por um lado, a taxa de entrega de pacotes observada alcançou 100% para 25% dos nós, por outro, 75% dos dispositivos finais não receberam nem sequer um pacote originado no servidor revelando um desempenho insatisfatório para os requisitos da aplicação em estudo.

## 6.5 Conclusões finais dos experimentos

Pretendeu-se com estas simulações criar um cenário de ensaio que permitisse avaliar o comportamento dos padrões ZigBee e LoRaWAN, analisando-se a latência e a entrega de pacotes em uma WSN para obter um melhor entendimento de como estes padrões são afetados pelas características e requisitos das aplicações. O LoRaWAN forneceu valores inferiores aos obtidos com o ZigBee com as métricas atraso médio fim-a-fim e taxa de entrega de pacotes, em ambos os sentidos de comunicação, com exceção da taxa de entrega de 100% dos pacotes de dados de UL obtida no sentido dispositivo final → servidor. Os resultados são um reflexo das restrições impostas pela aplicação que ajudam a avaliar e compreender algumas das limitações enfrentadas pelo padrão LoRaWAN que podem

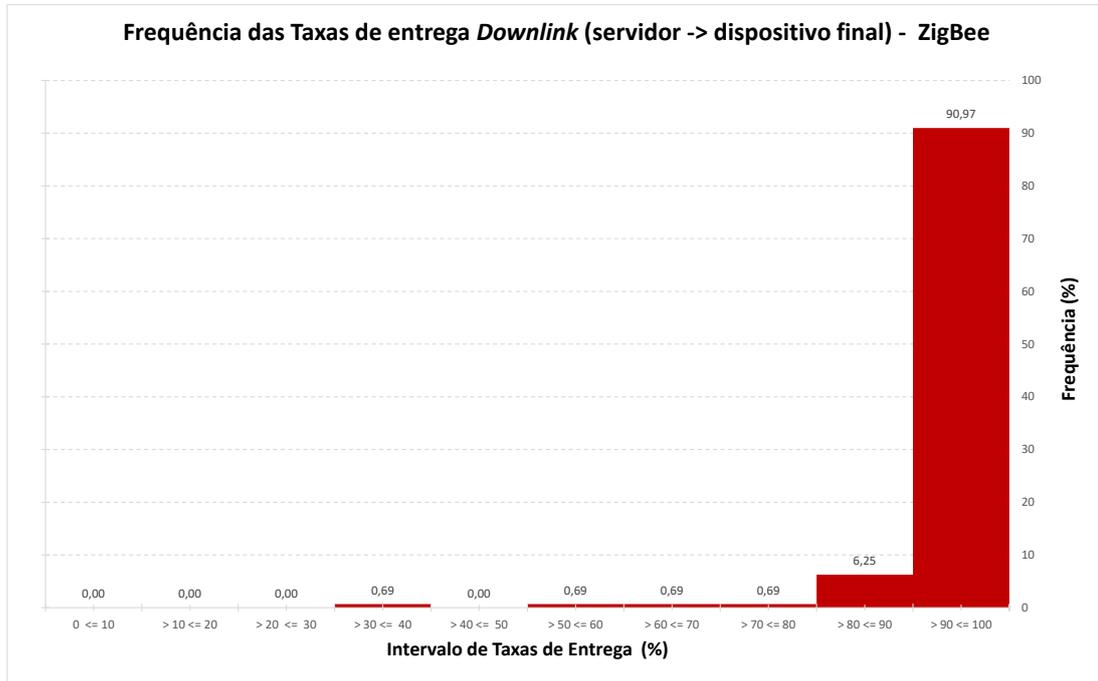


Figura 6.21: Frequência das taxas de entrega (DL) para o padrão ZigBee.

afetar implantações da IoT na AP. Eles indicam que, em parte, o desempenho obtido está relacionado com as limitações impostas pelo *duty cycle*, devido às regulamentações estabelecidas pelos órgãos responsáveis. Este mecanismo não pôde ser considerado nas simulações com o ZigBee por não estar disponível no módulo de simulação, apesar de ser opcional no padrão real. O uso do *duty cycle* pode influenciar significativamente a comunicação, embora sirva para regular a quantidade de pacotes enviados, diminuindo a probabilidade de colisões e otimizando o consumo de energia.

Outro fator compreendido como determinante para os resultados obtidos com o LoRaWAN está relacionado com a capacidade de recepção do GW simulado, a quantidade de canais disponíveis, o tipo de GW e o tráfego de pacotes gerados pelos dispositivos da aplicação. A quantidade de canais disponíveis no GW se mostrou insuficiente para lidar com a quantidade de pacotes recebidos do servidor enquanto o mesmo esteve ocupado com transmissões UL que têm prioridade sobre as de DL.

O trabalho de [21] propõe contramedidas para alguns dos desafios enfrentados pelo LoRaWAN discutidos nessa dissertação. Eles discutem, por exemplo, a “co-localização” de GWs, Já que as transmissões DL são programadas por um controlador centralizado (ou

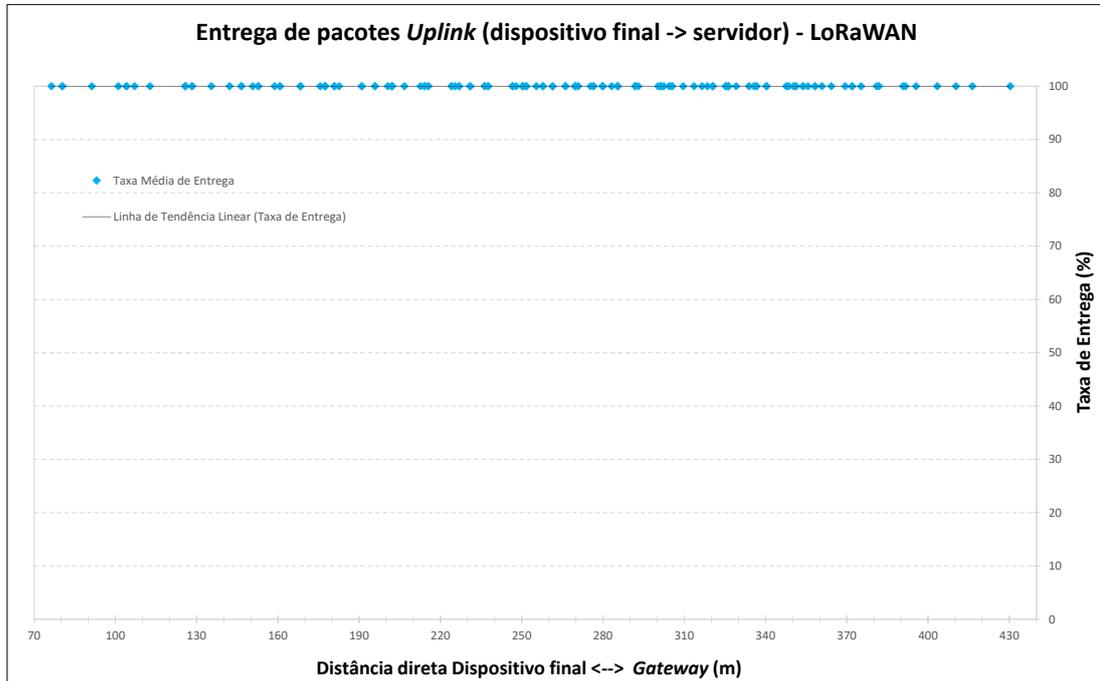


Figura 6.22: Gráfico de dispersão da percentagem de sucesso na entrega de pacotes UL na WSN para o padrão LoRaWAN.

seja, o servidor de rede), a presença de múltiplos GWs no mesmo local pode permitir que o servidor equilibre o tempo de uso do meio entre os GWs “co-localizados”, explorando melhor o ciclo de trabalho alocado a cada GW. Eles propõem ainda o uso do modelo de acesso ao meio “*Listen before talk - (Ouça antes de falar)*”, visto que as regulamentações não impõem o uso do *duty-cycle* em dispositivos que implementam um mecanismo de escuta do canal antes de se realizar qualquer transmissão. Os autores argumentam que é possível fornecer essa capacidade aos GWs, permitindo que eles transmitam com a frequência necessária em canais de *downlink*.

