



Universidade Federal de Uberlândia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

LoRa e IEEE 802.15.4 a 2,4 GHz: Análise Comparativa de Comunicação Sem Fio e Viabilidade Energética com Fontes Renováveis em Cenários Industriais

Lucas de Araujo Dantas

Uberlândia

2026



Universidade Federal de Uberlândia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Lucas de Araujo Dantas

**LoRa e IEEE 802.15.4 a 2,4 GHz: Análise Comparativa
de Comunicação Sem Fio e Viabilidade Energética com
Fontes Renováveis em Cenários Industriais**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Uberlândia como parte dos re-
quisitos para a obtenção do título de Mes-
tre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Márcio José da Cunha
Coorientador: Marcelo Barros de Almeida

Uberlândia

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

D192 Dantas, Lucas de Araujo, 2000-
2026 LoRa e IEEE 802.15.4 a 2,4 GHz: Análise Comparativa de
Comunicação Sem Fio e Viabilidade Energética com Fontes
Renováveis em Cenários Industriais [recurso eletrônico] / Lucas de
Araujo Dantas. - 2026.

Orientador: Márcio José da Cunha.

Coorientador: Marcelo Barros de Almeida.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.106>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Cunha, Márcio José da, 1978-, (Orient.).
II. Almeida, Marcelo Barros de, 1972-, (Coorient.). III. Universidade
Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV.
Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

Título: LoRa e IEEE 802.15.4 a 2,4 GHz: Análise Comparativa de Comunicação Sem Fio e Viabilidade Energética com Fontes Renováveis em Cenários Industriais

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Data da defesa: 06 de fevereiro de 2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Barros de Almeida (Coorientador)
Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Prof. Dr. Daniel Pereira de Carvalho
Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Prof. Dr. Rodrigo Maximiano Antunes de Almeida
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 818, PPGEELT				
Data:	Seis de fevereiro de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:00
Matrícula do Discente:	12412EEL005				
Nome do Discente:	Lucas de Araujo Dantas				
Título do Trabalho:	LoRa e IEEE 802.15.4 a 2,4 GHz: Análise Comparativa de Comunicação Sem Fio e Viabilidade Energética com Fontes Renováveis em Cenários Industriais				
Área de concentração:	Processamento da Informação				
Linha de pesquisa:	Metodologia e Técnicas da Computação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Márcio José da Cunha. Título do Projeto: Big Data e Engenharia de Dados aplicados em processos industriais. Agência financiadora: Não se aplica. Número do processo na agência financiadora: Não se aplica. Vigência do projeto: 2020 - atual.				

Reuniu-se através de videoconferência, a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Daniel Pereira de Carvalho (UFU), Rodrigo Maximiano Antunes de Almeida (UNIFEI) e Márcio José da Cunha, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Márcio José da Cunha, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Barros de Almeida, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/02/2026, às 15:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio José da Cunha, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/02/2026, às 15:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Maximiano Antunes de Almeida, Usuário Externo**, em 06/02/2026, às 15:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Pereira de Carvalho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/02/2026, às 16:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7028977** e o código CRC **B9D64BDF**.

Abstract

The Fourth Industrial Revolution, characterized by the interconnection of systems, relies on the Internet of Things (IoT) as a fundamental pillar, fostering the convergence between the physical and digital worlds. Within the Industrial IoT (IIoT) landscape, technologies such as ZigBee and LoRa have driven the adoption of monitoring solutions due to their flexibility and low power consumption. However, ensuring network reliability and energy autonomy remains a critical challenge for scalability.

In this context, this study presents a comparative analysis of two wireless solutions operating in the 2.4 GHz ISM band: the IEEE 802.15.4 standard, implemented via the AT86RF233 transceiver, and the LoRa physical layer (PHY), utilizing the SX1280 transceiver. Specifically, the work evaluates the robustness of LoRa's proprietary modulation against the standardized IEEE protocol, while also investigating the feasibility of applying photovoltaic energy harvesting.

Experimental results indicate that IEEE 802.15.4 exhibited greater stability in packet delivery, maintaining success rates above 90% at distances up to 150 meters, albeit with significantly higher energy consumption due to the external amplification required to reach 12 dBm. In contrast, LoRa technology demonstrated superior energy efficiency, consuming approximately half the current in the tested configurations, while maintaining competitive transmission rates. Additionally, the technical feasibility of photovoltaic panels was confirmed, as they successfully supplied the full energy demand during continuous transmission under high solar irradiance conditions.

Keywords: Automation, Connectivity, IEEE 802.15.4, Industrial communication, IIoT, IoT, LoRa, LPWAN, Sensor technology, ZigBee.

Resumo

A Quarta Revolução Industrial, caracterizada pela interconexão de sistemas, tem na Internet das Coisas (IoT) um pilar fundamental, promovendo a convergência entre os mundos físico e digital. No cenário da IoT Industrial (IIoT), tecnologias como ZigBee e LoRa impulsionaram a adoção de soluções de monitoramento devido à flexibilidade e baixo consumo. No entanto, garantir confiabilidade e autonomia energética permanecem desafios críticos para a escalabilidade dessas redes.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma análise comparativa de duas soluções sem fio operando na banda ISM de 2,4 GHz: o padrão IEEE 802.15.4, implementado via transceptor AT86RF233, e a camada física (PHY) LoRa, utilizando o transceptor SX1280. O estudo avalia especificamente a robustez da modulação proprietária do LoRa frente ao padrão IEEE 802.15.4, além de investigar a viabilidade da aplicação de *energy harvesting* fotovoltaico.

Os resultados experimentais indicam que o IEEE 802.15.4 exibiu maior estabilidade na entrega de pacotes, mantendo taxas de sucesso acima de 90% em distâncias de até 150 metros, embora apresente consumo energético significativamente maior devido ao uso de amplificação externa para atingir 12 dBm. Em contrapartida, a tecnologia LoRa demonstrou superior eficiência energética, consumindo aproximadamente metade da corrente nas configurações testadas, com taxas de transmissão competitivas. Adicionalmente, a viabilidade técnica dos painéis fotovoltaicos foi confirmada, suprimindo integralmente a demanda energética durante a transmissão contínua sob condições de alta irradiância.

Palavras-chave: Automação, Conectividade, IEEE 802.15.4, Indústria 4.0, IIoT, IoT, LoRa, LPWAN, Sensores, ZigBee.

Prefácio

Esta dissertação de mestrado foi submetida à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

A dissertação foi desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGELT), tendo como orientador o Prof. Dr. **Márcio José da Cunha**. O Prof. Dr. **Marcelo Barros de Almeida** foi coorientador deste trabalho.

Esta pesquisa foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). O trabalho contou ainda com a infraestrutura do Laboratório de Estruturas Mecânicas (LMEST) e com o apoio financeiro da Petrobras.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos os professores que cruzaram meu caminho nesta jornada acadêmica. Um agradecimento especial aos professores Marcelo Barros e Márcio Cunha, pela oportunidade de me orientarem durante esta dissertação e por todos os ensinamentos compartilhados.

Ao Laboratório de Estruturas Mecânicas (LMEST) e a todos os seus integrantes, meu muito obrigado. Foi neste ambiente que tive a chance de aprender e crescer, tanto no âmbito profissional e acadêmico, quanto no pessoal. Em especial, agradeço aos colegas Felipe Narimatsu, Lukas Gabriel, Stephan e Luiz Pedro, pela parceria nas rotinas de pesquisa, pelas discussões técnicas e pelo excelente convívio.

Minha gratidão se estende também aos amigos Guilherme Almeida e Lucas Sleyder, que, mesmo não pertencendo ao cotidiano do laboratório, foram fundamentais com seu apoio e amizade ao longo deste percurso.

À minha avó, Nair Germano, que, mesmo sem ter tido as oportunidades que eu tive, sempre demonstrou um amor incondicional pelos estudos.

Por fim, e não menos importante, agradeço à minha mãe, Cristiane Araujo, que desde o meu nascimento me apoia, incentiva e é uma fonte constante de inspiração.

A todos, meu sincero e eterno obrigado.

“Cabeça erguida, olhar sincero, tá com medo de quê? Nunca foi fácil, junta os seus pedaços e desce pra arena. Mas lembre-se: aconteça o que aconteça, nada como um dia após o outro dia.”

– Racionais MC's

Sumário

Abstract	i
Resumo	ii
Prefácio	iii
Agradecimentos	iv
Alinhamento com a Linha de Pesquisa	viii
Lista de Tabelas	x
Lista de Figuras	xiii
Lista de Abreviações	xiv
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Justificativas	5
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivos Específicos	6
1.3 Contribuições	6
1.4 Organização do Trabalho	7
2 Revisão Bibliográfica	9
2.1 Referenciais Teóricos	9
2.1.1 IEEE 802.15.4	9

2.1.1.1	Introdução	9
2.1.1.2	Tipos de Dispositivos e Frequências	10
2.1.1.3	Camada MAC	13
2.1.1.4	Camada PHY	17
2.1.2	LoRa	22
2.1.2.1	Introdução	22
2.1.2.2	Camada PHY	24
2.2	Trabalhos Relacionados	30
2.2.1	Metodologia de Revisão Bibliográfica	30
2.2.2	Análise da Literatura e Contribuições para o Projeto	31
3	Metodologia	33
3.1	Tecnologias	33
3.2	Hardware	36
3.3	Firmware	50
3.4	Testes Práticos	55
4	Resultados	59
4.1	Consumo	59
4.1.1	Sistema	59
4.1.2	Fontes Renováveis	67
4.2	Taxa de dados	69
5	Discussão	74
5.1	Desempenho do IEEE 802.15.4	74
5.2	Desempenho do LoRa	75
5.3	Análise Comparativa	76
6	Conclusões	77
6.1	Trabalhos Futuros	78
	Referências	80

Alinhamento com a Linha de Pesquisa

Linha de Pesquisa: Sistemas Computacionais Industriais

Esta dissertação foca no estudo e análise comparativa entre redes sem fio de baixo consumo operando na faixa de 2,4 GHz, globalmente aceita para ambientes industriais sem fio. Alinhada à linha de pesquisa de Sistemas Computacionais Industriais, o trabalho se aprofunda nos princípios da Internet das Coisas Industrial (IIoT), um pilar fundamental da Indústria 4.0.

A IIoT adapta os conceitos de IoT para âmbito industrial, com foco em qualidade e controle por meio do monitoramento de dados em tempo real em processos industriais. Protocolos de comunicação sem fio como ZigBee e LoRa podem ser utilizados em aplicações IIoT, pois oferecem a flexibilidade, eficiência energética e comunicação de longa distância vitais para aplicações industriais.

A pesquisa aborda os desafios da implementação da IIoT, incluindo a necessidade de garantir confiabilidade e comunicação em tempo real em ambientes adversos, além de buscar soluções eficientes no consumo de energia para dispositivos autônomos. Ao investigar a aplicabilidade e o desempenho de tecnologias de comunicação sem fio de baixa potência e longo alcance no contexto da IIoT, esta dissertação contribui diretamente para o avanço e a compreensão dos Sistemas Computacionais Industriais, que dependem intrinsecamente de conectividade robusta e eficiente para sua operação e automação.

Lista de Tabelas

2.1	Tabela de Frequências e Características (Parte 1).	11
2.2	Tabela de Frequências e Características (Parte 2).	11
2.3	Quadro da camada MAC (simplificado).	17
2.4	Quadro da camada MAC.	17
2.5	Descrição de canais.	18
2.6	Estrutura simplificada do quadro da camada PHY.	21
2.7	Estrutura detalhada do quadro da camada PHY.	21
2.8	Largura de Banda X Sensibilidade do Receptor.	27
2.9	Largura de Banda X Taxa de Dados.	27
3.1	Principais Informações dos Transceptores (Semtech, 2019; Corporation, 2025).	34
3.2	Principais Transceptores IEEE 802.15.4 para ZigBee na faixa de 2,4 GHz (Microchip Technology Inc., 2023b,a; Texas Instruments, 2011, 2006).	35
3.3	Comparação dos principais parâmetros dos marcadores (LoRa e ZigBee).	44
3.4	Modos de operação e lógica de controle (Destaque para a configuração utilizada).	49
3.5	Parâmetros do SX1280 utilizado nos testes.	51
3.6	Parâmetros comparáveis para os testes entre SX1280 e AT86RF233.	53
4.1	PCB A2 com potência de 4dBm com quadro de 255 bytes (LoRa - painel solar).	69
4.2	PCB A2 com potência de 4dBm com quadro de 115 bytes (IEEE 802.15.4).	70

4.3	PCB A2 com potência de 12dBm com quadro de 115 bytes (IEEE 802.15.4 com PA/LNA).	70
4.4	PCB A2 com potência de 4dBm com quadro de 115 bytes (LoRa). . .	70
4.5	PCB A2 com potência de 12dBm com quadro de 115 bytes (LoRa). .	71
4.6	PCB A2 com potência de 12dBm com quadro de 255 bytes (LoRa). .	71

Lista de Figuras

2.1	Arquitetura ZigBee.	10
2.2	Exemplo de arquitetura de comunicação ZigBee.	12
2.3	Topologias estrela e mesh respectivamente.	13
2.4	Comunicação entre as camadas MAC e PHY.	14
2.5	Transferência de dados para um coordenador no IEEE 802.15.4: (a) Beacon Habilitado e (b) Beacon Desabilitado.	15
2.6	Transferência de dados de um coordenador para um dispositivo: (a) Beacon Habilitado e (b) Beacon desabilitado.	16
2.7	Exemplo de comunicação entre camadas.	21
2.8	Interação entre o quadro da camada MAC e o quadro da camada PHY.	22
2.9	Exemplo de arquitetura LoRa.	24
2.10	Representação da modulação CSS do LoRa.	26
2.11	Formato de quadro explícito e implícito.	28
2.12	Processo de design para formulação de casos de uso na IIoT.	31
3.1	PCB A1, A2 LoRa e A2 IEEE.	37
3.3	Vista 3D da camada inferior (BOTTOM) da PCB A2 IEEE.	37
3.2	Vista 3D da camada superior (TOP) da PCB A2 IEEE.	38
3.4	Layout da primeira camada PCB A2 IEEE.	38
3.5	Layout da segunda camada PCB A2 IEEE.	39
3.6	Layout da terceira camada PCB A2 IEEE.	39
3.7	Layout da quarta camada PCB A2 IEEE.	39
3.8	Vista 3D da camada superior (TOP) da PCB A2 LoRa.	40
3.9	Vista 3D da camada inferior (BOTTOM) da PCB A2 LoRa.	40