Os experimentos de simulação demonstraram também que, dependendo da aplicação, o ZigBee pode servir muito bem mesmo em longas distâncias oferecendo taxas de entrega de pacotes superiores a 90%, tanto para transmissões UL quanto para DL. Embora haja uma correlação entre distância e desempenho demonstrada nos resultados, com nós mais próximos frequentemente oferecendo melhor desempenho que os mais distantes, na comparação dos dois padrões ficou evidente que o menor número de saltos para o destino não garante uma comunicação de alta qualidade. Mesmo que a rede LoRaWAN ofereça um alcance maior nos dois sentidos de tráfego, o desempenho não se sustentou para situações

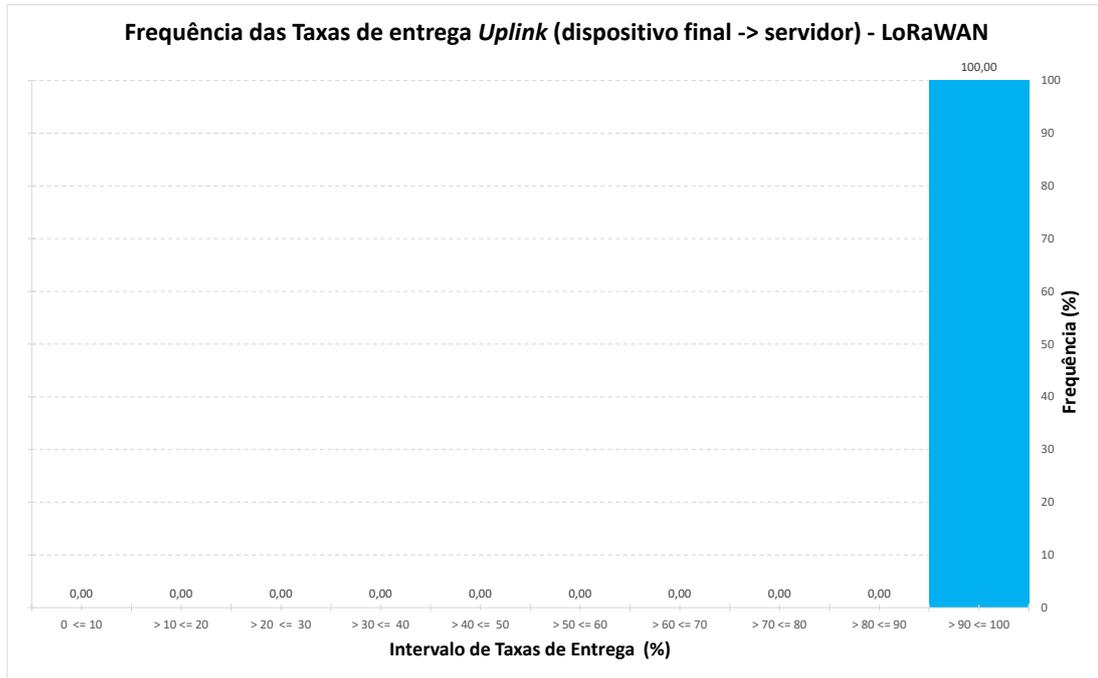


Figura 6.23: Frequência das taxas de entrega (UL) para o padrão LoRaWAN.

onde houve um fluxo significativo de nós querendo compartilhar os canais disponíveis no GW no sentido servidor  $\rightarrow$  dispositivo final.

Os resultados reforçam o entendimento de que ambos os padrões possuem características que favorecem as aplicações rurais em relação às particularidades discutidas até aqui, a depender dos requisitos da aplicação pretendida. O ZigBee atenderia satisfatoriamente com uma alta taxa de entrega e atraso médio aceitável todas as aplicações de AP descritas no Capítulo anterior. Nas condições estabelecidas no cenário em questão, o padrão pode suportar um tráfego considerável de pacotes, destacando sua capacidade de lidar com a expansão da rede com escalabilidade. O melhor cenário para o LoRaWAN seria aquele com menor densidade, mas com área de cobertura maior ou que contenha somente transmissões UL com requisitos de aplicação não tão restritivos quanto à quantidade de tráfego de pacotes num curto intervalo de tempo como realizado no experimento. Considerando-se a ressalva acima e a confirmação que este último padrão de rede não se encaixa na aplicação de monitoramento de incêndio apresentada no Capítulo 5, ainda pode-se considerar que esse padrão seja o mais adequado para oferecer ao restante das aplicações alcances melhores com custos menores, visto que, com essa tecnologia não é

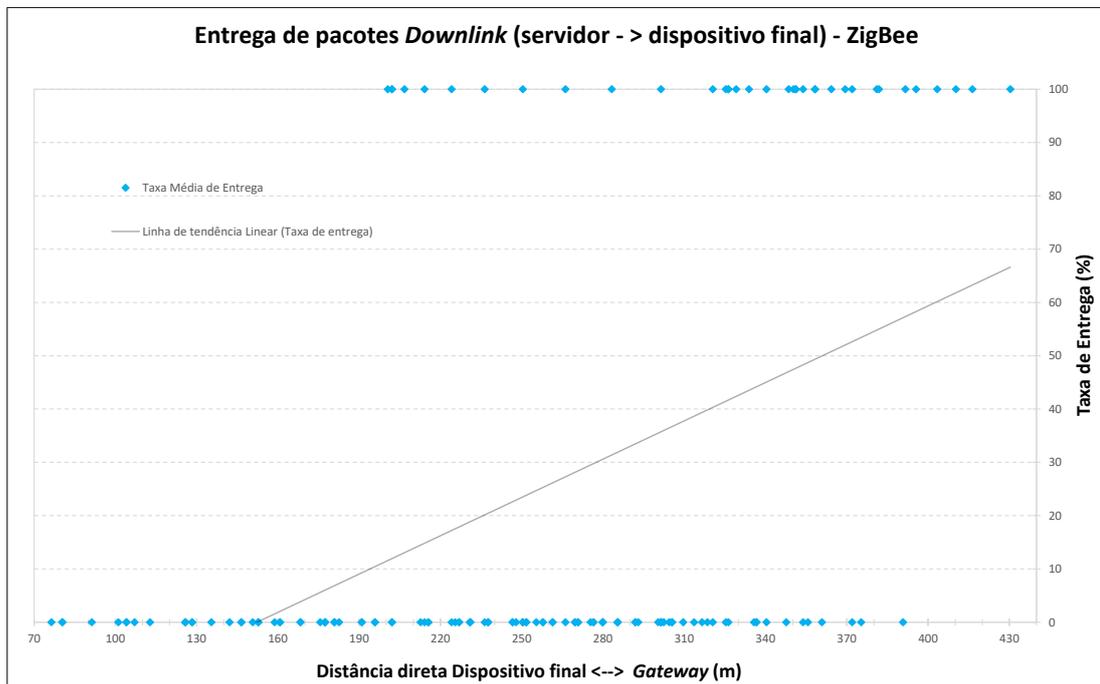


Figura 6.24: Gráfico de dispersão da percentagem de sucesso na entrega de pacotes DL na WSN para o padrão LoRaWAN.

necessário utilizar nós intermediários para aumentar o alcance do enlace de comunicação como acontece com o ZigBee. Melhores desempenhos devem ser obtidos com ambas as tecnologias quando se ajustam configurações adicionais que não estão disponíveis nos módulos utilizados, mas são possibilitadas pelas aplicações reais.