3.10	Layout da primeira camada PCB A2 LoRa.	41
3.11	Layout da segunda camada PCB A2 LoRa.	41
3.12	Layout da terceira camada PCB A2 LoRa.	41
3.13	Layout da quarta camada PCB A2 LoRa.	42
3.14	Carta de Smith e perda de retorno (LoRa) com atuação da rede Pi. .	42
3.15	Carta de Smith e perda de retorno (IEEE).	43
3.16	Comparação dos gráficos de radiação das antenas Johanson.	46
3.17	Esquemático da PCB A2 IEEE.	47
3.18	Esquemático da PCB A2 LoRa.	47
3.19	Esquemático PCB A2 (SKY66112-11).	48
3.20	Relação entre Tensão VCC2 e Potência de Saída (em 2440 MHz). . .	49
3.21	Máquina de estados SX1280.	51
3.22	Máquina de estados AT86RF233.	52
3.23	Fluxograma do <i>firmware</i>	54
3.24	Módulo de transmissão.	56
3.25	Módulo de recepção.	56
3.26	Processo experimental entre módulos de recepção e transmissão. . . .	57
3.27	Distâncias medidas para os testes.	57
3.28	Local onde foram aferidos os testes.	58
4.1	Sistema de medição de corrente.	60
4.2	Corrente em função do tempo (RX 4dBm IEEE 802.15.4).	61
4.3	Corrente em função do tempo (TX 4dBm IEEE 802.15.4).	61
4.4	Corrente em função do tempo (RX 12dBm IEEE 802.15.4).	62
4.5	Corrente em função do tempo (TX 12dBm IEEE 802.15.4).	62
4.6	Corrente em função do tempo (RX 4dBm LoRa).	63
4.7	Corrente em função do tempo (TX 4dBm LoRa).	64
4.8	Corrente em função do tempo (RX 12 dBm LoRa (115 bytes)).	64
4.9	Corrente em função do tempo (TX 12 dBm LoRa (115 bytes)).	65
4.10	Corrente em função do tempo (RX 12 dBm LoRa (255 bytes)).	65

4.11	Corrente em função do tempo (TX 12 dBm LoRa (255 bytes)).	66
4.12	Consumo de corrente na transmissão e recepção.	66
4.13	Painel fotovoltaico (MPT3.6-150).	67
4.14	Curva do painel MPT3.6-150.	68
4.15	Sistema com painel conectado.	68
4.16	Quantidade de bytes perdidos em função da distância.	72
4.17	Comparação da taxa teórica em função da distância.	73
4.18	Comparação das taxas de dados em função da distância.	73

Lista de Abreviações

Abreviação	Descrição
ACK	Reconhecimento (<i>Acknowledgment</i>)
ADR	<i>Adaptive Data Rate</i>
AFC	<i>Automatic Frequency Correction</i>
APL	Camada de Aplicação (<i>Application Layer</i>)
APS	Subcamada de Suporte à Aplicação (<i>Application Support Sublayer</i>)
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
BW	Largura de Banda (<i>Bandwidth</i>)
CAD	Detecção de Atividade de Canal (<i>Channel Activity Detection</i>)
CAP	<i>Contention Access Period</i>
CCA	Avaliação de Canal Livre (<i>Clear Channel Assessment</i>)
CDC	Unidade Central de Coleta de Dados (<i>Central Data Collection</i>)
CI	Circuito Integrado
CR	Taxa de Codificação (<i>Code Rate</i>)
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CPS	Sistemas Ciberfísicos (<i>Cyber-Physical Systems</i>)
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
ED	Detecção de Energia (<i>Energy Detection</i>)
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>
FEC	Correção de Erros Adiantada (<i>Forward Error Correction</i>)
FFD	Dispositivo <i>Full-Function</i> (<i>Full-Function Device</i>)
FLRC	<i>Fast Long Range Chirp</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
GTS	<i>Guaranteed Time Slot</i>
HIL	<i>Hardware-in-the-Loop</i>
IIoT	Internet das Coisas Industrial (<i>Industrial Internet of Things</i>)
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
IRQ	<i>Interrupt Request</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific, and Medical</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LNA	Amplificador de Baixo Ruído (<i>Low Noise Amplifier</i>)
LoRa	<i>Long Range</i>

LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
LPWAN	Redes de Baixa Potência de Longo Alcance (<i>Low-Power Wide-Area Networks</i>)
LQI	<i>Link Quality Indicator</i>
MAC	Controle de Acesso ao Meio (<i>Medium Access Control</i>)
MCPS	<i>MAC Common Part Sublayer</i>
MFR	Rodapé do MAC (<i>MAC Footer</i>)
MHDR	<i>Mac Header</i>
MLME	<i>MAC Layer Management Entity</i>
MPDU	Unidade de Dados do Protocolo MAC (<i>MAC Protocol Data Unit</i>)
MRT-LoRa	<i>Multi-hop Real-Time Communication Protocol for Industrial IoT Applications over LoRa</i>
NB-IoT	<i>Narrowband Internet of Things</i>
NTN	<i>Non-Terrestrial Network</i>
NLoS	<i>Non-Line-of-Sight</i>
NWK	Camada de Rede (<i>Network Layer</i>)
OOK	<i>On-Off Keying</i>
O-QPSK	<i>Offset-Quadrature Phase Shift Keying</i>
PA	Amplificador de Potência (<i>Power Amplifier</i>)
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PDR	<i>Packet Delivery Rate</i>
PHY	Camada Física (<i>Physical Layer</i>)
PIB	<i>Personal Information Base</i>
PLME	<i>Physical Layer Management Entity</i>
PN	<i>Pseudo-Noise</i>
PPDU	Unidade de Dados do Protocolo da Camada PHY (<i>PHY Protocol Data Unit</i>)
PPGELT	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
PSDU	Unidade de Dados do Serviço da Camada PHY (<i>PHY Service Data Unit</i>)
PSSS	<i>Parallel Sequence Spread Spectrum</i>
PVC	Policloreto de Vinila (<i>Polyvinyl Chloride</i>)
QFN	<i>Quad Flat No-leads</i>
RF	Radiofrequência (<i>Radio Frequency</i>)
RFD	Dispositivo <i>Reduced-Function</i> (<i>Reduced-Function Device</i>)
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RX	Recepção (<i>Reception</i>)
SA	<i>IEEE Standard Association</i>
SAP	<i>Service Access Point</i>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SF	Fator de Espalhamento (<i>Spreading Factor</i>)
SHR	Cabeçalho de Sincronização (<i>Synchronization Header</i>)
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
STDBY	<i>Standby</i>
STM32L4	Microcontrolador da família STM32L4
TX	Transmissão (<i>Transmission</i>)
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
UWB	<i>Ultra-Wideband</i>
VNA	Analizador de Redes Vetorial (<i>Vector Network Analyzer</i>)
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>
WIA-PA	<i>Wireless Networks for Industrial Automation - Process Automation</i>
ZDO	Objetos de Dispositivos ZigBee (<i>ZigBee Device Objects</i>)

Capítulo 1

Introdução

A Quarta Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0, é caracterizada pela digitalização das indústrias. Entre suas características, destaca-se a interconexão e interoperabilidade de dispositivos, que introduz diversas tecnologias baseadas na internet para aprimorar a comunicação entre sistemas. Entre essas tecnologias, destacam-se processos de manufatura, como CPS, *Cloud Computing* e a IoT (Misra et al., 2020).

Entre as tecnologias que compõem a Indústria 4.0, a Internet das Coisas (IoT) destaca-se por integrar a tecnologia digital ao mundo físico, facilitando a conexão de dispositivos e a coleta de dados em tempo real (Schwab, 2016). O termo IoT refere-se a “coisas” ou “objetos” conectados à internet, que podem incluir desde tablets e lâmpadas até sensores, computadores, tênis e livros. Esses objetos estabelecem conexões por meio de cabos, fios e tecnologias sem fio, como satélites, redes celulares, Wi-Fi e Bluetooth (Greengard, 2015).

A conectividade via internet transformou-se em uma necessidade básica ao redor do mundo, onde a IoT conecta bilhões de pessoas por meio de diversos dispositivos (Misra et al., 2020). O crescimento significativo da IoT nos últimos anos fez com que o conceito de Internet das Coisas (IoT) se tornasse uma realidade cada vez mais presente em diferentes setores da sociedade. Essa presença crescente é impulsionada pelo aumento contínuo do poder de processamento computacional e pela redução dos preços do hardware, como sensores, microcontroladores, processadores, rádios e circuitos integrados (Schwab, 2016).

A IoT apresenta uma vasta gama de aplicações em diversos campos, como agricultura, saúde, manufatura, transporte e monitoramento, entre outros. Segundo pesquisa da Gartner, os gastos com a Internet das Coisas (IoT) nos principais setores ultrapassaram US\$ 268 bilhões em 2022. Além disso, prevê-se que os dispositivos IoT cresçam a uma taxa composta anual (CAGR) de 15% entre 2021 e 2025 (Narayan et al., 2023).

A implementação de dispositivos IoT exige requisitos específicos, que se diferen-

ciam dos tradicionais protocolos de telecomunicações sem fio. A escalabilidade, por exemplo, é uma característica essencial, visto que o IoT envolve um número massivo de dispositivos que operam com baixo consumo de energia e custo reduzido (Islam et al., 2024).

Para viabilizar o monitoramento em tempo real desses dados, protocolos de comunicação são fundamentais, fornecendo as diretrizes sobre como a comunicação deve ser realizada entre os dispositivos. No contexto industrial, a aplicação específica conhecida como Internet das Coisas Industrial (IIoT - *Industrial Internet of Things*) se destaca por integrar essas tecnologias de comunicação ao chão de fábrica. Entre os protocolos sem fio mais comuns no IoT e IIoT, destacam-se o Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, LoRa, Z-Wave, além de protocolos industriais tradicionais, como WirelessHART e ISA100 (Liu et al., 2018). Em comparação com a conectividade com fio, as redes sem fio oferecem vantagens, como flexibilidade de instalação e eficiência de custos. Isso permite a abrangência de nós distribuídos e o suporte a objetos móveis, como robôs, matérias-primas e peças em movimento entre as células de trabalho (Liu et al., 2019).

A integração da IoT e da Indústria 4.0 resultou no surgimento da IIoT, que se baseia na interconexão de dispositivos, maquinários e máquinas automatizadas (Misra et al., 2020). De acordo com a revista *Forbes* (Vena, 2024) indústrias inteligentes podem utilizar os fundamentos da IoT para otimizar a produção, qualidade, controle e a cadeia de comando, ao aproveitarem do monitoramento de dados em tempo real. Sensores nas indústrias transmitem informações sobre o status e o controle do sistema em processos de circuito aberto e fechado (Liu et al., 2018).

Atualmente, é possível conectar objetos do dia a dia à internet por meio de dispositivos embarcados, como eletrodomésticos, veículos, termostatos, lâmpadas e etc. Essa conectividade permite uma troca de dados quase autônoma entre dispositivos físicos, graças a tecnologias como armazenamento de baixo custo, computação em nuvem, *big data*, análises avançadas e tecnologias móveis (Alabadi et al., 2022). Plataformas digitais podem registrar, monitorar e ajustar cada conexão em um mundo hiperconectado, o que transforma a forma como processos e interações industriais são gerenciados.

Nos últimos anos, houve um aumento significativo no uso de aplicações da Internet das Coisas (IoT) nos setores industriais (Shi et al., 2019). A IoT já está bem estabelecida em contextos industriais, como em sistemas SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) para monitoramento e controle de cadeias produtivas, além de desempenhar um papel central em Sistemas Ciberfísicos (CPS). Com os avanços da Indústria 4.0, operações interconectadas unem tecnologias digitais e físicas por meio de dispositivos, máquinas, aplicações e pessoas em larga escala, formando o paradigma conhecido como Internet das Coisas Industrial (IIoT) (Pal e Jadidi, 2021).

A Internet das Coisas Industrial (IIoT) representa uma evolução técnica que amplia significativamente o impacto econômico e produtivo no setor manufatureiro.

Suas funcionalidades englobam sensoriamento, atuação, interconexão e processamento de dados, permitindo a coleta, análise e tomada de decisões inteligentes com mínima intervenção humana (Alabadi et al., 2022). Essas capacidades destacam a IIoT como um segmento da IoT voltado para o setor industrial, frequentemente associado à Indústria 4.0, visando melhorar a acessibilidade, desempenho, escalabilidade e economia de tempo e custos nas operações industriais (Alabadi et al., 2022).

A IIoT foca em aprimorar a eficiência operacional e a qualidade dos produtos em tempo real, minimizando a intervenção humana e oferecendo uma automação superior aos sistemas industriais tradicionais (Pal e Jadidi, 2021). Contudo, alcançar tal automação requer alta confiabilidade, segurança e disponibilidade nos sistemas, especialmente em ambientes adversos (Pal e Jadidi, 2021). A privacidade industrial é outro aspecto crítico, protegendo informações sensíveis, como segredos comerciais e dados pessoais, de acessos não autorizados. Medidas robustas de segurança são essenciais para enfrentar os desafios da interconectividade e do crescente volume de dados gerados pelas máquinas, assegurando confiança e conformidade regulatória no setor (Demertzi et al., 2023).

Assim, o uso de redes IIoT sem fio para controle e monitoramento em tempo real é promissor, mas enfrenta desafios de segurança e dependabilidade, incluindo a necessidade de sistemas confiáveis, seguros e facilmente mantidos (Shi et al., 2019). Propostas recentes reforçam a importância de requisitos de segurança, como autenticação, autorização e controle de acesso, além de destacar interações lógicas e colaborações tecnológicas entre dispositivos. Esses elementos são importantes para garantir a robustez e a confiabilidade dos sistemas IIoT (Demertzi et al., 2023).

Para áreas amplas e longas distâncias, alguns desses protocolos LPWAN, como LoRa e Sigfox, que operam na faixa de frequência ISM, têm se mostrado superiores aos protocolos celulares, devido ao seu alcance e baixo consumo de energia (Islam et al., 2024). No entanto, tecnologias como NB-IoT e LTE-M, que utilizam espectro licenciado, oferecem maior qualidade de serviço, mas com maior consumo de energia (Islam et al., 2024). Entre os protocolos populares utilizados no IoT estão Z-Wave, NTN, LoRa, Sigfox, NB-IoT, LTE-M e o RedCap, baseado em 5G, cada um com características distintas em termos de alcance, consumo de energia e complexidade do dispositivo (Islam et al., 2024).

Atualmente, não existe uma arquitetura única e amplamente aceita para IIoT. Sua definição depende das necessidades do sistema e das escolhas do projetista. Observa-se que nenhum fornecedor único apresenta uma arquitetura ideal. Nesse contexto, o uso de padrões pode permitir que a arquitetura aproveite tecnologias e normas emergentes, além de possibilitar a integração de dispositivos IIoT mais avançados assim que disponíveis (Demertzi et al., 2023).

Padrões como WirelessHART e Foundation Fieldbus, por exemplo, promovem interoperabilidade. Caso um sensor de um fornecedor falhe, é possível substituí-lo por outro fornecedor desde que sigam o mesmo protocolo e tecnologia de rede. Isso evita a necessidade de substituir outros sensores ou níveis superiores da arquitetura IIoT,

destacando a importância de protocolos padronizados para esses sistemas. Além disso, novos padrões estão surgindo para atender às demandas de monitoramento industrial, como ZigBee, WirelessHART, ISA 100.11a e WIA-PA (Demertzi et al., 2023).

Padrões industriais como WirelessHART, ISA 100.11a e ZigBee são constituídos como pilhas de protocolos (*stacks*) completas, que utilizam as definições do padrão IEEE 802.15.4 para suas camadas física e de enlace. O LoRa, por sua vez, é caracterizado primariamente como uma tecnologia de modulação de camada física. Neste contexto, a comparação foca nas características distintas dessas tecnologias de base: o padrão IEEE 802.15.4 (empregado pela pilha ZigBee) e a modulação LoRa. O IEEE 802.15.4 é otimizado para distâncias curtas, em torno de 100 metros, oferecendo taxas de transmissão mais elevadas. Por outro lado, o LoRa é projetado para alcançar longas distâncias, de 2 a 5 quilômetros, em detrimento de uma taxa de dados menor (Melo, 2017).

O ZigBee é definido como uma tecnologia de rede sem fio de baixa potência, baixa taxa de dados e curto alcance, desenvolvida como um padrão global aberto para atender especificamente às necessidades de redes IoT de baixo custo (Paul e Singh, 2015). A tecnologia se distingue por características como auto-organização, custo reduzido e longa vida útil da bateria, sendo ideal para dispositivos que exigem autonomia estendida em diferentes arquiteturas de rede (Paul e Singh, 2015). Suas aplicações são vastas, abrangendo desde a automação residencial, para conexão de dispositivos inteligentes, até a automação industrial e o monitoramento médico domiciliar (Paul e Singh, 2015). Além disso, o protocolo é amplamente empregado em Redes de Sensores Sem Fio (WSN) para monitoramento de integridade estrutural em edifícios, demonstrando versatilidade em cenários críticos (Paul e Singh, 2015). O LoRa, por sua vez, se beneficia por fazer parte das redes de baixa potência de longo alcance (LPWANs) que estão surgindo como uma tecnologia promissora. Essa abordagem oferece conexões de longa distância para uma ampla variedade de dispositivos, sendo particularmente eficaz para o monitoramento extensivo em grandes fábricas (Hernandez et al., 2017).

Da mesma forma, as redes LPWAN estão sendo amplamente adotadas em setores como agricultura inteligente, cidades conectadas, rastreamento de inventário e automação residencial. Sua versatilidade e eficiência tornam-nas fundamentais para aplicações que exigem conectividade de longa distância e baixo consumo de energia (Nurelmadina et al., 2021). LoRa é uma das LPWANs mais representativas, utilizando a tecnologia de espectro espalhado em faixas sub-GHz livres de licença, como 868 MHz na Europa e 915 MHz na América do Norte (Dervianckine et al., 2023). Esses parâmetros, como o canal de frequência, o ciclo de trabalho máximo, a potência de transmissão e o mecanismo de acesso ao meio, variam de acordo com a região geográfica e devem ser considerados no design de componentes de *hardware* e na escolha dos protocolos de comunicação (Dervianckine et al., 2023).

Para resolver parte dessas limitações regionais, a Semtech introduziu rádios LoRa

que operam na faixa ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz, com especificações técnicas uniformes, proporcionando cobertura global. Essa abordagem traz três principais vantagens: robustez devido ao uso da modulação LoRa, a utilização de uma faixa de frequência comum e a eliminação das restrições de ciclo de trabalho (Dervianckine et al., 2023).

Esses novos rádios, como o SX1280, são projetados para operar precisamente na faixa ISM de 2,4 GHz (Semtech, 2019). Essa inovação não apenas marca um avanço, ao permitir que o LoRa opere em uma faixa de frequência globalmente reconhecida, mas também abre espaço para uma análise comparativa com o padrão IEEE 802.15.4, destacando as diferenças e semelhanças entre essas duas tecnologias, especialmente em termos de desempenho e aplicabilidade.

1.1 Motivação e Justificativas

Com o advento da Quarta Revolução Industrial, a convergência entre a tecnologia digital e o mundo físico tem sido acelerada pela proliferação da Internet das Coisas (IoT). A IoT, ao possibilitar a conectividade entre uma vasta gama de dispositivos, está transformando profundamente diversos setores da sociedade. No contexto industrial, a aplicação específica conhecida como Internet das Coisas Industrial (IIoT) se destaca como uma ferramenta para otimizar processos, aumentar a eficiência e impulsionar a inovação.

Entretanto, a implementação da IIoT enfrenta desafios, especialmente no que diz respeito à comunicação sem fio. A necessidade de garantir confiabilidade e comunicação em tempo real em ambientes adversos torna essencial a escolha de protocolos de comunicação adequados. Além disso, a crescente demanda por dispositivos eletrônicos portáteis e autônomos destaca a necessidade de soluções que sejam eficientes no consumo de energia. A eficiência energética tornou-se um fator vital no desenvolvimento de sistemas eletrônicos, influenciando diretamente a duração da bateria, a sustentabilidade e a viabilidade econômica desses dispositivos.

Este projeto tem como objetivo enfrentar esses desafios, com um foco especial na análise comparativa de protocolos. Serão destacadas o padrão IEEE 802.15.4 e a camada física LoRa, que operam na faixa industrial de frequência de 2,4 GHz. Ambas as tecnologias são LPWAN (redes de longa distância e baixo consumo) e utilizam a mesma faixa de frequência, que é reconhecida globalmente pela ISM. Portanto, esta dissertação busca avaliar as implicações da recente inovação da Semtech, que possibilita a operação do protocolo LoRa na faixa industrial de 2,4 GHz, discutindo seu posicionamento em relação ao padrão IEEE 802.15.4 e as vantagens e desafios que essa nova implementação pode apresentar, além de analisar a viabilidade de energias renováveis para esses protocolos.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa experimental entre o padrão IEEE 802.15.4 e a modulação LoRa operando na faixa de frequência de 2,4 GHz, avaliando métricas de desempenho e consumo energético em cenários aplicáveis à Internet das Coisas Industrial (IIoT). Para assegurar a equidade da comparação e minimizar variáveis externas, o trabalho utiliza o desenvolvimento de plataformas de *hardware* genéricas.

Nesse contexto, a análise é suportada pela criação de dois sistemas embarcados de baixo consumo, baseados em um microcontrolador comum e nos transceptores AT86RF233 (IEEE 802.15.4) e SX1280 (LoRa 2,4 GHz), permitindo uma avaliação justa das capacidades e limitações de cada tecnologia, além de investigar a viabilidade do uso de energias renováveis.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo aprofundado dos transceptores AT86RF233 e SX1280, compreendendo suas características e parâmetros de configuração na faixa de 2,4 GHz;
- Desenvolver *hardware* para dois sistemas embarcados genéricos e equivalentes, integrando um microcontrolador comum aos respectivos rádios, a fim de garantir um ambiente de teste controlado e imparcial;
- Implementar rotinas de comunicação sem fio e *firmware* de teste otimizados, assegurando o fluxo contínuo de pacotes necessário para a análise comparativa das métricas de desempenho;
- Analisar alternativas para a alimentação autônoma do sistema, validando a viabilidade técnica da utilização de fontes fotovoltaicas em nós sensores baseados nessas tecnologias;
- Realizar testes práticos em campo para coletar dados empíricos de alcance, taxa de entrega de pacotes (PDR) e consumo energético em diferentes cenários;
- Conduzir uma análise comparativa crítica dos resultados obtidos, discutindo as vantagens e desvantagens de cada protocolo para aplicações industriais.

1.3 Contribuições

As principais contribuições deste trabalho são:

- O estudo aprofundado e a validação prática da implementação do IEEE 802.15.4 e LoRa em microcontroladores, focando especificamente na faixa de frequência ISM de 2,4 GHz.
- A análise comparativa experimental do desempenho do IEEE 802.15.4 e LoRa (operando em 2,4 GHz) para aplicações de Internet das Coisas Industrial (IIoT), abordando métricas relevantes para ambientes industriais. Esta é uma contribuição central, dada a recente inovação da Semtech que permite a operação do LoRa em 2,4 GHz, posicionando como uma alternativa ao IEEE 802.15.4.
- O desenvolvimento e a descrição de plataformas experimentais genéricas e de baixo consumo de energia para a aquisição e transmissão de dados, utilizando um microcontrolador comum e transceptores específicos (AT86RF233 para IEEE 802.15.4 e SX1280 para LoRa 2.4 GHz). A metodologia de desenvolvimento e a descrição desses sistemas contribuem como um estudo de caso ou uma base para futuras pesquisas.
- A geração de dados empíricos a partir de testes práticos em campo. Esses dados fornecem *insights* sobre o comportamento e as limitações reais de cada tecnologia em cenários que podem se aproximar de ambientes industriais.
- A discussão e análise dos resultados obtidos, que contribuem para o entendimento acadêmico sobre as vantagens, desvantagens e o posicionamento do LoRa 2.4 GHz em comparação com o IEEE 802.15.4 para atender aos requisitos (como confiabilidade, tempo real e eficiência energética) de aplicações em IIoT.

Em essência, o trabalho contribui com a implementação dos padrões IEEE 802.15.4 e LoRa em 2,4GHz, e uma análise comparativa experimental para avaliar o desempenho dessas tecnologias sem fio em um contexto industrial.

1.4 Organização do Trabalho

O **Capítulo 1** contextualiza a pesquisa no âmbito da Quarta Revolução Industrial e da Internet das Coisas Industrial (IIoT), apresentando a motivação, os objetivos gerais e específicos, bem como as principais contribuições acadêmicas e técnicas deste estudo.

O **Capítulo 2** oferece uma revisão bibliográfica sobre os padrões IEEE 802.15.4 e LoRa. Esta seção detalha as funcionalidades e o funcionamento interno dos transceptores SX1280 e AT86RF233, além de analisar trabalhos correlatos que estabelecem o estado da arte para comunicações sem fio em cenários industriais.

O **Capítulo 3** descreve a metodologia empregada no desenvolvimento do trabalho. Inicialmente, são detalhados os procedimentos de projeto e implementação dos *hardwares*, incluindo a validação dos circuitos de RF e o casamento de impedância via Analisador de Redes Vetorial (VNA). Na sequência, discute-se o desenvolvimento do *firmware*, a arquitetura de comunicação com o microcontrolador STM32L4 e o protocolo experimental adotado para os testes práticos de campo.

No **Capítulo 4**, são apresentados os dados obtidos experimentalmente, abrangendo métricas de consumo energético, *Packet Delivery Rate* (PDR), intensidade de sinal (RSSI) e taxa de transferência. Adicionalmente, valida-se a viabilidade do uso de células fotovoltaicas como fonte de energia renovável para a alimentação autônoma dos módulos.

O **Capítulo 5** promove uma análise dos resultados, comparando o desempenho das tecnologias sob diferentes potências e tamanhos de quadros, correlacionando-as com as demandas de robustez e eficiência da Indústria 4.0.

Finalmente, o **Capítulo 6** sintetiza as principais conclusões do trabalho, verificando o cumprimento dos objetivos propostos e sugerindo perspectivas para pesquisas futuras voltadas a comunicações de baixo consumo e integração energética em ambientes IIoT.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Referenciais Teóricos

2.1.1 IEEE 802.15.4

2.1.1.1 Introdução

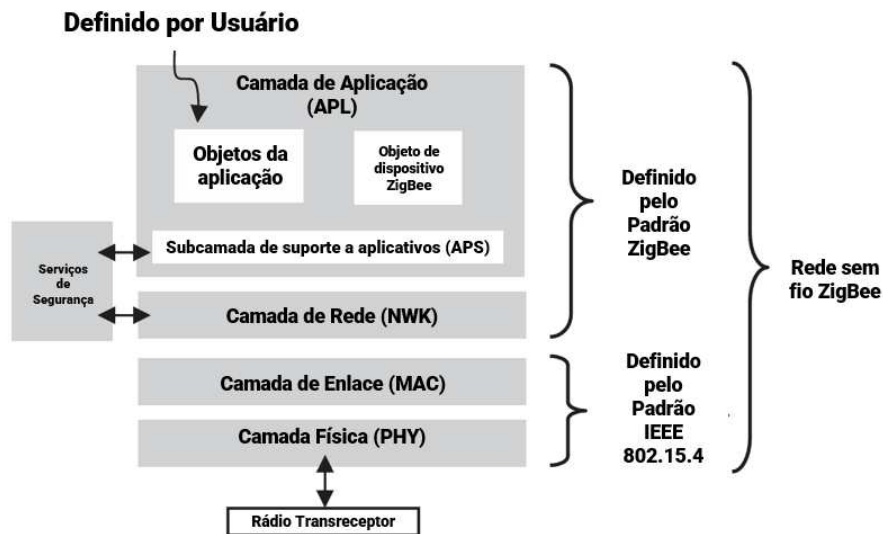
O ZigBee é um protocolo que estabelece padrões de comunicação para conexões de curto alcance e baixa taxa de transmissão de dados. Dispositivos que utilizam o protocolo ZigBee operam em três faixas de frequência: 868 MHz, 915 MHz e 2,4 GHz. O ZigBee suporta uma taxa máxima de transmissão de 250 Kbits/s. Foi projetado especificamente para aplicações de baixo consumo de energia e baixa transmissão de dados, atendendo a requisitos que demandam baixo consumo de bateria e alta expectativa de vida útil da bateria (Farahani, 2008).

O padrão do protocolo ZigBee foi definido pela *ZigBee Alliance*, uma organização composta por centenas de membros de diversas áreas da indústria, incluindo desenvolvedores de *software*, profissionais da indústria de semicondutores, desenvolvedores de equipamentos e instaladores. O ZigBee adotou como padrão o IEEE 802.15.4 para suas camadas *Physical Layer* (PHY) e *Medium Access Control* (MAC) (Farahani, 2008).

A arquitetura ZigBee é construída por blocos de camadas, sendo que cada camada desempenha um papel específico. As camadas físicas e de enlace são definidas pelo padrão IEEE 802.15.4, enquanto as camadas de Rede (NWK) e Aplicação (APL) são definidas pela ZigBee Alliance. A camada de aplicação é composta pela subcamada de suporte à aplicação (APS) e pelos objetos de dispositivos ZigBee (ZDO) (ZigBee Alliance, 2017).

A Fig. 2.1 apresenta a arquitetura ZigBee, dividida em blocos de camadas. As camadas de aplicação e de rede são definidas pelo padrão ZigBee, enquanto as camadas físicas e de enlace são especificadas pelo padrão IEEE 802.15.4.

Figura 2.1: Arquitetura ZigBee.



Fonte: Adaptado de (Farahani, 2008).

Este padrão foi desenvolvido pelo comitê de padronização IEEE 802 e lançado em 2003. É importante destacar que este padrão foi criado de forma independente do padrão ZigBee, permitindo a criação de aplicações sem fio baseadas apenas no padrão IEEE 802.15.4, sem a necessidade de seguir as diretrizes de aplicação e rede do ZigBee (Farahani, 2008).

2.1.1.2 Tipos de Dispositivos e Frequências

O padrão IEEE 802.15.4 especifica a operação de redes sem fio de baixa taxa (LR-WPANs) em três bandas de frequência principais, as quais são adotadas pela camada física do protocolo ZigBee:

- 868-868,6 MHz (Banda 868 MHz)
- 902-928 MHz (Banda 915 MHz)
- 2400-2483,5 MHz (Banda 2,4 GHz)

As bandas ISM são definidas pela *ITU Radio Regulations*. Entre as frequências utilizadas, a faixa de 2,4 GHz destaca-se por ser reconhecida mundialmente como uma frequência industrial global (International Telecommunication Union (ITU), 2018). A faixa 915 MHz também é utilizada em âmbito industrial, porém com foco na América do Norte. A faixa de frequência 2,4 GHz é amplamente utilizada por

diversos dispositivos sem fio, como Wi-Fi e Bluetooth, o que facilita a interoperabilidade e a coexistência de múltiplas tecnologias em ambientes industriais.

As Tabelas 2.1 e 2.2 apresentam algumas características do ZigBee de acordo com a faixa de frequência. Na faixa de 2,4 GHz, além de contar com uma banda de operação globalmente aceita, essa frequência oferece a maior velocidade na transmissão de quadros e o maior número de canais disponíveis dentre as frequências disponíveis.

Tabela 2.1: Tabela de Frequências e Características (Parte 1).