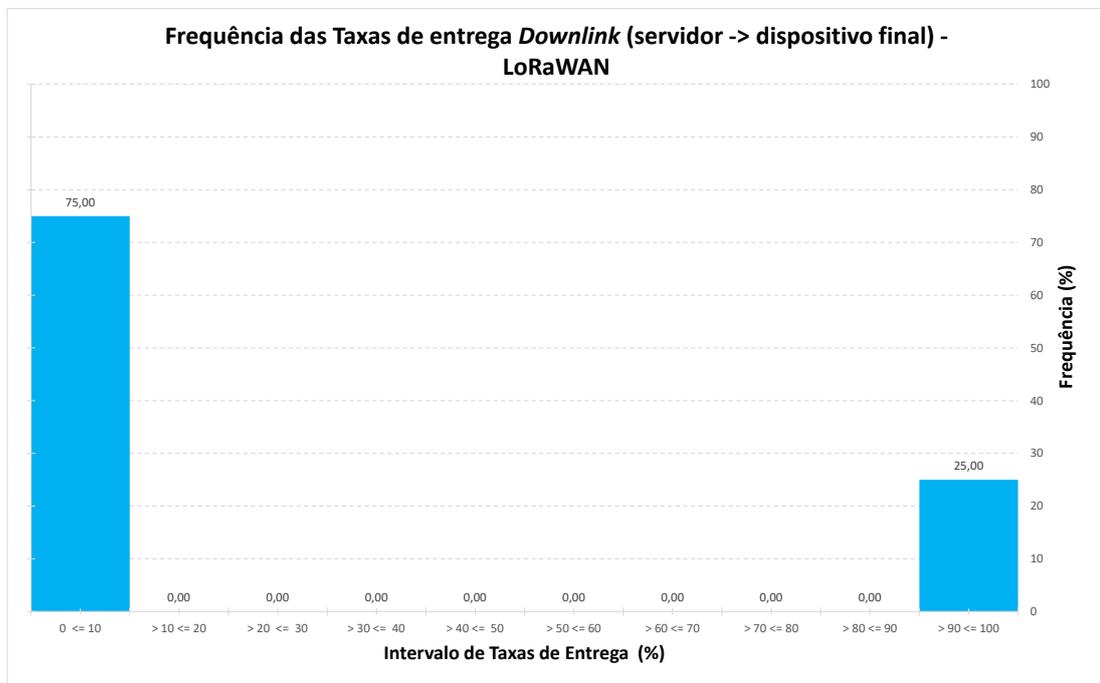


Figura 6.25: Frequência das taxas de entrega (DL) para o padrão LoRaWAN.

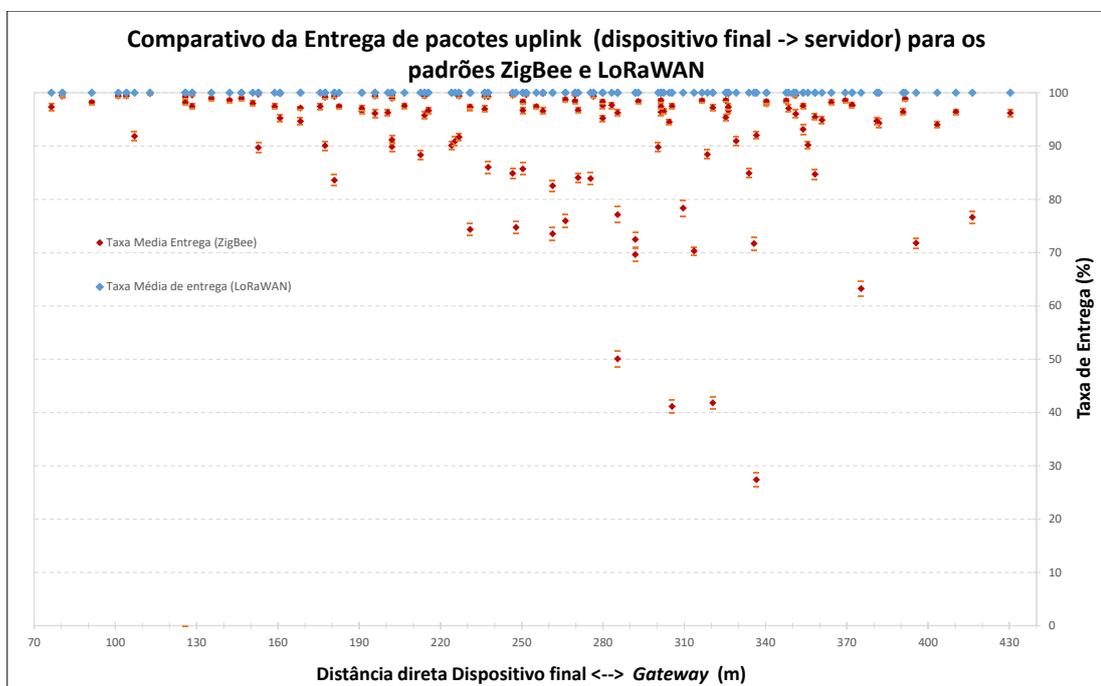


Figura 6.26: Gráfico de dispersão comparativo da percentagem de sucesso na entrega de pacotes UL na WSN para os padrões ZigBee e LoRaWAN.

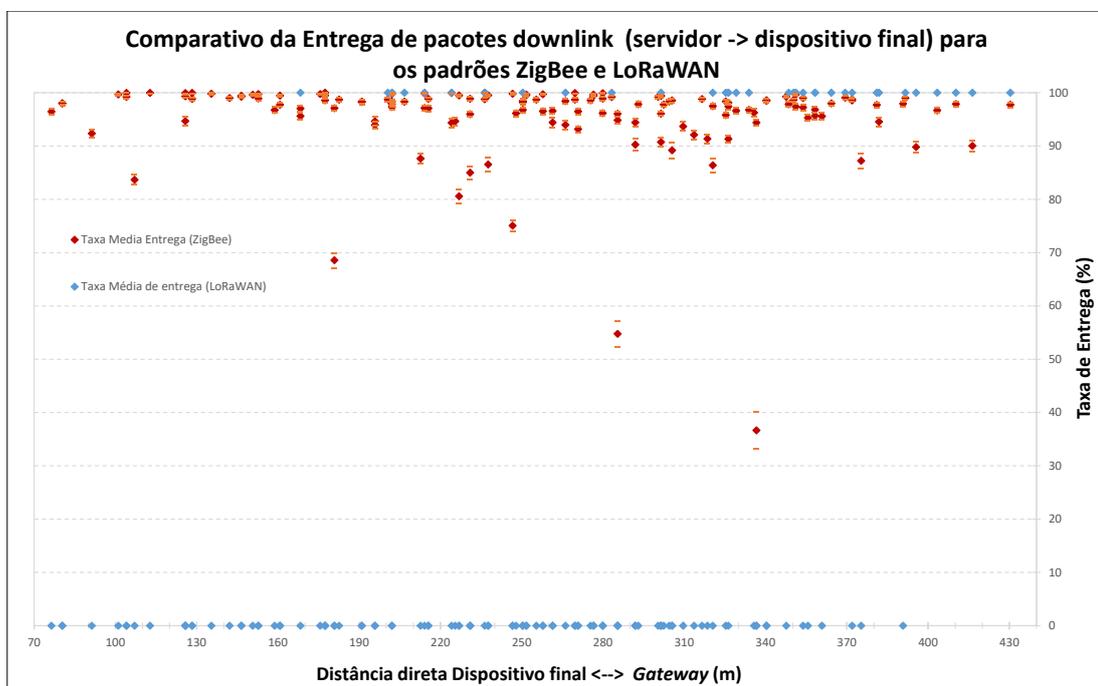


Figura 6.27: Gráfico de dispersão comparativo da percentagem de sucesso na entrega de pacotes DL na WSN para os padrões ZigBee e LoRaWAN.