Faixa de Frequência (MHz)	Canais	Modulação	Taxa de Chip (Kchip/s)
868–868.6	1	BPSK	300
902–928	10	BPSK	600
868–868.6	1	ASK	400
902–928	10	ASK	1600
868–868.6	1	O-QPSK	400
902–928	10	O-QPSK	1000
2400–2483.5	16	O-QPSK	2000

Tabela 2.2: Tabela de Frequências e Características (Parte 2).

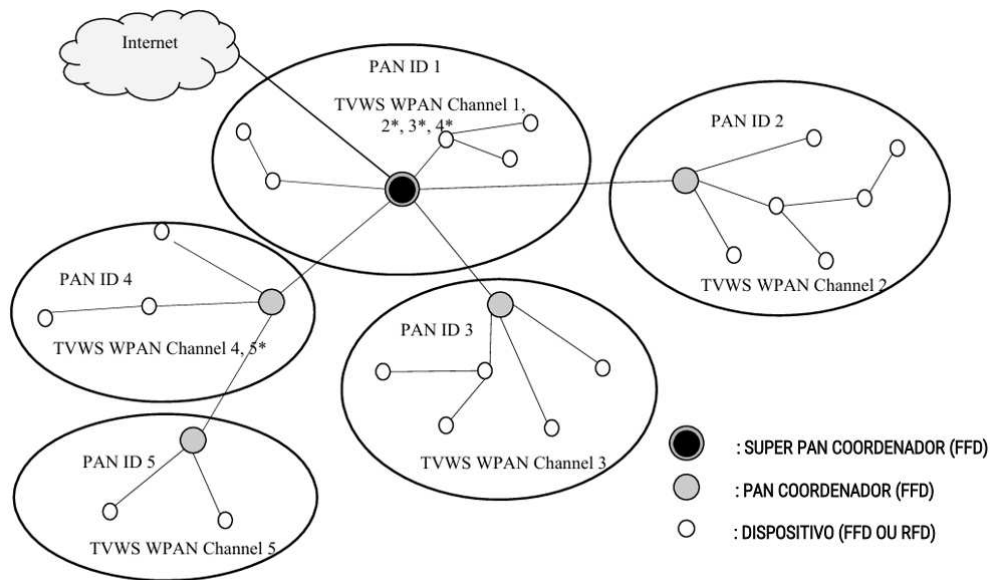
Taxa de Bits (Kb/s)	Taxa de Símbolos (Ksymbol/s)	Método de Espalhamento
20	20	DSSS Binária
40	40	DSSS Binária
250	12.5	PSSS de 20 bits
250	50	PSSS de 5 bits
100	25	16-array ortogonal
250	62.5	16-array ortogonal

O ZigBee define dois tipos de dispositivos que podem integrar uma rede sem fio no padrão IEEE 802.15.4: o dispositivo *full-function* (FFD) e o dispositivo *reduced-function* (RFD). O FFD possui todas as funcionalidades necessárias e pode operar em três papéis diferentes: coordenador, coordenador PAN e dispositivo comum. Já o RFD, com funcionalidades limitadas, é projetado para aplicações extremamente simples, pois utiliza menos memória e recursos (SA, 2020).

No entanto, um RFD não pode atuar como coordenador ou coordenador PAN e só pode se comunicar com um dispositivo FFD, sendo incapaz de se comunicar com outro RFD. Um dispositivo FFD pode assumir o papel de coordenador, responsável pela retransmissão de mensagens. Quando um FFD também gerencia a área pessoal da rede, ele é denominado coordenador PAN (Farahani, 2008). O *PAN Identifier* (PAN ID) é um identificador exclusivo necessário para a comunicação entre dispositivos. Para que a comunicação ocorra, os dispositivos devem compartilhar o mesmo PAN ID. O coordenador PAN tem a função de selecionar um PAN ID único, que não é utilizado por nenhuma outra rede dentro do alcance do rádio, com isso garante que o PAN ID escolhido já não esteja sendo utilizado por outro dispositivo.

Na Figura 2.2, é apresentado um exemplo da arquitetura *cluster tree*, uma das variações da topologia ponto a ponto. A figura ilustra a disposição dos dispositivos RFD e FFD, bem como a funcionalidade dos PAN IDs.

Figura 2.2: Exemplo de arquitetura de comunicação ZigBee.

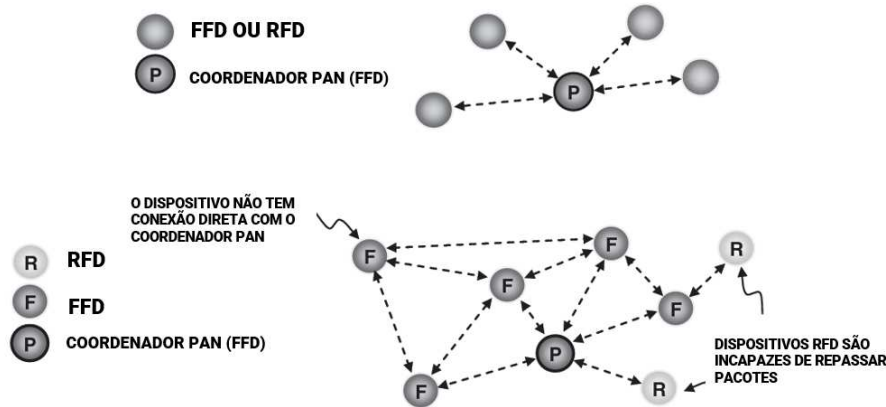


Fonte: Adaptado de (SA, 2020).

A topologia da rede é definida na camada de rede (NWK). O protocolo IEEE 802.15.4 especifica que a topologia de rede deve ser em estrela ou ponto a ponto. Na topologia em estrela, todos os dispositivos na rede conseguem se comunicar apenas com o coordenador PAN (Farahani, 2008). Já na topologia ponto a ponto, cada dispositivo consegue se comunicar diretamente com qualquer outro dispositivo, desde que sejam dispositivos FFD e estejam no alcance de transmissão um do outro (SA, 2020), como apresentado na Figura 2.3.

A comunicação ponto a ponto pode assumir diferentes formas, dependendo das restrições de comunicação da topologia. Se uma topologia ponto a ponto não possuir nenhuma restrição, ela é reconhecida como uma topologia *mesh* (Farahani, 2008). Uma das variações da topologia ponto a ponto é a topologia *cluster tree*, na qual o dispositivo FFD é considerado o tronco e os galhos de uma árvore, enquanto os dispositivos RFD são considerados as folhas da árvore (SA, 2020). Algumas das características da topologia ponto a ponto é o recurso de *multihopping*. Nesse contexto, a mensagem pode “saltar” entre nós conectados. Na topologia *cluster tree*, por exemplo, a mensagem é capaz de transitar de uma folha para outra, mesmo que estejam em galhos diferentes, aproveitando a conexão entre os dispositivos intermediários para alcançar seu destino final.

Figura 2.3: Topologias estrela e mesh respectivamente.



Fonte: Adaptado de (Farahani, 2008).

2.1.1.3 Camada MAC

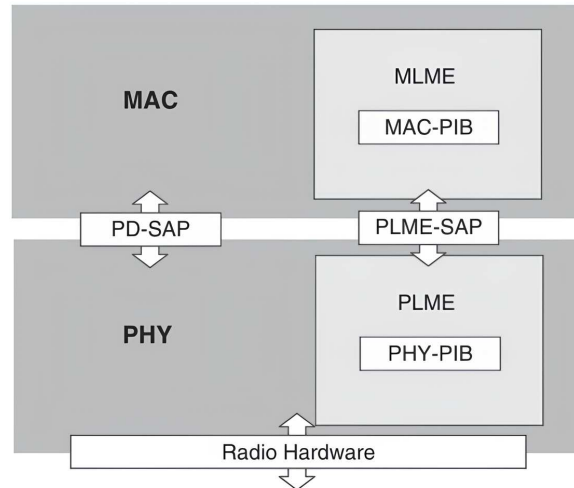
A camada de enlace (MAC) é responsável por interfacear entre a camada superior, a camada física (PHY), como demonstrado na Figura 2.1. Esta camada possui uma entidade de gerenciamento chamada *MAC Layer Management Entity* (MLME). Além do gerenciamento, essa camada também é responsável por manter um banco de dados de objetos gerenciados pertencentes à subcamada MAC, esses dois serviços fornecem o interfaceamento entre as camadas MAC e PHY (SA, 2020).

O algoritmo *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA-CA) é utilizado antes da transmissão de dados ou comandos MAC durante o *Contention Access Period* (CAP), que é o período entre dois *beacons*, quando os dispositivos podem acessar aleatoriamente o meio (SA, 2020). Há dois tipos de CSMA-CA *slotted* e *unslotted*, o tipo *slotted* é performado quando há uma estrutura de *super-frame* e o *unslotted* quando não há este tipo de estrutura. No CSMA-CA, sempre que um dado é transmitido, é realizada uma avaliação de canal livre (*Clear Channel Assessment* - CCA) para garantir que o canal não está sendo utilizado por outro dispositivo. A decisão de declarar como livre ou não, é baseada na leitura da energia espectral na frequência de canal de interesse.

Quando um dispositivo planeja transmitir um sinal, ele primeiro muda para o modo de recepção para estimar o nível de energia no canal desejado. Esse procedimento é caracterizado como *energy detection* (ED). Nesse modo, o receptor não interpreta os dados; nesta detecção de energia o nível de energia é apenas lido e não é interpretado se o sinal é de um dispositivo IEEE 802.15.4 (Farahani, 2008). Outro método para obter se o canal está sendo utilizado é o *carrier sense*, ao contrário do ED ele determina se o sinal é de um dispositivo IEEE 802.15.4.

A camada MAC também é responsável por gerar *beacons*. Os *beacons* são men-

Figura 2.4: Comunicação entre as camadas MAC e PHY.



Fonte: (Farahani, 2008).

sagens utilizadas em um formato específico para sincronizar os *clocks* dos nós na rede. Além disso, se o coordenador precisar transmitir dados para um dispositivo em particular, ele pode indicar, por meio da mensagem do *beacon*, que há uma mensagem de dados pendente para aquele dispositivo, após isso o dispositivo manda um pedido de mensagem para o coordenador que indica a disponibilidade para receber o dado (Farahani, 2008).

Existem dois métodos para acessar o canal: com contenção e sem contenção. No método com contenção, utiliza-se o CSMA-CA para todos os dispositivos que desejam transmitir na mesma frequência de canal. O primeiro dispositivo a encontrar um canal livre inicia a transmissão. No método sem contenção, o coordenador PAN controla o espaço de tempo para os dispositivos, o que é chamado de *guaranteed time slot* (GTS). Para prover um GTS, o coordenador PAN envia *beacons* para os dispositivos, sincronizando seus *clocks*. Esse método é conhecido como *beacon-enabled* PAN. Já uma rede na qual o coordenador PAN não utiliza *beacons* é chamada de *nonbeacon network*.

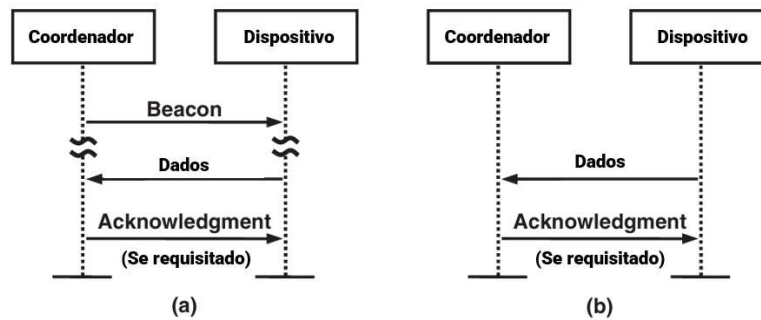
Para o modelo de transferência de dados no IEEE 802.15.4, temos três tipos:

- Transferência de dados para um coordenador de um dispositivo.
- Transferência de dados de um coordenador para um dispositivo.
- Transferência entre dois pontos de um dispositivo.

Todos os métodos podem ser realizados em uma topologia ponto a ponto e apenas o primeiro método pode ser utilizado em uma topologia estrela.

Na Figura 2.5, são apresentados dois tipos de transferência de dados. No primeiro, com *beacon* habilitado, o dispositivo sincroniza o *clock* em intervalos regulares e transmite os dados para o coordenador utilizando o método CSMA-CA. No segundo, com *beacon* desabilitado, o dispositivo transmite os dados assim que o canal estiver disponível (Farahani, 2008).

Figura 2.5: Transferência de dados para um coordenador no IEEE 802.15.4: (a) Beacon Habilitado e (b) Beacon Desabilitado.



Fonte: Adaptado de (Farahani, 2008).

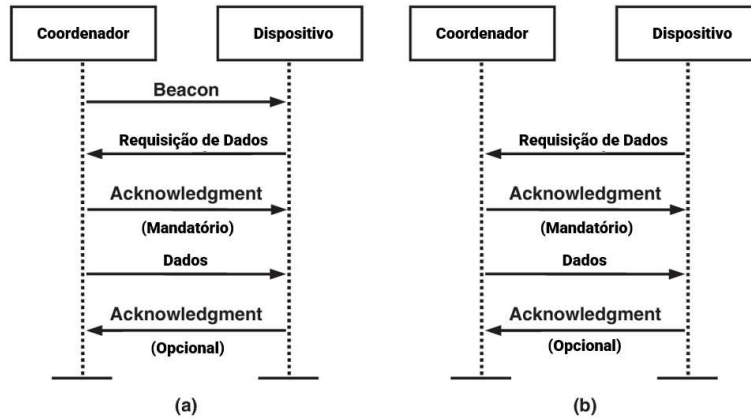
Na Figura 2.6, são apresentados dois tipos de transferência de dados. No primeiro, em uma rede habilitada para *beacon*, o coordenador indica que há uma mensagem de dados pendente para um dispositivo específico, e este envia uma solicitação de dados, recebendo-os do coordenador. Em uma rede não habilitada para *beacon*, o coordenador espera a solicitação de dados do dispositivo e envia uma mensagem de reconhecimento caso não haja dados pendentes, ou uma mensagem de *payload* zero (Farahani, 2008).

O IEEE 802.15.4 implementa mecanismos para verificação de integridade de quadros, utilizando um campo de 16 bits denominado *Frame Check Sequence* (FCS). Este campo é calculado através do algoritmo *Cyclic Redundancy Check* (CRC-16), baseado no padrão da *International Telecommunication Union* (ITU), para detectar erros de transmissão. O conceito do CRC opera da seguinte forma: no dispositivo transmissor, os bits do cabeçalho (*MAC Header* - MHR) e do *payload* são tratados como coeficientes de um polinômio. Este polinômio é dividido por um polinômio gerador padrão, conhecido por ambas as partes. O resto desta divisão constitui o FCS, que é anexado ao final do quadro no Rodapé do MAC (MFR). O receptor realiza a mesma operação matemática ao receber os dados; se o resto calculado localmente não coincidir com o FCS recebido, o quadro é considerado corrompido e descartado (Farahani, 2008).

Possíveis cenários de transmissão incluem os seguintes:

- **Transmissão de dados bem-sucedida:** A camada MAC transmite o quadro de dados ao destinatário por meio do serviço de dados (PHY). A camada MAC

Figura 2.6: Transferência de dados de um coordenador para um dispositivo: (a) Beacon Habilitado e (b) Beacon desabilitado.



Fonte: Adaptado de (Farahani, 2008).

do destinatário recebe o quadro de dados, envia um reconhecimento (ACK) de volta ao originador e encaminha o quadro para a camada superior. O subnível MAC do originador, ao receber o reconhecimento dentro do tempo esperado, considera a transferência de dados concluída com sucesso e emite uma confirmação para a camada superior (SA, 2020).