# Capítulo 7

## Conclusão

O recente paradigma de IoT tem o potencial de aumentar os benefícios e o escopo das aplicações de AP. As redes de comunicação sem fio são apresentadas como um dos principais protagonistas nesse contexto sendo fonte de vários estudos demandados pela criação de novas tecnologias de comunicação, pela revisão de protocolos e por novos esforços de padronização. Neste contexto, esta pesquisa foi elaborada com o objetivo de avaliar as dificuldades encontradas na implantação de tecnologias de IoT em ambientes rurais, especialmente no que diz respeito a tecnologias sem fio.

O mercado de soluções de agricultura de precisão encontra-se altamente fragmentado devido a uma série de sistemas fechados que não permitem a simples reutilização de dados em aplicações diversas. Situação semelhante ocorre no contexto da conectividade alinhada com os requisitos das aplicações de AP, IoT e dos dispositivos de comunicação sem fio, visto que estes também são produzidos por vários fornecedores, fazendo com que ocorram comunicações de dados em diferentes formatos, diferentes protocolos de aplicação e interfaces. A falta de padronização torna extremamente difícil a interação entre dispositivos tornado este um dos grandes desafios no desenvolvimento do ecossistema de IoT. Os *middlewares* e virtualização são apresentados como medidas complementares na integração de tecnologias LPWAN com o restante das tecnologias de comunicação sem fio utilizadas em IoT. Todavia, como discutido nesse trabalho, os *middlewares* também possuem suas próprias deficiências e questões em aberto.

As principais restrições nesse cenário decorrem do fato que muitos dos *hardwares* utilizados pretendem oferecer soluções de baixo custo, com consumo mínimo de energia e poder de processamento limitados. Conseqüentemente, estas restrições acabam por afetar diretamente os requisitos de conectividade. Soluções parciais para diversos dos problemas abordados têm sido alcançadas em diversas frentes. No entanto, existem ainda

diversos problema de pesquisa em aberto, que incluem as arquiteturas e topologias de rede relativas à coordenação, localização, sincronização e a coexistência de dispositivos. Este último é assunto de diversos trabalhos pesquisados que relacionam problemas de interferência ocasionados pelo uso de banda semelhantes (Bluetooth, ZigBee e Wi-Fi, por exemplo) ou de bandas vizinhas e a utilização do esquema ALOHA simples nas tecnologias LPWAN, como LoRaWAN e SigFox. Novas abordagens que buscam superar as limitações decorrentes incluem o uso de rádios cognitivos, redes oportunistas, e redes heterogêneas. Algumas abordagens propõem a inclusão de funcionalidade de rádios cognitivos no padrão LoRaWAN.

Muitos dos sistemas criptográficos propostos e protocolos de segurança considerados seguros e robustos não são adequados para os dispositivos com recursos limitados da IoT. Garantir a segurança em WSNs nas diversas camadas, de maneira econômica e eficiente em termos de energia é também um problema de pesquisa em aberto. A privacidade no ambiente de IoT é mais vulnerável do que em redes tradicionais de TIC, devido à presença de um grande número de vetores de ataque, fato que exige ainda mais cuidado por parte dos desenvolvedores de *softwares*. Embora existam várias propostas de protocolos seguros para camada de enlace de dados e camada de rede, é sabido que ataques podem ocorrer em qualquer camada da pilha de protocolos. Assim, é necessário explorar o monitoramento seguro para diferentes as camadas, bem como medidas de autenticação, segurança e privacidade das redes.

Conclui-se das questões e avaliações discutidas neste trabalho que é um grande desafio garantir a confiabilidade e a eficiência das aplicações de AP diante da proliferação de tipos de dispositivos de IoT com perfis e requisitos muito diferentes. Uma única tecnologia sem fio não será capaz atender a todos os requisitos das aplicações. A fragmentação das tecnologias de comunicação para IoT, que em alguns momentos pode gerar questões negativas, existe porque o conceito, por si só, é muito amplo. Mas é inevitável, visto que cada tecnologia oferece suas próprias vantagens e desvantagens. Na prática, o que se espera ver é uma combinação de tecnologias, como acontece com o Bluetooth, o ZigBee e o LoRaWAN que podem ser utilizados para coletar dados, enquanto que as tecnologias de celular fornecem o *backhaul* de rede. O LoRaWAN e o Sigfox, ainda necessitam de ajustes em seu desenvolvimento, mas demonstram maturidade suficiente para lidar com alguns dos desafios encontrados na AP, contanto que sejam considerados os requisitos de cada aplicação, a exemplo do que demonstraram as análises realizadas com os módulos LR-WPAN e LoRaWAN do ns-3 nesse estudo.

Os resultados discutidos no capítulo 6 demonstram que há um longo caminho para que a AP se transforme em agricultura de prescrição. Aplicações bem-sucedidas irão requerer um planejamento bem elaborado para se conectar, gerenciar e automatizar os processos agrícolas diante das questões em aberto relativas às WSNs e a conectividade em larga escala no contexto da AP e IoT. Questões estas muito semelhantes àquelas encontradas em outros campos de aplicação.

Em trabalhos futuros, a fim de se explorar possíveis melhorias, pretende-se realizar novas simulações com alguns dos outros seis padrões de rede de comunicação sem fio discutidos neste trabalho. Já se pode encontrar, por exemplo, módulos que simulam as camadas representativas do padrão IEEE 802.11ah para o Wi-Fi HaLow [125] e as do padrão IEEE 802.15.1 para o Bluetooth [29]. Pretende-se ainda realizar uma implementação real semelhante a rede simulada neste trabalho, onde se possa ademais estudar o desempenho ao se aplicar outros algoritmos de roteamento para o padrão ZigBee e outras configurações adicionais disponibilizadas por este padrão e pelo LoRaWAN.