- **Perda na transmissão de dados:** O subnível MAC do originador transmite o quadro de dados ao destinatário via serviço de dados PHY. Caso o subnível MAC do destinatário não receba o quadro, ele não enviará um reconhecimento. Se o reconhecimento não for recebido dentro do tempo estipulado, a transferência de dados será considerada falha (SA, 2020).
 - *Para transmissões diretas:* O originador retransmite o quadro, podendo repetir essa tentativa até o limite estabelecido por `macMaxFrameRetries`. Se todas as tentativas falharem ($1 + \text{macMaxFrameRetries}$ vezes), o subnível MAC emitirá uma confirmação de falha para a camada superior (SA, 2020).
 - *Para transmissões indiretas:* O quadro de dados permanecerá na fila de transações até que um novo pedido de dados seja recebido e reconhecido corretamente, ou até que o tempo de `macTransactionPersistenceTime` seja atingido. Se esse tempo expirar, a transação será descartada, e o subnível MAC enviará uma confirmação de falha para a camada superior (SA, 2020).
- **Perda no quadro de reconhecimento (ACK):** O subnível MAC do originador transmite o quadro de dados ao destinatário por meio do serviço de dados PHY. O subnível MAC do destinatário recebe o quadro, envia um reconheci-

mento (ACK) ao originador e encaminha o quadro para a camada superior. No entanto, se o subnível MAC do originador não receber o quadro de reconhecimento dentro do tempo esperado, a transferência de dados será considerada falha (SA, 2020).

- *Para transmissões diretas:* O originador retransmite o quadro de dados, podendo repetir essa tentativa até o máximo definido por `macMaxFrameRetries`. Se todas as tentativas falharem ($1 + \text{macMaxFrameRetries}$ vezes), o subnível MAC emitirá uma confirmação de falha para a camada superior (SA, 2020).
- *Para transmissões indiretas:* O quadro de dados permanecerá na fila de transações até que outro pedido de dados seja recebido e reconhecido corretamente, ou até que o tempo de `macTransactionPersistenceTime` seja atingido. Se esse tempo expirar, a transação será descartada (SA, 2020).

Todo dispositivo possui um endereço único. O IEEE 802.15.4 define dois métodos de endereçamento: 16-bit *short addressing* e 64-bit *extended addressing*. A rede pode escolher qual dos dois métodos utilizar. O uso do endereçamento curto (*short addressing*) ajuda a reduzir o comprimento das mensagens. A vantagem do *extended addressing* é a possibilidade quase ilimitada de endereçamento de dispositivos, devido ao seu alto número de bits. A combinação de um PAN ID único com o endereçamento permite a comunicação independente entre redes (Farahani, 2008).

Na Tabela 2.4, são apresentados alguns parâmetros discutidos ao longo da seção e como eles se encaixam no quadro da camada MAC de forma simplificada, apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Quadro da camada MAC (simplificado).

Quadro para Transmissão na Camada MAC		
Cabeçalho MAC (MHR)	PAYLOAD MAC	Rodapé MAC (MFR)

Tabela 2.4: Quadro da camada MAC.

Octetos: 1/2	0/1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	Variável	Variável		Variável	2/4
FC	Número de sequência	PAN ID (Destino)	Endereço (Destino)	PAN ID (Origem)	Endereço (Origem)	ASH	IE		Quadro de payload	FCS
		Campo de Endereço MHR					Cabeçalho IES	Payload IES	Payload do MAC	MFR

2.1.1.4 Camada PHY

A camada física (PHY), assim como a camada MAC, é definida pelo protocolo IEEE 802.15.4. Ela especifica as funções do protocolo e as interações com a camada MAC, além dos requisitos mínimos de hardware para o rádio, como sensibilidade

do receptor e potência do transmissor. A camada PHY também é responsável por controlar diretamente e se comunicar com o rádio transceptor, ativando o rádio quando houver a necessidade de transmitir ou receber quadros. Além disso, a camada PHY seleciona a frequência dos canais e garante que o canal não seja utilizado por outras redes (Farahani, 2008).

A frequência de canais são definidas por uma combinação de números de canais.

Tabela 2.5: Descrição de canais.

Número de canais	Descrição
0	Banda 868 MHz (BPSK)
1–10	Banda 915 MHz (BPSK)
11–26	Banda 2.4 GHz (O-QPSK)
0	Banda 868 MHz (ASK)
1–10	Banda 915 MHz (ASK)
11–26	Reserved
0	Banda 868 MHz (O-QPSK)
1–10	Banda 915 MHz (O-QPSK)
3–31	Reserved

As Equações 2.1 e 2.2 definem a frequência central do canal de acordo com o número do canal escolhido. Na banda de frequência de 868 MHz, a frequência central é de 868,3 MHz (Farahani, 2008).

$$f_{\text{central}} (\text{MHz}) = 906 + 2 \cdot (\text{Número do Canal} - 1) \quad (2.1)$$

$$f_{\text{central}} (\text{MHz}) = 2405 + 5 \cdot (\text{Número do Canal} - 11) \quad (2.2)$$

A *energy detection* (ED) é uma funcionalidade contida na camada PHY, projetada para uso na camada de rede (NWK) como parte de um algoritmo de seleção de canal. Ela estima o sinal recebido dentro da largura de banda de um canal. O resultado da ED deve ser reportado para a camada superior usando MLME *MAC Layer Management Entity*. O valor mínimo de ED, zero, indica uma potência menor que 10 dB acima do menor valor especificado pela sensibilidade do receptor em dBm, ED's medidas abaixo desse valor não são detectadas (SA, 2020).

A Equação 2.3, demonstra o cálculo de medição do ED em dBm da seguinte forma:

$$\text{macED} = \text{ED medido [dBm]} - (\text{sensibilidade mín. do receptor [dBm]} + 10) \quad (2.3)$$

O *received signal strength* (RSSI) é uma relação sinal-ruído usada para analisar a qualidade da potência de um sinal. Trata-se de uma medição da potência em dBm para cada quadro recebido. O RSSI é representado como um inteiro de 8 bits. Os valores mínimos e máximos são, respectivamente, 0 (−174 dBm) e 254 (80 dBm), sendo que 255 é reservado. Caso algum valor medido seja inferior a −174 dBm, o valor reportado deve ser arredondado para −174 dBm (SA, 2020). O RSSI e o tempo de chegada do quadro estão disponíveis na camada MAC, NWK e APL para qualquer tipo de análise.

O *signal-to-noise ratio* (SNR) é utilizado na análise da qualidade do sinal. Ele avalia a relação entre a potência do sinal desejado e a energia do ruído dentro da banda de frequência. Um SNR mais alto indica uma menor probabilidade de erro nos quadros transmitidos (Farahani, 2008). Os valores extremos de SNR (0x00 e 0xFF) correspondem, respectivamente, à pior e à melhor qualidade de sinal detectável pelos receptores. Os valores intermediários de SNR devem ser distribuídos de forma uniforme entre esses dois limites (SA, 2020).

O *link quality indicator* (LQI), assim como o SNR e o RSSI, analisa a qualidade do sinal recebido, indicando a qualidade dos quadros de dados recebidos pelo receptor. A leitura do LQI é realizada para cada quadro recebido. Quanto maior o LQI, melhor a chance de entrega da mensagem ao destino (Farahani, 2008). Os valores mínimos e máximos de LQI (0x00 e 0xff) devem ser associados, respectivamente, à qualidade mais baixa e mais alta dos sinais detectáveis pelos receptores (SA, 2020).

O *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA) exige que a camada MAC solicite à camada PHY a realização de uma avaliação de canal livre (CCA), garantindo que o canal não esteja sendo utilizado por outro dispositivo (Farahani, 2008).

Com exceção do PHY HRP UWB, um PHY compatível deve ser capaz de realizar o CCA (Clear Channel Assessment) de acordo com pelo menos um dos seguintes métodos:

- **Modo CCA 1: Energia acima do limiar.** O CCA deve indicar um canal ocupado ao detectar qualquer energia acima do limiar de ED (SA, 2020).
- **Modo CCA 2: Detecção de portadora.** O CCA deve indicar um canal ocupado somente ao detectar um sinal compatível com este padrão, utilizando as mesmas características de modulação e espalhamento do PHY atualmente em uso pelo dispositivo (SA, 2020).
- **Modo CCA 3: Detecção de portadora com energia acima do limiar.** O CCA deve relatar um canal ocupado utilizando uma combinação lógica de:
 - Detecção de um sinal com as características de modulação e espalhamento definidas por este padrão; (SA, 2020)

- Energia acima do limiar de ED, onde o operador lógico pode ser AND ou OR (SA, 2020).
- **Modo CCA 4: ALOHA.** O CCA deve sempre indicar um canal livre (SA, 2020).

O Modo CCA 4 é geralmente utilizado em aplicações de baixo ciclo de trabalho (SA, 2020).

A constante *aMaxPHYPacketSize* da camada PHY especifica que a Unidade de Dados do Serviço da Camada PHY (PSDU) não pode exceder 127 octetos. O conteúdo do payload PHY é denominado Unidade de Dados do Serviço PHY (PSDU), conforme demonstrado na Tabela 2.7.

A camada PHY oferece dois tipos de serviços principais:

- **Serviço de Dados PHY:** possibilita a transmissão e recepção da Unidade de Dados do Protocolo da Camada PHY (PPDU) através de um canal de rádio.
- **Serviço de Gerenciamento PHY:** fornece suporte ao gerenciamento das operações relacionadas à camada PHY.

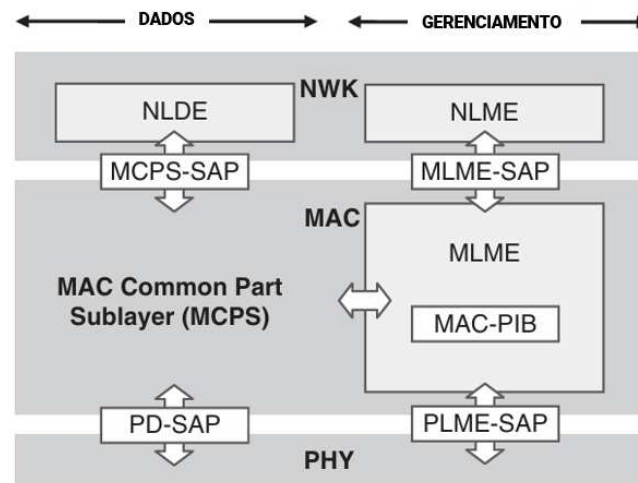
Os dados que precisam ser transmitidos são sempre fornecidos como uma Unidade de Dados do Protocolo MAC (MPDU). O MAC local é responsável por gerar a solicitação de transmissão e fornecer a MPDU à camada PHY. Em seguida, a camada PHY tenta realizar a transmissão e retorna ao MAC o resultado da tentativa, indicando se foi bem-sucedida ou malsucedida.

Na Figura 2.4 e 2.7, é ilustrado como a Entidade de Gerenciamento da Camada Física (*PLME-SAP*) é utilizada para transportar comandos entre a Entidade de Gerenciamento da Camada MAC (*MLME*) e a *PLME*. Este mecanismo coordena as operações de transmissão de dados e gerenciamento entre as camadas PHY e MAC (Farahani, 2008).

Entre os serviços fornecidos pela interface PLME-SAP, destacam-se funcionalidades que possibilitam o gerenciamento eficiente do meio físico. Alguns desses serviços incluem:

- **Avaliação de canal livre (*Clear Channel Assessment, CCA*):** Determina se o canal está disponível para transmissão, garantindo que o meio não esteja ocupado.
- **Deteção de energia (*Energy Detection, ED*):** Mede o nível de energia no canal para auxiliar em operações como seleção de canal ou ajuste de parâmetros.

Figura 2.7: Exemplo de comunicação entre camadas.



Fonte: Adaptado de (Farahani, 2008).

- **Ativação e desativação do transceptor de rádio:** Controla o estado operacional do transceptor, economizando energia quando a transmissão ou recepção não é necessária.

Na Tabela 2.6, o quadro da camada PHY é apresentado de forma simplificada, demonstrando sua estrutura básica, enquanto a Tabela 2.7 expande os detalhes, revelando os campos adicionais necessários para a operação completa do quadro PHY.

Tabela 2.6: Estrutura simplificada do quadro da camada PHY.

Estrutura do Quadro para Transmissão na Camada PHY		
Cabeçalho de Sincronização (SHR)	Cabeçalho PHY (PHR)	Payload do PHY

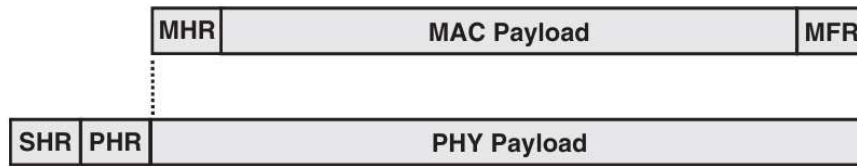
Tabela 2.7: Estrutura detalhada do quadro da camada PHY.

Bits: 32/64	4	11	8	0/6	Variável	0/6	Variável	0/3
	Dado tipo FEC	Comprimento do Dado	CRC	Cauda do PHR FEC	PSDU	Payload da Cauda FEC	PAD	
SHR	Cabeçalho PHY (PHR)				Payload do PHY			Cauda

Na Figura 2.8, é ilustrado como o MAC Payload (Tabelas 2.3 e 2.4) é encapsulado no PHY Payload, detalhando o processo de organização e formatação dos campos necessários para a transmissão no nível físico.

Após a organização dos dados no formato do quadro PHY, o quadro é então modulado conforme os parâmetros configurados no transceptor, utilizando a técnica de modulação específica do dispositivo (por exemplo, O-QPSK ou FSK), ilustrado

Figura 2.8: Interação entre o quadro da camada MAC e o quadro da camada PHY.



Fonte: Adaptado de (Farahani, 2008).

na Tabela 2.1. Finalmente, o quadro modulado é transmitido pelo canal de rádio, iniciando o processo de propagação até o receptor e no processo de recepção o quadro é recebido e demodulado para seguir o caminho contrário.

2.1.2 LoRa

2.1.2.1 Introdução

LoRa¹ (abreviação de *Long Range*) é uma tecnologia de modulação sem fio que utiliza uma técnica de modulação de espectro espalhado derivada da tecnologia *chirp spread spectrum* (CSS). Desenvolvida pela Semtech, essa tecnologia faz parte da família LoRa e é ideal para aplicações que exigem longo alcance e baixo consumo de energia, operando com baixa taxa de dados, sendo comumente utilizada para Internet das Coisas (IoT) (LoRa Alliance, 2020).

O LoRaWAN é um padrão de interoperabilidade gerenciado pela LoRa Alliance, uma aliança de tecnologia sem fins lucrativos da qual a Semtech é membro fundador e patrocinador do conselho. Vale ressaltar que, em muitos casos de uso de IoT, é possível optar por utilizar apenas a camada física LoRa (LoRa PHY) com uma implementação de rede proprietária na camada superior, em vez do protocolo LoRaWAN completo (Semtech Corporation, 2025).

Um exemplo de arquitetura que utiliza LoRa, como demonstrado na Figura 2.9, é constituído por várias camadas. A camada mais inferior é a camada física (PHY), que inclui a parte física do transceptor, abrangendo modems e quadros.

Além do LoRa, os rádios transceptores da Semtech oferecem mais tipos de modulação e demodulação. No caso do rádio SX1280, existem três modems disponíveis da família LoRa: o LoRa, o FLRC e o FSK. Esses três modems incorporam funcionalidades avançadas na camada MAC e oferecem suporte aos seguintes quadros:

1. Modem e quadro LoRa;

¹LoRa e LoRaWAN são marcas registradas. O símbolo ® será omitido no decorrer do texto para facilitar a leitura.

2. Modem e quadro FLRC;
3. Modem e quadro FSK.

Na camada superior, são definidos os parâmetros regionais do LoRaWAN para diferentes regiões regulatórias ao redor do mundo. Essa camada descreve principalmente aspectos relacionados à banda de frequência e aos canais de comunicação de acordo com o que cada região determina (LoRa Alliance®, 2022).

Acima dos protocolos regionais é estabelecido o LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) que define uma camada de protocolo de comunicação que opera sobre a modulação LoRa, estabelecendo diretrizes essenciais para a interoperabilidade de dispositivos em redes de longa alcance e baixo consumo energético (LoRa Alliance, 2020). Esta camada especifica parâmetros operacionais críticos e mecanismos de controle de acesso ao meio, organizados em três componentes principais:

Em dispositivos Classe B, o protocolo emprega quadros de beacon transmitidos periodicamente (tipicamente a cada 128 segundos) pelos *gateways*. Estes sinais servem para:

- Sincronização temporal precisa (resolução de 1 μ s)(LoRa Alliance, 2020)
- Distribuição de informações de rede (LoRa Alliance, 2020)
- Alocação de janelas temporais para comunicação *downlink* (LoRa Alliance, 2020)

A subcamada MAC (*Medium Access Control*) gerencia:

- Procedimentos de associação/disassociação de dispositivos
- Mecanismos de adaptação de taxa de dados (ADR - *Adaptive Data Rate*) (LoRa Alliance, 2020)
- Controle de duplicação de quadros (LoRa Alliance, 2020)
- Esquema de segurança de ponta-a-ponta (AES-128) (LoRa Alliance, 2020)

Os quadros MAC seguem uma formatação padronizada composta por:

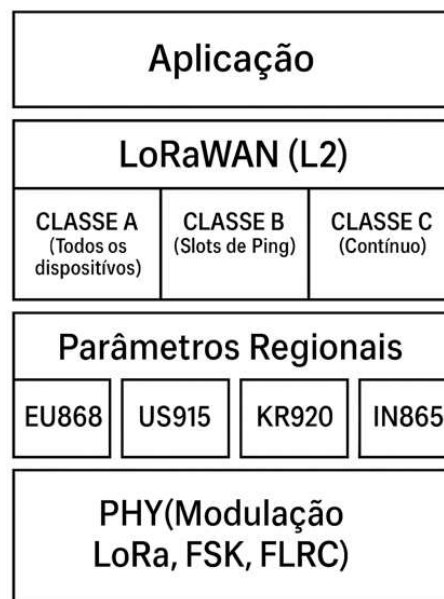
- **MHDR** (*Mac Header*): 1 byte contendo tipo de mensagem e versão
- **MAC Payload**: Campo variável contendo:
 - Identificadores de rede (DevAddr)
 - Comandos de controle

– Dados da aplicação

- **MIC (*Message Integrity Code*)**: 4 bytes para autenticação

A especificação ainda define três classes operacionais de dispositivos (A, B, C) que determinam os modos de escuta do rádio, permitindo otimizar o balanço entre latência e consumo energético conforme os requisitos da aplicação (LoRa Alliance, 2020).

Figura 2.9: Exemplo de arquitetura LoRa.



Fonte: Adaptado de (LoRa Alliance, 2020).

2.1.2.2 Camada PHY

Como certas informações sobre a camada PHY são confidenciais e pertencentes apenas a Semtech, as informações discutidas ao longo do texto são informações confirmadas pela Semtech. Os modems LoRa, FSK e FLRC são implementados na banda base digital do circuito. No modo de recepção, todos utilizam o mecanismo de *Automatic Frequency Correction* (AFC) para ajustar a frequência automaticamente (Semtech, 2020). Devido à relevância do tema este trabalho terá o foco no funcionamento do modem e quadro LoRa.

O modem LoRa emprega modulação por espectro espalhado combinada com técnicas de Correção de Erros Adiantada (FEC - *Forward Error Correction*), superando modulações tradicionais como FSK e OOK em alcance e robustez. Essas características permitem enlaces de comunicação confiáveis mesmo em ambientes hostis,

com imunidade a interferências de até 19,5 dB em cenários de co-canal (Semtech, 2020). Além da robustez, a tecnologia destaca-se pela sensibilidade do receptor, que pode atingir -132 dBm no transceptor SX1280 (SF12) (Semtech, 2020). Este valor representa um ganho significativo no orçamento de enlace (*link budget*) quando comparado a dispositivos ZigBee típicos, cuja sensibilidade gira em torno de -101 dBm, e supera inclusive tecnologias celulares de baixo consumo como o LTE-M, viabilizando conexões em distâncias maiores ou em locais de difícil penetração de sinal. Os principais fatores que viabilizam essa coexistência em bandas congestionadas são:

- **Espalhamento Espectral:** A modulação LoRa® utiliza espalhamento espectral com ganho de codificação, permitindo comunicação abaixo do piso de ruído térmico em condições ideais (SNR negativo). Em ambientes interferidos, essa técnica possibilita a decodificação de sinais fracos mesmo na presença de interferências co-canal até 19,5 dB mais potentes (Semtech, 2020).
- **Eficiência Espectral:**
 - **Redução de interferência adjacente:** A estreita largura de banda (ex: 125 kHz vs. 20 MHz do Wi-Fi) minimiza a sobreposição com canais vizinhos. (Semtech, 2017)
 - **Resiliência a interferências co-canal:** A concentração de potência em faixa reduzida limita a exposição a interferências distribuídas em bandas largas, como as do Wi-Fi (Semtech, 2017).
- **Mecanismos de Robustez:**
 - **FEC e Entrelaçamento:** A FEC adiciona redundância para correção de até 6% de erros, enquanto o entrelaçamento distribui bits correlacionados, mitigando falhas em rajadas (Semtech, 2017).
 - **Tolerância a perda parcial de símbolos:** A demodulação mantém a integridade de decodificação mesmo que até 50% da duração temporal de um símbolo seja corrompida, o que é essencial para ambientes com interferência impulsiva (até 100 dB acima do sinal útil) (Semtech, 2017).

A modulação do LoRa baseia-se no espectro espalhado por *chirp* (*chirp spread spectrum*). Como em outros sistemas de espectro espalhado, cada símbolo de informação do *payload* é representado por múltiplos *chips* de informação. O Fator de Espalhamento (*Spreading Factor*, SF) define a relação entre a taxa de símbolos (R_s) e a taxa de *chips* (R_c), conforme a equação:

$$R_c = R_s \cdot 2^{SF} \quad (2.4)$$

A camada física do LoRa (*LoRa PHY*) utiliza a modulação por espalhamento espectral por *chirp* (*CSS*) para alcançar transmissões de longo alcance. A unidade

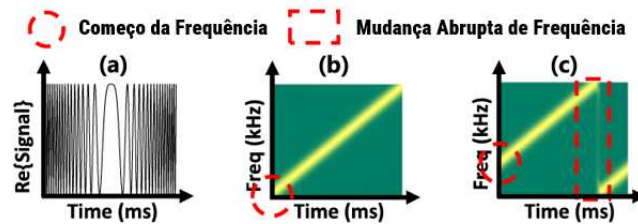
básica de comunicação no *LoRa PHY* é o símbolo *chirp*. Conforme ilustrado na Figura 2.10(b), esse símbolo *chirp* sem deslocamento é denominado ***chirp base***. Quando a frequência aumenta ao longo do tempo, chamamos de ***up-chirp***, e quando diminui, de ***down-chirp*** (Xu et al., 2023).

A inovação da modulação LoRa reside na codificação de dados através do deslocamento cíclico da frequência inicial do sinal. A Figura 2.10(c) ilustra este processo, apresentando um símbolo LoRa fragmentado em dois segmentos de *chirp* devido a esse deslocamento. O parâmetro central que define a capacidade desse símbolo é o **Fator de Espalhamento (SF)** (Xu et al., 2023). O SF determina diretamente a eficiência espectral: cada símbolo modulado transporta exatamente SF bits de informação. Para viabilizar essa transmissão, a duração temporal de cada símbolo é composta por uma sequência de 2^{SF} *chips*, relação esta demonstrada na Equação 2.5 (Abdallah et al., 2024). Portanto, a configuração da camada física (PHY) de um dispositivo LoRa depende do ajuste das variáveis de Largura de Banda (BW), Fator de Espalhamento (SF), Taxa de Codificação (CR), Potência de Transmissão (TP) e Frequência da Portadora (CF). No caso específico do transceptor SX1280, o *spreading factor* pode ser configurado na faixa de SF5 a SF12.

$$SF = \frac{Chiprate}{SymbolRate} \quad (2.5)$$

Na Figura 2.10, demonstra o símbolo base na camada física (PHY) do LoRa, há uma rampa que aumenta com o tempo. O começo da frequência do símbolo representa a informação decodificada. Um símbolo LoRa possui dois segmentos uma rampa e um queda abrupta de frequência (Xu et al., 2023).

Figura 2.10: Representação da modulação CSS do LoRa.



Fonte: Adaptado de (Xu et al., 2023).

Tanto o Fator de Espalhamento (*Spreading Factor*, SF) quanto a Largura de Banda (*Bandwidth*, BW) precisam ser previamente configurados e conhecidos por ambos os lados do enlace — transmissor e receptor. BW refere-se à largura de banda do sinal. Um aumento no fator de espalhamento prolonga a duração do símbolo, aumentando a resistência a ruídos e interferências. No entanto, esse efeito pode ser

compensado pela maior probabilidade de erros de símbolo em fatores de espalhamento maiores, destacando a importância da sincronização entre receptor e sinal, especialmente para pequenos bits de dados (Abdallah et al., 2024). Vale destacar que diferentes fatores de espalhamento são ortogonais entre si, o que contribui para a eficiência do sistema (Semtech, 2020).

As tabelas a seguir, Tabela 2.8 e Tabela 2.9 foram retiradas do *datasheet* do transceptor SX1280 e apresentam respectivamente as sensibilidades do receptor e a taxa de dados de acordo com as configurações utilizadas no modem LoRa, considerando as seguintes condições:

- Taxa de Erro de Quadros (*Packet Error Rate*, PER) de 1%;
- Quadro com 10 bytes de *payload*;
- Temperatura de 25°C, tensão de 3.3V e Razão de Correção de Erro (*Code Rate*, CR) = 4/5.

Tabela 2.8: Largura de Banda X Sensibilidade do Receptor.

Largura de Banda	Sensibilidade do Receptor (dBm)							
	SF5	SF6	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
203	-109	-111	-115	-118	-121	-124	-127	-130
406	-107	-110	-113	-116	-119	-122	-125	-128
812	-105	-108	-112	-115	-117	-120	-123	-126
1625	-99	-103	-106	-109	-111	-114	-117	-120

Fonte: Adaptado de (Semtech, 2020).

Tabela 2.9: Largura de Banda X Taxa de Dados.

Largura de Banda	Taxa de Dados Brutos (kb/s)							
	SF5	SF6	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
203	31,72	19,03	11,1	6,34	3,57	1,98	1,09	0,595
406	63,44	38,06	22,2	12,69	7,14	3,96	2,18	1,19
812	126,88	76,13	44,41	25,38	14,27	7,93	4,36	2,38
1625	253,91	152,34	88,87	50,78	28,56	15,87	8,73	4,76

Fonte: Adaptado de (Semtech, 2020).

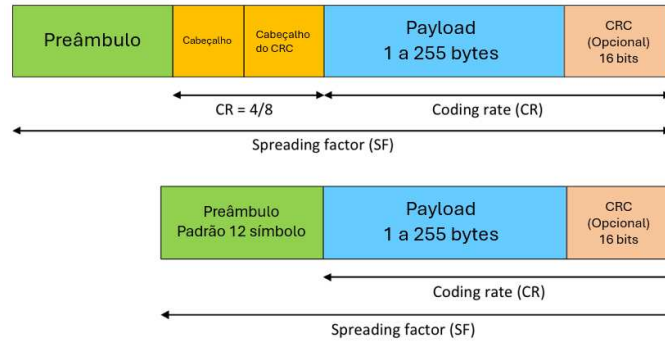
Em um sistema LoRa, a configuração da largura de banda define a banda de modulação bilateral, que é equivalente à taxa de *chips*. Um aumento na largura de banda do sinal equivale a uma maior taxa de dados efetiva. Isso significa que o período do símbolo é dado por:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.6)$$

O modem LoRa emprega dois tipos de formato de quadro: **explícito** e **ímplicito**, como demonstrado na Figura 2.11. O quadro LoRa começa com uma sequência de preâmbulo, que é usada para sincronizar o receptor com o sinal de entrada. Por padrão, o quadro é configurado com uma sequência de preâmbulo de 12 símbolos. Esse comprimento do preâmbulo é programável e pode ser estendido; por exemplo, para reduzir o ciclo de trabalho do receptor em aplicações que exigem recepção intensiva. O comprimento programável do preâmbulo pode variar de 8 a 61440 símbolos. O modem LoRa adiciona automaticamente 4,25 símbolos, fazendo com que o comprimento real do preâmbulo varie de 12,25 a 61444,25 símbolos. Isso permite a transmissão de sequências de preâmbulo quase arbitrariamente longas (Semtech, 2020).

Em troca de sensibilidade e alcance superiores, um SF aplicado mais alto resulta em uma taxa de dados mais baixa, maior tempo de propagação e maior consumo de energia. Um número maior fornece mais segurança ao custo de tempos de transmissão mais longos, enquanto o CR, que representa a taxa do código FEC (*Forward Error Correction*), pode ser definido como 4/5, 4/6, 4/7 ou 4/8 (Abdallah et al., 2024).

Figura 2.11: Formato de quadro explícito e ímplicito.



Fonte: Adaptado de (Semtech, 2020).

O receptor realiza um processo de detecção de preâmbulo que é reiniciado periodicamente, com um limite de tempo baseado no comprimento do preâmbulo programado. Por essa razão, o comprimento do preâmbulo deve ser configurado de forma idêntica ao do transmissor. Quando o comprimento do preâmbulo não é conhecido ou pode variar, o comprimento máximo do preâmbulo deve ser programado no lado do receptor.

Um cabeçalho opcional pode ser incluído no quadro LoRa. Os modos de cabeçalho **explícito** (comprimento variável) e **ímplicito** (comprimento fixo) indicam, respectivamente, a inclusão ou exclusão de um cabeçalho no quadro.