# Referências

- [1] ADAME, T., BEL, A., BELLALTA, B., BARCELO, J., OLIVER, M. IEEE 802.11ah: the WiFi approach for M2M communications. *IEEE Wireless Communications* 21, 6 (2014), 144–152.
- [2] ADELANTADO, F., VILAJOSANA, X., TUSET-PEIRO, P., MARTINEZ, B., MELIA-SEGUI, J., WATTEYNE, T. Understanding the Limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine* 55, 9 (2017), 34–40.
- [3] AHMED, N., RAHMAN, H., HUSSAIN, M. A comparison of 802.11ah and 802.15.4 for IoT. *ICT Express* 2, 3 (2016), 100–102.
- [4] AKYILDIZ, I., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y., CAYIRCI, E. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks* 38, 4 (2002), 393–422.
- [5] AKYILDIZ, I. F., WANG, X., WANG, W. Wireless mesh networks: a survey. *Computer Networks* 47, 4 (2005), 445–487.
- [6] ALI, A., SHAH, G. A., FAROOQ, M. O., GHANI, U. Technologies and challenges in developing Machine-to-Machine applications: A survey. *Journal of Network and Computer Applications* 83 (2017), 124–139.
- [7] ANISI, M. H., ABDUL-SALAAM, G., ABDULLAH, A. H. A survey of wireless sensor network approaches and their energy consumption for monitoring farm fields in precision agriculture. *Precision Agriculture* 16, 2 (2015), 216–238.
- [8] ATZORI, L., IERA, A., MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks* 54, 15 (2010), 2787–2805.
- [9] BANDYOPADHYAY, S., SENGUPTA, M., MAITI, S., DUTTA, S. Role Of Middleware For Internet Of Things: A Study. *International Journal of Computer Science & Engineering Survey* 2, 3 (2011), 94–105.
- [10] BANKOV, D., KHOROV, E., LYAKHOV, A., STEPANOVA, E., TIAN, L., FAMAHEY, J. What is the fastest way to connect stations to a wi-fi halow network? *Sensors* 18, 9 (2018).
- [11] BAÑOS-GONZALEZ, V., AFAQUI, M. S., LOPEZ-AGUILERA, E., GARCIA-VILLEGAS, E. IEEE 802.11ah: A technology to face the IoT challenge. *Sensors (Switzerland)* 16, 11 (2016).
- [12] BARCELO-ORDINAS, J. M., CHANET, J. P., HOU, K. M., GARCÍA-VIDAL, J. *A survey of wireless sensor technologies applied to precision agriculture*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, 2013, p. 801–808.

- [13] BECKWITH, R., TEIBEL, D., BOWEN, P. Report from the field: results from an agricultural wireless sensor network. In *29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks* (2004), p. 471–478.
- [14] BEECHAM RESEARCH & LIBELIUM COMPANY. The future of farming through the IoT perspective, 2016. Disponível em <<http://www.beechamresearch.com/download.aspx?id=1051>> Acesso em: 13 de junho de 2018.
- [15] BENIN, J., NOWATKOWSKI, M., OWEN, H. Vehicular Network simulation propagation loss model parameter standardization in ns-3 and beyond. *2012 Proceedings of IEEE Southeastcon* (2012), 1–5.
- [16] BLOECHL, M. Consider The number 1 Problem With Bluetooth-Based Smart Sensor Network, 2016. Disponível em <<https://www.link-labs.com/blog/bluetooth-based-smart-sensor-networks>> Acesso em: 28 de fevereiro de 2018.
- [17] BLUETOOTH SIG. Bluetooth, 2018. Disponível em <<https://www.bluetooth.com/>> Acesso em: 12 de dezembro de 2018.
- [18] BONOMI, F., MILITO, R., ZHU, J., ADDEPALLI, S. Fog Computing and Its Role in the Internet of Things. *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing* (2012), 13–16.
- [19] BOR, M. C., ROEDIG, U., VOIGT, T., ALONSO, J. M. Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale? *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems - MSWiM '16* (2016), 59–67.
- [20] BURATTI, C., CONTI, A., DARDARI, D., VERDONE, R. An overview on wireless sensor networks technology and evolution. *Sensors* 9, 9 (2009), 6869–6896.
- [21] CAPUZZO, M., MAGRIN, D., ZANELLA, A. Confirmed traffic in lorawan: Pitfalls and countermeasures. In *2018 17th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)* (2018), IEEE, p. 1–7.
- [22] CHEN, F., QIN, L., LI, X., WU, G., SHI, C. Design and Implementation of ZigBee Wireless Sensor and Control Network System in Greenhouse. *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference* (2017), 8982–8986.
- [23] COMUNIDADE DE DESENVOLVIMENTO DO AWK. The gnu awk user’s guide, 2018. Disponível em <<https://www.gnu.org/software/gawk/manual/gawk.html>> Acesso em: 10 de novembro de 2018.
- [24] COMUNIDADE DE DESENVOLVIMENTO DO FLORA. Flora, 2019. Disponível em <<https://flora.aalto.fi>> Acesso em: 21 de janeiro de 2019.
- [25] COMUNIDADE DE DESENVOLVIMENTO DO NETANIM. NetAnim WIKI, 2014. Disponível em <[https://www.nsnam.org/wiki/NetAnim\\_3.105](https://www.nsnam.org/wiki/NetAnim_3.105)> Acesso em: 11 de maio de 2017.

- [26] COMUNIDADE DE DESENVOLVIMENTO DO NS-2. The network simulator - ns-2, 2018. Disponível em <<http://www.nsnam.sourceforge.net/wiki/index.php>> Acesso em: 23 de junho de 2018.
- [27] COMUNIDADE DE DESENVOLVIMENTO DO NS-3. ns-3 - network simulator, 2017. Disponível em <<https://www.nsnam.org/>> Acesso em: 14 de março de 2017.
- [28] COMUNIDADE DE DESENVOLVIMENTO DO NS-3. Low-Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPAN), 2018. Disponível em: <<https://www.nsnam.org/docs/models/html/lr-wpan.html>> Acesso em: 07 de julho de 2017.
- [29] COMUNIDADE DE DESENVOLVIMENTO DO OMNET++. BLE - Bluetooth Low Energy model, 2015. Disponível em <<https://omnetpp.org/download-items/BLE.html>> Acesso em: 11 de maio de 2018.
- [30] COMUNIDADE DE DESENVOLVIMENTO DO WIRESHARK. Wireshark: Go Deep., 2018. Disponível em <<https://www.wireshark.org/>> Acesso em: 18 de dezembro de 2018.
- [31] DASH7 ALLIANCE. Dash7 alliance protocol, 2017. Disponível em <<http://www.dash7-alliance.org/dash7-alliance-protocol/>> Acesso em: 02 de março de 2018.
- [32] DEERE & COMPANY. Data Management|JDLink| John Deere US, 2018. Disponível em <<https://www.deere.com/en/technology-products/precision-ag-technology/data-management/jdlink/>> Acesso em: 16 de abril de 2018.
- [33] DI MARCO, P., SKILLERMARK, P., LARMO, A., ARVIDSON, P., CHIRIKOV, R. Performance Evaluation of the Data Transfer Modes in Bluetooth 5. *IEEE Communications Standards Magazine* 1, 2 (2017), 92–97.
- [34] DÍAZ, S. E., PÉREZ, J. C., MATEOS, A. C., MARINESCU, M. C., GUERRA, B. B. A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks. *Computers and Electronics in Agriculture* 76, 2 (2011), 252–265.
- [35] DVM COMPANY. DVM IoT Solutions, 2019. Disponível em <<https://www.dvm.com.tr/>> Acesso em: 13 de junho de 2019.
- [36] EUROPEAN AGRICULTURAL MACHINERY-CEMA. Digital Farming: What does it really mean? Disponível em <[https://www.cema-agri.org/images/publications/position-papers/CEMA\\_Digital\\_Farming\\_-\\_Agriculture\\_4.0\\_\\_13\\_02\\_2017\\_0.pdf](https://www.cema-agri.org/images/publications/position-papers/CEMA_Digital_Farming_-_Agriculture_4.0__13_02_2017_0.pdf)> Acesso em: 18 de setembro de 2018.
- [37] EXPLORATORY ENGINEERING. Data Rate and Spreading Factor, 2018. Disponível em <[https://docs.exploratory.engineering/lora/dr\\_sf/](https://docs.exploratory.engineering/lora/dr_sf/)> Acesso em: 13 de fevereiro de 2019.
- [38] FAO. How to Feed the World in 2050. *Insights from an expert meeting at FAO 2050*, 1 (2009), 1–35.