O Fator de Espalhamento (*Spreading Factor*, SF) e a Largura de Banda (*Bandwidth*, BW) devem ser conhecidos antecipadamente tanto no lado do transmissor quanto no do receptor, pois diferentes fatores de espalhamento são ortogonais entre si. O período do símbolo é um parâmetro importante no cálculo do tempo no ar (*time-on-air*). O equilíbrio entre sensibilidade e tempo no ar do sinal é definido pela configuração do Fator de Espalhamento e da largura de banda da modulação LoRa. Definimos uma taxa de dados bruta, R_b , para o modem LoRa (que não leva em consideração a sobrecarga da correção de erros) equivalente a:

$$R_b = \frac{SF}{T_s} \quad [\text{bits/s}] \quad (2.7)$$

O modem LoRa utiliza codificação cíclica de erro para realizar detecção e correção de erros antecipada. Embora a Correção de Erros Antecipada (*Forward Error Correction*, FEC) não melhore a sensibilidade do modem na presença de interferências em rajadas, ela é eficiente para aumentar a confiabilidade do link na presença de interferências intermitentes. A taxa de codificação pode ser alterada em resposta às condições do canal e, opcionalmente, ser incluída no cabeçalho do quadro para uso pelo receptor. O aumento da sobrecarga no tempo no ar é proporcional à capacidade de correção de erros da FEC. A taxa de bits efetiva resultante, incluindo a influência da FEC, é dada por:

$$R_{\text{eff}} = R_b \cdot \left(\frac{4}{4 + CR} \right) \quad (2.8)$$

Onde CR é a taxa de codificação programada. As configurações permitidas para o modem LoRa fornecem taxas de dados na faixa de **71 kb/s a 202 kb/s**, com uma largura de banda de **1625 kHz**, até **476 bps** para uma largura de banda de **200 kHz**.

O uso da técnica de modulação por espectro expandido apresenta um desafio na determinação de se o canal já está em uso por um sinal que pode estar abaixo do piso de ruído do receptor. Nessas condições, a utilização do RSSI torna-se inviável. Para contornar essa limitação, é empregado o detector de atividade de canal (CAD), responsável por identificar a presença de outros sinais LoRa.

Nos rádios SX1280/81, o modo de detecção de atividade de canal foi projetado para detectar tanto o preâmbulo LoRa quanto símbolos de dados, enquanto as gerações anteriores desses dispositivos eram capazes de identificar apenas o preâmbulo. Quando operando no modo CAD, o rádio realiza uma varredura na banda por um período definido pelo usuário (expresso em número de símbolos LoRa) e, caso sejam detectados símbolos LoRa durante essa análise, um IRQ de Detecção de Atividade de Canal é acionado.

A sensibilidade do CAD na identificação de símbolos LoRa pode ser ajustada modificando-se o limiar de pico em relação ao ruído do detector, denominado *cad-DetPeak*. O tempo necessário para a detecção de atividade de canal depende das

configurações da modulação LoRa utilizadas. Para uma configuração específica de fator de espalhamento (SF) e largura de banda (BW), a janela típica de detecção CAD pode ser ajustada para 1, 2, 4, 8 ou 16 símbolos. Após a duração do número selecionado de símbolos, o rádio permanece em modo de recepção (Rx) por aproximadamente meio símbolo para processar a medição. O tempo exato de detecção CAD é dado por:

$$\text{Duração CAD (s)} = \left(\text{cadSymbolNum} + \frac{2SF + 3}{32} \right) \times T_s \quad (2.9)$$

2.2 Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta o estado da arte e os trabalhos correlatos que fundamentaram as escolhas de projeto, métricas e cenários de teste desta dissertação. A discussão está organizada de forma a conectar as metodologias encontradas na literatura com as abordagens práticas adotadas neste trabalho.

2.2.1 Metodologia de Revisão Bibliográfica

Para garantir a relevância e a atualidade das referências, foi adotada uma metodologia de pesquisa estruturada. A busca foi realizada nas bases de dados IEEE Xplore, MDPI e Google Scholar, restringindo-se ao período de 2017 a 2024. As palavras-chave (strings de busca) utilizadas combinaram termos como “Industrial IoT”, “ZigBee”, “LoRa 2.4GHz”, “Performance Analysis” e “Wireless Sensor Networks”.

Inicialmente, foram identificados cerca de 50 artigos potenciais. Para a seleção final, foram aplicados os seguintes critérios de inclusão e exclusão:

- **Critérios de Inclusão:** Trabalhos que apresentassem dados empíricos ou experimentais; estudos comparativos entre tecnologias LPWAN; e artigos focados em cenários industriais ou de alta interferência.
- **Critérios de Exclusão:** Artigos puramente teóricos sem validação prática; estudos anteriores a 2017 (salvo normas fundamentais); e trabalhos que não abordassem as bandas de frequência ou protocolos de interesse.

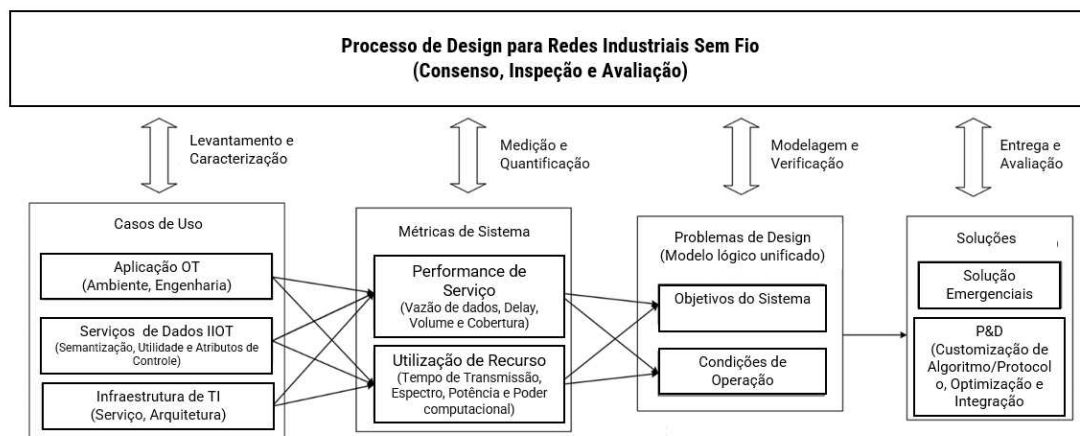
Após a filtragem, foram selecionados os trabalhos detalhados a seguir, categorizados por: Contextualização de Casos de Uso, Protocolos e Métricas de Desempenho.

2.2.2 Análise da Literatura e Contribuições para o Projeto

Contextualização e Casos de Uso em IIoT

A definição de um cenário de teste realista é crucial para a validação de tecnologias industriais. Nesse sentido, Liu et al. (2019) propõem um *framework* de referência para o design de redes IIoT, identificando aplicações críticas como controle de processos em tempo real e logística. O trabalho destaca a importância de modelar fatores de impacto como distância, volume de dados e condições ambientais. Contribuição para este trabalho: A metodologia de Liu et al. (2019) fundamentou a escolha das variáveis independentes (distância e tamanho do payload) utilizadas nos testes de campo descritos no Capítulo 3, garantindo que os cenários avaliados refletissem demandas industriais reais. A Figura 2.12 ilustra esse processo de formulação.

Figura 2.12: Processo de design para formulação de casos de uso na IIoT.



Fonte: Adaptado de (Liu et al., 2019).

Ainda no contexto de protocolos, Leonardi et al. (2023) abordam as limitações do LoRaWAN clássico para aplicações de tempo real, propondo o protocolo MRT-LoRa para mitigar restrições de ciclo de trabalho (*duty cycle*). Embora este trabalho foque na camada MAC, a discussão levantada pelos autores sobre a necessidade de taxas de bits mais altas em ambientes industriais justifica a escolha do transceptor SX1280 (LoRa 2.4 GHz) nesta dissertação, uma vez que esta tecnologia oferece maior vazão de dados e elimina as restrições de *duty cycle* das bandas sub-GHz.

Comparação de Tecnologias e Eficiência Energética

A eficiência energética é um pilar das redes LPWAN. O estudo de Hernandez et al. (2017) realizou uma análise detalhada do consumo de energia e cobertura de

diferentes esquemas LPWAN. Os autores estabelecem *trade-offs* claros entre alcance e vida útil da bateria. **Aplicação no projeto:** As métricas de consumo de corrente apresentadas por Hernandez et al. serviram como base comparativa para validar os dados obtidos na Seção 3.5, confirmando a consistência das leituras realizadas com o *Power Profiler Kit*.

Complementarmente, Ali e Zorlu Partal (2022) desenvolveram uma rede híbrida utilizando ZigBee e LoRa para edifícios inteligentes. O estudo concluiu que as tecnologias são complementares: ZigBee para redes locais de alta densidade e LoRa para *backbone* de longa distância. **Relevância:** Este trabalho corrobora a premissa desta dissertação de que não existe uma solução única, reforçando a necessidade de uma análise comparativa direta (lado a lado) para determinar qual tecnologia se adequa melhor a cada nicho da planta industrial.

Métricas de Desempenho e Confiabilidade

Para a execução dos testes práticos, foi necessário estabelecer quais parâmetros físicos seriam monitorados. O trabalho de Simka e Polak (2022) foca no uso do LoRa na banda de 2,4 GHz para localização *indoor*, demonstrando a correlação entre RSSI e distância. **Contribuição:** A metodologia de coleta de RSSI proposta por Simka e Polak foi adaptada para os testes de campo deste trabalho, utilizando a intensidade do sinal como um indicador primário da qualidade do enlace antes da análise de perda de pacotes.

A confiabilidade em cenários adversos foi investigada por Abdallah et al. (2024), que testaram LoRa em condições de não-visada (NLoS) com interferência. Já Kolesnikov et al. (2022) realizaram testes de alcance em um campus universitário com mobilidade. **Impacto na metodologia:** Ambos os estudos destacam a degradação do sinal em ambientes urbanos/industriais. Baseado nisso, optou-se por realizar os testes preliminares em visada direta (LoS) para estabelecer uma linha de base (o "melhor caso"), permitindo que as discrepâncias observadas nos resultados (Capítulo 4) fossem atribuídas às características intrínsecas da modulação e não apenas a obstáculos externos.

Por fim, Magrin et al. (2021) discutem as configurações ótimas (SF, BW, CR) para LoRaWAN em cenários industriais. **Aplicação:** As recomendações de Magrin sobre a relação entre Fator de Espalhamento (SF) e robustez influenciaram a decisão de fixar o SF5 nos testes deste trabalho, visando priorizar a taxa de dados para competir com o ZigBee, uma escolha crítica discutida na análise dos resultados.

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia adotada para o desenvolvimento deste projeto. Serão descritas a análise das tecnologias empregadas, as etapas de concepção, desenvolvimento e implementação do *hardware* e do *firmware*, bem como sua aplicação prática e os procedimentos adotados para a realização dos testes finais.

Para atingir os objetivos propostos, o desenvolvimento do projeto foi dividido em cinco etapas principais:

- I. **Estudo de Tecnologias:** Investigação e seleção das tecnologias mais adequadas para o projeto.
- II. **Desenvolvimento do *Hardware*:** Criação e implementação da parte física do sistema.
- III. **Desenvolvimento do *Firmware*:** Desenvolvimento do *software* embarcado e implementação nos *hardwares* genéricos.
- IV. **Testes em Campo:** Implementação prática do projeto em um cenário real.
- V. **Consumo:** Teste de consumo e aplicação de placas fotovoltaicas.

3.1 Tecnologias

Esta seção fundamenta a escolha dos transceptores de rádio utilizados no desenvolvimento do *hardware*. Para a tecnologia LoRa operando na banda ISM de 2,4 GHz, a fabricante Semtech oferece um portfólio restrito de componentes: o SX1280, o SX1281 e os mais recentes LR1121 e LR2021.

Dentre esses transceptores, o LR2021 não foi considerado como uma opção, uma vez que ainda não foi oficialmente lançado pela Semtech no desenvolvimento do projeto. De toda forma, ele oferece suporte a diversas modulações, incluindo LoRa na

faixa de 2,4 GHz. O SX1281 também não foi incluído na Tabela 3.1, pois é uma variação do transreceptor SX1280, possuindo parâmetros idênticos, como funcionalidades, bandas de frequência e velocidade de transferência de dados. Assim, a Tabela 3.1 se restringe à comparação entre o SX1280 e o LR1121.

Tabela 3.1: Principais Informações dos Transceptores (Semtech, 2019; Corporation, 2025).

Característica	SX1280	LR1121
Família	LoRa/FLRC	LoRa Edge
Frequência (MHz)	2400-2500	150-960 1525-1660 L-band 1900-2100 S-band 2400-2500
Modulação	LoRa, FLRC, GFSK	FSK, LoRa, LR-FHSS
Potência de Saída (dBm)	Até +12.5	Até +22
Sensibilidade LoRa (dBm)	-132 (SF12)	-137 (SF12)
Taxa de Dados Máx.	200 kbps (LoRa)	101.5 kbps (LoRa 2.4Ghz)
Consumo TX (mA)	28 @ +12.5 dBm	130 @ +22 dBm
Consumo RX (mA)	4.6	7.1
Consumo Sleep (µA)	0.6 (Warm Start)	0.8 (Warm Start)
Largura de Banda	200-1600	62.5-500 125-500 203-812
Interface	SPI	SPI
Encapsulamento	QFN-32	QFN-32
Status	Disponível	Disponível

A justificativa da escolha apresentada na Tab. 3.1 recai sobre dois fatores principais: consumo de energia e taxa de dados. Esses parâmetros foram analisados em comparação com o padrão IEEE 802.15.4, cuja taxa de transmissão pode atingir 250 kbit/s. Assim, a escolha pela taxa de dados que mais se assemelha a esse padrão recaiu sobre o transceptor SX1280. Além disso, por se tratar de uma aplicação voltada para LPWAN, o consumo de energia é um fator determinante: o LR1121 apresenta um consumo significativamente maior, apesar de oferecer suporte a mais bandas de frequência.

Já para o padrão IEEE 802.15.4, a comparação entre os principais transceptores disponíveis no mercado se concentra na análise de parâmetros primordiais como consumo e taxa de dados. Dentre os transceptores considerados, destacam-se o AT86RF233, o AT86RF215, o CC2520 e o DWM1000. O AT86RF233 é uma solução de baixo consumo e voltada exclusivamente para a operação na faixa de 2,4 GHz, oferecendo taxa de dados máxima de 250 kbps, alinhada ao padrão ZigBee, a Tab. 3.2 demonstra os transreceptores escolhidos para a comparação.

Tabela 3.2: Principais Transceptores IEEE 802.15.4 para ZigBee na faixa de 2,4 GHz (Microchip Technology Inc., 2023b,a; Texas Instruments, 2011, 2006).

Característica	AT86RF233	AT86RF215	CC2520	CC2420
Frequência (MHz)	2400-2483.5	2400-2483.5	2400-2483.5	2400-2483.5
Modulação	O-QPSK (DSSS)	O-QPSK (DSSS), FSK, OFDM	O-QPSK (DSSS)	O-QPSK (DSSS)
Potência de Saída (dBm)	+4	+14	+5	+3
Sensibilidade (dBm)	~-101	~-103 (O-QPSK)	~-98	~-95
Taxa de Dados Máx.	250 kbps	500 kbps (FSK) / 2 Mbps (OFDM)	250 kbps	250 kbps
Consumo TX (mA)	14 @ +4 dBm	45 @ +14 dBm	25 @ +5 dBm	17.4 @ +3 dBm
Consumo RX (mA)	12.5	15	18	19.7
Consumo Sleep (µA)	0.02	0.05	1	1
Interface	SPI	SPI	SPI	SPI
Encapsulado	QFN-32	QFN-40	QFN-28	QFN-48
Fabricante	Microchip	Microchip	Texas Instruments	Texas Instruments

O AT86RF215 opera tanto em bandas sub-GHz quanto em 2,4 GHz, além de suportar múltiplas modulações, incluindo FSK e OFDM, que possibilitam taxas de dados superiores, chegando até 2 Mbps, embora com maior consumo de energia.