- [39] FERDOUSH, S., LI, X. Wireless sensor network system design using Raspberry Pi and Arduino for environmental monitoring applications. *Procedia Computer Science* 34 (2014), 103–110.
- [40] FINNEGAN, J., BROWN, S. A comparative survey of lpwa networking. *arXiv preprint arXiv:1802.04222* (2018).
- [41] FUJDIAK, R., MLYNEK, P., MISUREC, J., SLACIK, J. Simulation of intelligent public light system in smart city. In *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS)* (2017), IEEE, p. 2515–2519.
- [42] GARCIA-SANCHEZ, A. J., GARCIA-SANCHEZ, F., GARCIA-HARO, J. Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 75, 2 (2011), 288–303.
- [43] GILCHRIST, A. *Industry 4.0*. Apress, Berkeley, CA, 2016.
- [44] GRABIA, E. M., MARKOWSKI, T., MRUCZKIEWICZ, J., PLEC, K. Design of a DASH7 low power wireless sensor network for Industry 4.0 applications. *IEEE International Conference on RFID Technology & Application (RFID-TA)* (2017), 254–259.
- [45] HALBERD BASTION RADIO FREQUENCY CONSULTANCY. Brazil's first IoT network goes live in August. Disponível em <<https://halberdbastion.com/intelligence/news/brazils-first-iot-network-goes-live-august>> Acesso em: 26 de março de 2018.
- [46] HASSAN, S. S., BIBON, S. D., HOSSAIN, M. S., ATIQUZZAMAN, M. Security threats in Bluetooth technology. *Computers and Security* (2017).
- [47] HE, J., WANG, J., HE, D., DONG, J., WANG, Y. The design and implementation of an integrated optimal fertilization decision support system. *Mathematical and Computer Modelling* 54, 3-4 (2011), 1167–1174.
- [48] HENDERSON, T. R., ROY, S., FLOYD, S., RILEY, G. F. ns-3 Project Goals.
- [49] HU, J., SHEN, L., YANG, Y., LV, R., MOBILE, N. Design and implementation of wireless sensor and actor network for precision agriculture. *2010 IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security* (2010), 571–575.
- [50] IETF 6LOWPAN WORKING GROUP. IPv6 over Low power WPAN (6lowpan). Disponível em <<https://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/documents/>> Acesso em: 26 de março de 2018.
- [51] INAMASU, R., NAIME, J. D. M., RESENDE, A. V., BASSOI, L., BERNARDI, A. Agricultura de precisão: um novo olhar. *São Carlos: Embrapa Instrumentação* (2011).
- [52] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Internet of things: wireless sensor networks*. IEC, 2014.

- [53] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *The Internet of Things*. ITU, 2006.
- [54] JAWAD, H., NORDIN, R., GHARGHAN, S., JAWAD, A., ISMAIL, M. Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review. *Sensors* 17, 8 (2017), 1781.
- [55] JAYARAMAN, P. P., YAVARI, A., GEORGAKOPOULOS, D., MORSHED, A., ZASLAVSKY, A. Internet of things platform for smart farming: Experiences and lessons learnt. *Sensors (Switzerland)* 16, 11 (2016), 1–17.
- [56] KAA COMPANY. Kaa IoT platform, 2017. Disponível em <<https://www.kaaproject.org/>> Acesso em: 13 de junho de 2018.
- [57] KALOXYLOS, A., WOLFERT, J., VERWAART, T., TEROL, C. M., BREWSTER, C., ROBBEMOND, R., SUNDMAKER, H. The use of future internet technologies in the agriculture and food sectors: integrating the supply chain. *Procedia Technology* 8 (2013), 51–60.
- [58] KARIMI, K. What the Internet of Things (IoT) needs to become a reality. *White Paper, FreeScale and ARM* (2013).
- [59] KHATTAB, A., ABDELGAWAD, A., YELMARTHI, K. Design and implementation of a cloud-based IoT scheme for precision agriculture. *Proceedings of the International Conference on Microelectronics, ICM* (2017), 201–204.
- [60] KHEAKSONG, A., PRAYOTE, A., LEE, W. Performance evaluation of smart grid communications via network simulation version 3. In *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)* (2016), IEEE, p. 1–5.
- [61] KIM, Y.-D., YANG, Y.-M., KANG, W.-S., KIM, D.-K. Computer Standards & Interfaces On the design of beacon based wireless sensor network for agricultural emergency monitoring systems. *Computer Standards & Interfaces* 36, 2 (2011), 288–299.
- [62] KNYAZEVA, N. S., CHECHETKIN, V. A., LETAVIN, D. A. Comparative analysis of standards for Low-power Wide-area Network. *2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SINKHROINFO 2017* (2017).
- [63] KRANENBURG, V. *The Internet of things*, vol. 4. 2011.
- [64] KRČO, S., POKRIĆ, B. IEEE Internet of Things Journal: From Precision Agriculture to Prescription Agriculture, 2016. Disponível em <<https://iot.ieee.org/newsletter/november-2016/from-precision-agriculture-to-prescription-agriculture.html>> Acesso em: 13 de junho de 2018.
- [65] LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE. *IEEE Standard for Telecommunications and information Local and metropolitan area networks — Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. IEEE Computer Society. 2006.

- [66] LIBELIUM COMPANY. Smart Agriculture project in an Australian nursery to ensure crops health and reduce losses | Libelium. Disponível em <<http://www.libelium.com/smart-agriculture-project-in-an-australian-nursery-to-ensure-crops-health-and-reduce-losses/>> Acesso em: 10 de novembro de 2017.
- [67] LIBELIUM COMPANY. The first smart vineyard in lebanon chooses libelium's technology to face the climate change, 2017. Disponível em <<http://www.libelium.com/the-first-smart-vineyard-in-lebanon-chooses-libeliiums-technology-to-face-the-climate-change/>!prettyPhoto> Acesso em: 30 de março de 2019.
- [68] LIBELIUM COMPANY. Precision Farming to control irrigation and improve fertilization strategies on corn crops | Libelium, 2017. Disponível em <<http://www.libelium.com/precision-farming-to-control-irrigation-and-improve-fertilization-strategies-on-corn-crops/>> Acesso em: 27 de outubro de 2017.
- [69] LIBELIUM COMPANY. Smart agriculture project in an australian nursery to ensure crops health and reduce losses, 2017. Disponível em <<http://www.libelium.com/smart-agriculture-project-in-an-australian-nursery-to-ensure-crops-health-and-reduce-losses/>> Acesso em: 30 de março de 2019.
- [70] LIBELIUM COMPANY. New weather station sensors integrated in libelium's iot platform perform maximum accuracy, 2018. Disponível em <<http://www.libelium.com/new-weather-station-sensors-integrated-in-libeliiums-iot-platform-perform-maximum-accuracy/>> Acesso em: 30 de março de 2019.
- [71] LIBELIUM COMPANY. New vineyard project developed with libelium iot platform on agrotech, the app for crop management, powered by efor and ibercaja on microsoft azure, 2019. Disponível em <<http://www.libelium.com/new-vineyard-project-developed-with-libelium-iot-platform-on-agrotech-the-app-for-crop-management-powered-by-efor-and-ibercaja-on-microsoft-azure/>> Acesso em: 30 de março de 2019.
- [72] LIM, W., TORRES, H. K., OPPUS, C. M. An Agricultural Telemetry System Implemented Using an Arduino-Android Interface.
- [73] LIU, J., WU, J., ZHANG, J., LIU, J. Status and Prospects of Agricultural Information Technology. In *Proceedings of the 2016 International Conference on Computer Science and Electronic Technology* (2016), Atlantis Press, p. 322–327.
- [74] LIU, Y., HAN, W., ZHANG, Y., LI, L., WANG, J., ZHENG, L. An Internet-of-Things solution for food safety and quality control: A pilot project in China. *Journal of Industrial Information Integration* 3 (2016), 1–7.
- [75] LOMBARDO, S., SARRI, D., CORVO, L., VIERI, M. Approaching to the Fourth Agricultural Revolution: Analysis of Needs for the Profitable Introduction of Smart Farming in Rural Areas. *Proceedings of the 8th International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture, Food and Environment (HAICTA 2017)* 2030, 521–532.

- [76] LÓPEZ RIQUELME, J. A., SOTO, F., SUARDÍAZ, J., SÁNCHEZ, P., IBORRA, A., VERA, J. A. Wireless Sensor Networks for precision horticulture in Southern Spain. *Computers and Electronics in Agriculture* 68, 1 (2009), 25–35.
- [77] LORA ALLIANCE TECHNICAL MARKETING WORKGROUP. A technical overview of LoRa and LoRaWAN. Relatório Técnico, LoRaWAN Alliance, 2015.
- [78] MA, J., ZHOU, X., LI, S., LI, Z. Connecting agriculture to the internet of things through sensor networks. *Proceedings - 2011 IEEE International Conferences on Internet of Things and Cyber, Physical and Social Computing, iThings/CPSCoM 2011* (2011), 184–187.
- [79] MAFUTA, M., ZENNARO, M., BAGULA, A., AULT, G., GOMBACHIKA, H., CHADZA, T. Successful Deployment of a Wireless Sensor Network for Precision Agriculture in Malawi. *International Journal of Distributed Sensor Networks* 9, 5 (2013).
- [80] MAGRIN, D. *Network level performances of a LoRa system*. Dissertação de mestrado, Università degli Studi di Padova, Padova, 2016.
- [81] MAJONE, B., VIANI, F., FILIPPI, E., BELLIN, A., MASSA, A., TOLLER, G., ROBOL, F., SALUCCI, M. Wireless Sensor Network Deployment for Monitoring Soil Moisture Dynamics at the Field Scale. *Procedia Environmental Sciences* 19 (2013), 426–435.
- [82] MALM, A. IoT Platforms and Software. Relatório Técnico, Berg Insight, 2015.
- [83] MATESE, A., DI GENNARO, S. F., ZALDEI, A., GENESIO, L., VACCARI, F. P. A wireless sensor network for precision viticulture: The NAV system. *Computers and Electronics in Agriculture* 69, 1 (2009), 51–58.
- [84] MEDDEB, A. Internet of things standards: who stands out from the crowd? *IEEE Communications Magazine* 54, 7 (2016), 40–47.
- [85] MIKHAYLOV, K., PETAJAJARVI, J., JANHUNEN, J. On LoRaWAN scalability: Empirical evaluation of susceptibility to inter-network interference. In *EuCNC 2017 - European Conference on Networks and Communications* (2017).
- [86] MOHD KASSIM, M. R., MAT, I., HARUN, A. N. Wireless Sensor Network in precision agriculture application. *2014 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)* (2014), 1–5.
- [87] MORGENSTERN, M., ALVES, R., BATTISTI, G., MARAN, V. U-agro: Uma arquitetura ubíqua de gerenciamento de atividades na agricultura de precisão. *ICCEEg-10* (2015).
- [88] MUCHA, P. M. D. A. *O Uso de Simulação de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) para Gestão de TI em Ambientes Agrícolas*. Monografia de especialização, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

- [89] NAKUTIS, Z., DEKSNYS, V., JARUEVICIUS, I., MARCINKEVICIUS, E., RONKAINEN, A., SOUMI, P., NIKANDER, J., BLASZCZYK, T., ANDERSEN, B. Remote agriculture automation using wireless link and iot gateway infrastructure. In *2015 26th International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA)* (2015), IEEE, p. 99–103.
- [90] NAYYAR, A., SINGH, R. A Comprehensive Review of Simulation Tools for Wireless Sensor Networks ( WSNs ). *Journal of Wireless Networking and Communications* 5, 1 (2015), 19–47.
- [91] NUNES, JOSÉ LUIS DA SILVA. Agrolink: Agricultura de Precisão, 2016. Disponível em <[https://www.agrolink.com.br/georreferenciamento/agricultura-de-precisao\\_361504.html](https://www.agrolink.com.br/georreferenciamento/agricultura-de-precisao_361504.html)> Acesso em: 17 de abril de 2017.
- [92] OJHA, T., MISRA, S., RAGHUWANSHI, N. S. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture* 118 (2015), 66–84.
- [93] OMNET++ MANUAL. Omnet++ zigbee module, 2018. Disponível em <<http://omnet-manual.com/omnet-zigbee-module/>> Acesso em: 23 de junho de 2018.
- [94] OPENIoT CONSORTIUM. OpenIoT – Open Source cloud solution for the Internet of Things, 2017. Disponível em <<http://www.openiot.eu/>> Acesso em: 10 de novembro de 2017.
- [95] PAL, D. A comparative analysis of modern day network simulators. In *Advances in Computer Science, Engineering & Applications*. Springer, 2012, p. 489–498.
- [96] PALATTELLA, M. R., DOHLER, M., GRIECO, A., RIZZO, G., TORSNER, J., ENGEL, T., LADID, L. Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 34, 3 (2016), 510–527.
- [97] PARANHOS, R., FIGUEIREDO FILHO, D. B., DA ROCHA, E. C., DA SILVA JÚNIOR, J. A., NEVES, J. A. B., SANTOS, M. L. W. D. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de pearson: o retorno. *Leviathan (São Paulo)*, 8 (2014), 66–95.
- [98] PARK, M. IEEE 802.11ah: Sub-1-GHz license-exempt operation for the internet of things. *IEEE Communications Magazine* 53, 9 (2015), 145–151.
- [99] PETAJAJARVI, J., MIKHAYLOV, K., ROIVAINEN, A., HANNINEN, T., PETTISALO, M. On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. In *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)* (2015), IEEE, p. 55–59.
- [100] PIROMALIS, D. D., ARVANITIS, K. G., SIGRIMIS, N. *DASH7 mode 2: A promising perspective for wireless agriculture*, vol. 4. IFAC, 2013.

- [101] POPOVIĆ, T., LATINVIĆ, N., PEŠIĆ, A., ZEČEVIĆ, Ž., KRSTAJIĆ, B., DJUKANOVIĆ, S. Architecting an IoT-enabled platform for precision agriculture and ecological monitoring: A case study. *Computers and Electronics in Agriculture* 140 (2017), 255–265.
- [102] RAWAT, P., SINGH, K. D., CHAOUCHI, H., BONNIN, J. M. Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies. *Journal of Supercomputing* 68, 1 (2014), 1–48.
- [103] RAY, P. A survey on Internet of Things architectures. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* (2016).
- [104] RAY, P. P. Internet of things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments* 9, 4 (2017), 395–420.
- [105] RAY, P. P., AGARWAL, S. Bluetooth 5 and Internet of Things: Potential and architecture. *International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System, SCOPES 2016 - Proceedings* (2017), 1461–1465.
- [106] RAZA, U., KULKARNI, P., SOORIYABANDARA, M. Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 19, 2 (2017), 855–873.
- [107] ROHDE & SCHWARZ COMPANY. eMTC e NB-IoT pavimentam o caminho para 5G/IoT|Solution|Rohde & Schwarz, 2013. Disponível em <[https://www.rohde-schwarz.com/br/solucoes/comunicacoes-sem-fio/lte/em-foco/emtc-e-nb-iot-pavimentando-o-caminho-para-5g-iot\\_230416.html](https://www.rohde-schwarz.com/br/solucoes/comunicacoes-sem-fio/lte/em-foco/emtc-e-nb-iot-pavimentando-o-caminho-para-5g-iot_230416.html)> Acesso em: 12 de dezembro de 2017.
- [108] RUAN, J., SHI, Y. Monitoring and assessing fruit freshness in IOT-based e-commerce delivery using scenario analysis and interval number approaches. *Information Sciences* 373 (2016), 557–570.
- [109] SABRI, N., ALJUNID, S., AHMAD, R., MALIK, M., YAHYA, A., KAMARUDDIN, R., SALIM, M. Wireless sensor actor networks. *ISWTA 2011 - 2011 IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications* (2011), 90–95.
- [110] SAHOTA, H., KUMAR, R., KAMAL, A., HUANG, J. H. J. An energy-efficient wireless sensor network for precision agriculture. *Computers and Communications (ISCC), 2010 IEEE Symposium on* (2010), 347–350.
- [111] SALARIAN, H., CHIN, K. W., NAGHDY, F. Coordination in wireless sensor-actuator networks: A survey. *Journal of Parallel and Distributed Computing* 72, 7 (2012), 856–867.
- [112] SCHLIENZ, J E RADDINO, D. Whitepaper: Narrowband internet of things. Relatório Técnico, Rohde & Schwarz Company, 2016.
- [113] SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E INVESTIMENTOS ESTRATÉGICOS. Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento Relatório de Avaliação Plano Plurianual 2004-2007. Relatório Técnico, 2008.

- [114] SEMTECH CORPORATION. Long Range, Low Power RF Transceiver 860-1000MHz with LoRa Technology, 2018. Disponível em <<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1272>> Acesso em: 10 de março de 2018.
- [115] SEMTECH CORPORATION. Semtech SX1301 Digital Baseband Chip for outdoor LoRaWAN macro gateways, 2018. Disponível em <<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-gateways/sx1301>> Acesso em: 10 de março de 2018.
- [116] SERI, B., VISHNEPOLSKY, G. BlueBorn: The dangers of Bluetooth implementations: Unveiling zero day vulnerabilities and security flaws in modern Bluetooth stacks, 2017. Disponível em <[http://go.armis.com/hubfs/BlueBorne Technical White Paper-1.pdf?t=1513642788073](http://go.armis.com/hubfs/BlueBorne%20Technical%20White%20Paper-1.pdf?t=1513642788073)> Acesso em: 13 de junho de 2018.
- [117] SHUBEITA, F. D. M., AMARAL, L. A., MARCON, C., DE VIT, A. R. D. WSN experiment and a grid-based network architecture proposal. *Brazilian Symposium on Computing System Engineering, SBESC* (2012), 225–228.
- [118] SIGFOX COMPANY. Sigfox device cookbook: communication configuration. Relatório Técnico, 2018.
- [119] SINGH, S., JHA, R., RANJAN, P., TRIPATHY, M. R. Software Aspects of WSN for Monitoring in an Indian Greenhouse. *Proceedings - 2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, CICN 2015* (2016), 168–172.
- [120] SINHA, N., PUJITHA, K. E., ALEX, J. S. R. Xively based sensing and monitoring system for iot. In *Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2015 International Conference on* (2015), IEEE, p. 1–6.
- [121] SINHA, R. S., WEI, Y., HWANG, S.-H. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express* 3, 1 (2017), 14–21.
- [122] SLABICKI, M., PREMSANKAR, G., DI FRANCESCO, M. Adaptive configuration of lora networks for dense IoT deployments. *IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium: Cognitive Management in a Cyber World, NOMS 2018* (2018), 1–9.
- [123] STARA S/A INDÚSTRIA DE IMPLEMENTOS AGRÍCOLA. Telemetria Stara: Sua fazenda na palma da mão. Disponível em <<https://www.stara.com.br/wp-content/uploads/2015/06/WEB-TELEMETRIA-POR.pdf>> Acesso em: 16 de abril de 2018.
- [124] TALAVERA, J. M., TOBÓN, L. E., GÓMEZ, J. A., CULMAN, M. A., ARANDA, J. M., PARRA, D. T., QUIROZ, L. A., HOYOS, A., GARRETA, L. E. Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields. *Computers and Electronics in Agriculture* 142, 118 (2017), 283–297.
- [125] TIAN, L., DERONNE, S., LATRÉ, S., FAMAHEY, J. Implementation and validation of an IEEE 802 . 11ah module for NS-3. *Workshop on ns-3 (WNS3)*, June (2016).

- [126] TOUFIK, ISSAM E MEREDITH, J. M. Study of Narrow-Band Internet of Things (NB-IoT) Radio Frequency (RF) requirement to co-existence with Code Division Multiple Access (CDMA), 2016. Disponível em <<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3105>> Acesso em: 12 de dezembro de 2018.
- [127] TRAN, M., KONCAGUL, E., CONNOR, R. Water and jobs: facts and figures. Relatório Técnico, UNESCO, 2016.
- [128] TZOUNIS, A., KATSOULAS, N., BARTZANAS, T., KITTAS, C. Internet of things in agriculture, recent advances and future challenges. 31–48.
- [129] UR REHMAN, A., ABBASI, A. Z., ISLAM, N., SHAIKH, Z. A. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces* 36, 2 (2014), 263–270.
- [130] VAN DE STEEG, J. A., SPAROVEK, G., RANIERI, S. B. L., MAULE, R. F., COOPER, M., DOURADO NETO, D., ALVES, M. C. Environmental impact of the Brazilian Agrarian Reform process from 1985 to 2001. *Scientia Agricola* 63, 2 (2006), 176–183.
- [131] VAN DEN ABEELE, F., HAXHIBEQIRI, J., MOERMAN, I., HOEBEKE, J. Scalability analysis of large-scale lorawan networks in ns-3. *IEEE Internet of Things Journal* 4, 6 (2017), 2186–2198.
- [132] VERONA, A. B. *Simulação e análise de redes de sensores sem fio aplicadas à viticultura*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Maringá, Paraná, 2010.
- [133] WANG, N., ZHANG, N., WANG, M. Wireless sensors in agriculture and food industry - Recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture* 50, 1 (2006), 1–14.
- [134] WEIGHTLESS SIG. Weightless specification, 2015. Disponível em <<http://www.weightless.org/about/weightless-specification>> Acesso em: 13 de junho de 2018.
- [135] WEYN, M., ERGEERTS, G., WANTE, L., VERCAUTEREN, C., HELLINCKX, P. Survey of the DASH7 alliance protocol for 433 MHz wireless sensor communication. *International Journal of Distributed Sensor Networks* 9, 12 (2013).
- [136] WI-FI ALLIANCE. Wi-Fi HaLow: Low power, long range Wi-Fi, 2017. Disponível em <<https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-halow>> Acesso em: 12 de outubro de 2018.
- [137] WOLFERT, S., GOENSE, D., SORENSEN, C. A. G. A future internet collaboration platform for safe and healthy food from farm to fork. *Annual SRII Global Conference, SRII* (2014), 266–273.
- [138] YICK, J., MUKHERJEE, B., GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks* 52, 12 (2008), 2292–2330.

- 
- [139] YURISH, S. Y., GOMES, M. T. S. *Smart Sensors and MEMS*, 1 ed. NATO Science Series 181. Springer Netherlands, 2004.
- [140] ZHANG, L., XIAO, D. Collaborative image compression with error bounds in wireless sensor networks for crop monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture* 89 (2012), 1–9.
- [141] ZHENYU, L., SHENG, D., CHONG, S. Precision agriculture monitoring system based on wireless sensor networks. *Wireless Communications and Applications (ICWCA 2012), IET International Conference on* (2012), 1–5.
- [142] ZIGBEE ALLIANCE. ZigBee. Disponível em <<https://www.zigbee.org/>> Acesso em: 23 de outubro de 2017.