O CC2520 mantém-se como uma solução viável da Texas Instruments, focada em aplicações ZigBee e com desempenho intermediário em termos de consumo e sensibilidade, sendo amplamente utilizado em projetos que demandam interoperabilidade consolidada.

Já o DWM1000, embora não seja um transceptor ZigBee clássico, merece destaque por implementar o PHY UWB definido na IEEE 802.15.4-2011, possibilitando comunicações de altíssima taxa de dados (até 6.8 Mbps) e com precisão de localização, embora com consumo relativamente elevado e operação em bandas distintas das tradicionais ISM de 2,4 GHz.

Diante disso, a escolha pelo AT86RF233 recaiu principalmente em função do seu baixo consumo energético, aspecto fundamental para o projeto em questão,

que prioriza a eficiência energética e a operação prolongada em ambiente de baixa potência e sua taxa de dados similar ao SX1280.

Diante da escolha do transceptor AT86RF233 para o padrão IEEE 802.15.4 e do transceptor SX1280, observa-se uma diferença na camada física. Conforme indicado na Tabela 3.2, o AT86RF233 opera com uma potência máxima de apenas 4 dBm, enquanto, de acordo com a Tabela 3.1, o transceptor LoRa possui uma potência de até 12 dBm. Em razão dessa diferença, no *hardware* final do IEEE 802.15.4 foi necessária a adição de um amplificador de potência (PA) e um amplificador de baixo ruído (LNA) externo, o SKY66112-11, para otimizar o desempenho do sistema e poder alcançar a potência do transreceptor SX1280.

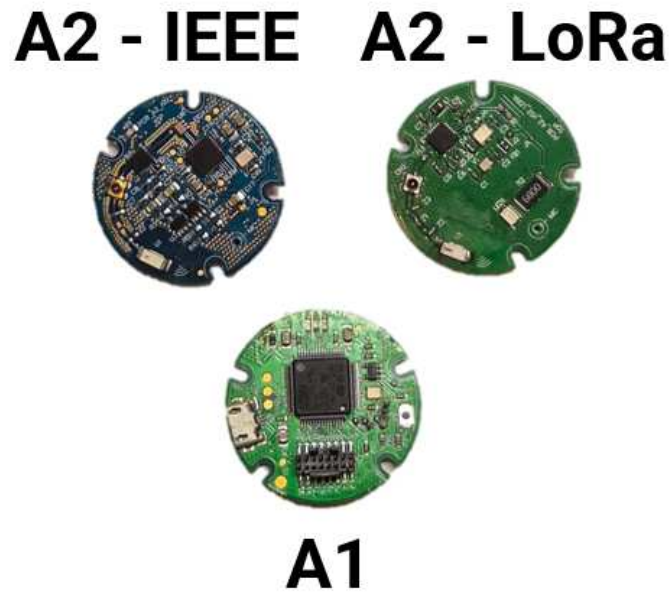
3.2 Hardware

Nesta seção, apresenta-se o *hardware* do projeto, com ênfase nas placas de circuito impresso (PCBs) desenvolvidas para os testes experimentais. Serão detalhadas as principais características, funcionalidades e as motivações para as escolhas de projeto. Adotou-se a seguinte nomenclatura para organização: a placa denominada A1 contém o microcontrolador STM32L4, enquanto as placas de rádio são denominadas A2. Vale ressaltar que todas as PCBs possuem dimensões de 34×34 mm e formato circular, projetadas no *software* Altium Designer. O formato redondo foi adotado para garantir compatibilidade com uma carcaça impressa em 3D projetada para acomodar baterias do tipo C, desenvolvida no âmbito de um projeto em parceria com a Petrobras. Essa escolha de *design* permite a integração compacta entre a PCB, a bateria e o invólucro, facilitando a montagem e a portabilidade do dispositivo.

A PCB A1 não será abordada profundamente nesta seção, visto que sua função principal é atuar como *host*, realizando a interface com a camada física (PHY) dos transceptores via comunicação SPI. O foco recairá sobre as PCBs A2, que abrigam os rádios AT86RF233 e SX1280, uma vez que suas características de *hardware* influenciam diretamente as métricas de desempenho obtidas nos testes.

A Figura 3.1 ilustra o conjunto de placas utilizadas. Na parte inferior da imagem, encontra-se a PCB A1, equipada com o microcontrolador STM32L496, responsável pelo processamento central e pelo gerenciamento dos periféricos. No topo (na cor verde), situa-se a PCB A2 LoRa, que integra o transceptor SX1280, oferecendo suporte à comunicação de longo alcance na frequência de 2,4 GHz. Por fim, a placa intermediária (destacada na cor azul) é a A2 IEEE. Esta incorpora o transceptor AT86RF233, compatível com o protocolo IEEE 802.15.4, e inclui um circuito externo com amplificador de potência (PA) e amplificador de baixo ruído (LNA), componentes essenciais para a otimização do alcance e da qualidade do sinal, conforme discutido anteriormente.

Figura 3.1: PCB A1, A2 LoRa e A2 IEEE.

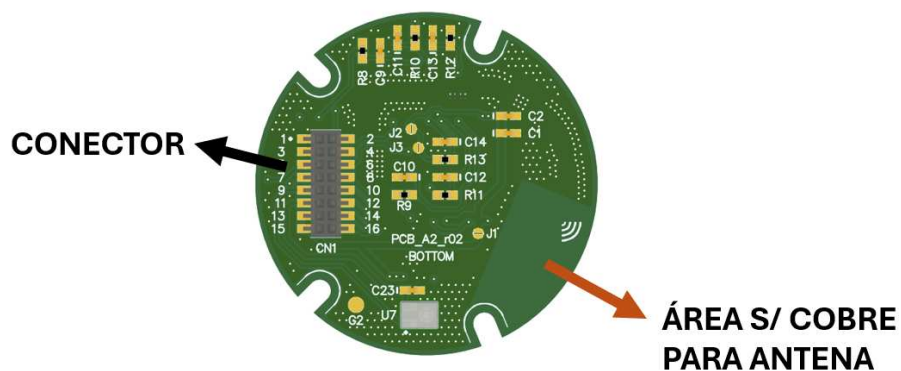


Fonte: Autor.

Como as PCBs A2 são as PCBs que possuem os transreceptores e os testes serão focados nelas, estas PCBs terão um foco aprofundado. A Figura 3.2 apresenta a camada top da PCB em 3D, correspondente à primeira camada do circuito impresso. Essa camada abriga os principais componentes de radiofrequência do sistema, destacando-se o rádio transceptor AT86RF233, responsável pela comunicação, e o PA/LNA externo SKY66112-11, que atua como amplificador de potência e baixo ruído, contribuindo para o aumento do alcance e sensibilidade do sinal.

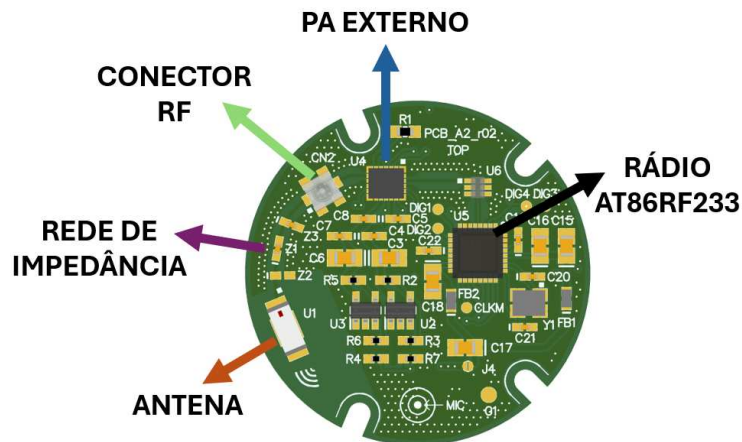
Por sua vez, a Figura 3.3 exibe a camada *bottom* em 3D, que corresponde à última camada da PCB.

Figura 3.3: Vista 3D da camada inferior (BOTTOM) da PCB A2 IEEE.



Fonte: Autor.

Figura 3.2: Vista 3D da camada superior (TOP) da PCB A2 IEEE.

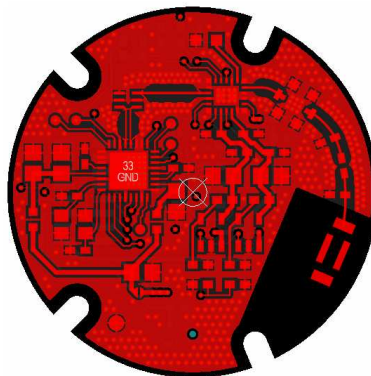


Fonte: Autor.

Nas Figuras 3.4 a 3.7, são apresentadas as quatro camadas que compõem a estrutura multicamada da PCB A2 IEEE. A utilização de múltiplas camadas permite uma melhor distribuição dos sinais de alta frequência, separação entre planos de alimentação e aterramento, além de contribuir para a integridade do sinal e redução de interferências eletromagnéticas.

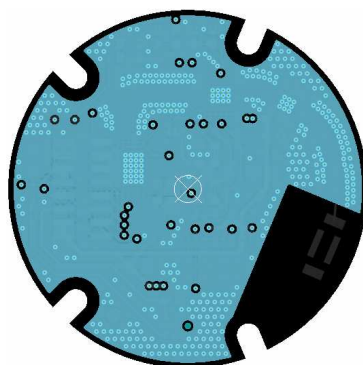
Os *layouts* das quatro camadas da PCB A2 IEEE foram desenvolvidos no *software* **Altium Designer**. Nessas visualizações, é possível observar individualmente cada camada, sem sobreposição com as demais, o que facilita a análise do roteamento de sinais, dos planos de referência e da distribuição dos componentes em cada nível da placa. A primeira e quarta camada foram posicionados os componentes SMD, enquanto a segunda e terceira camada foram utilizadas para aterramento e alimentação.

Figura 3.4: Layout da primeira camada PCB A2 IEEE.



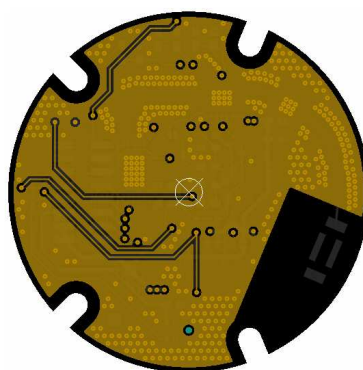
Fonte: Autor.

Figura 3.5: Layout da segunda camada PCB A2 IEEE.



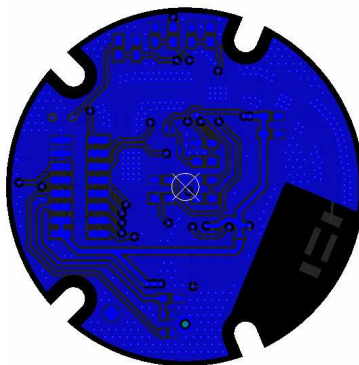
Fonte: Autor.

Figura 3.6: Layout da terceira camada PCB A2 IEEE.



Fonte: Autor.

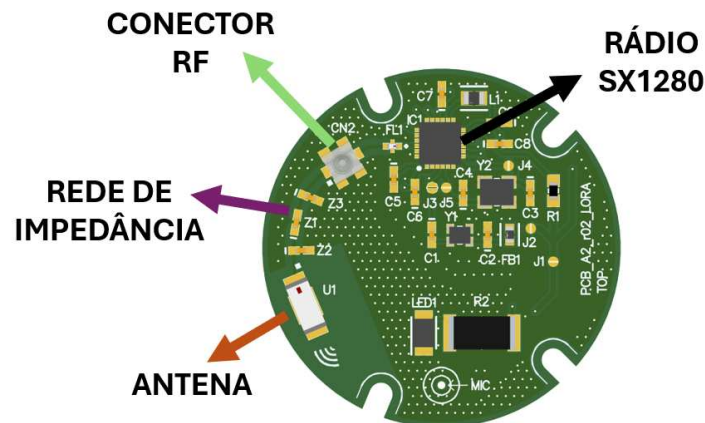
Figura 3.7: Layout da quarta camada PCB A2 IEEE.



Fonte: Autor.

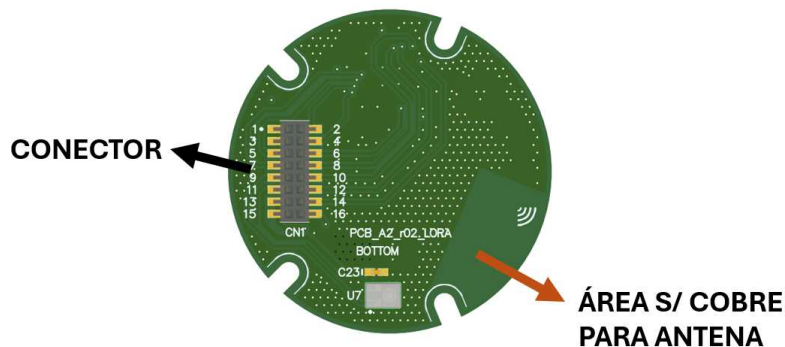
Na sequência, são exibidas as representações 3D e das quatro camadas que formam a arquitetura multicamada da PCB A2 LoRa. O emprego de diversas camadas proporciona uma distribuição mais eficiente dos sinais de alta frequência, favorece a separação dos planos de alimentação e terra, e colabora para a integridade dos sinais, além de minimizar interferências eletromagnéticas.

Figura 3.8: Vista 3D da camada superior (TOP) da PCB A2 LoRa.



Fonte: Autor.

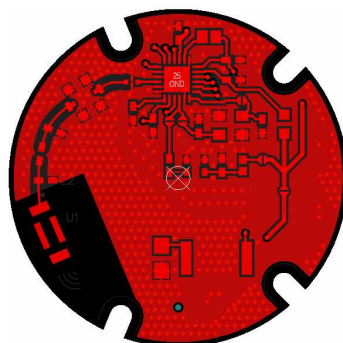
Figura 3.9: Vista 3D da camada inferior (BOTTOM) da PCB A2 LoRa.



Fonte: Autor.

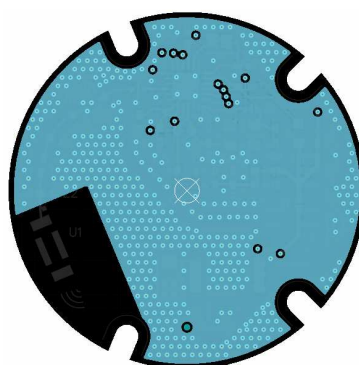
As Figuras 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13 apresentam os *layouts* das quatro camadas da PCB A2 LoRa, desenvolvidos no *software* **Altium Designer**. Assim como na PCB A2 IEEE, a primeira e quarta camada foram posicionados os componentes SMD, enquanto a segunda e terceira camada foram utilizadas respectivamente para aterramento e alimentação.

Figura 3.10: Layout da primeira camada PCB A2 LoRa.



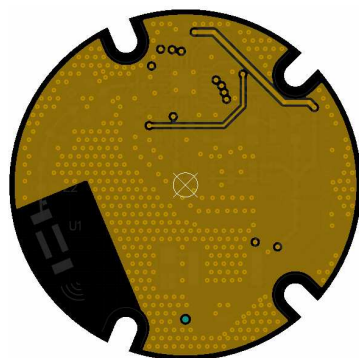
Fonte: Autor.

Figura 3.11: Layout da segunda camada PCB A2 LoRa.



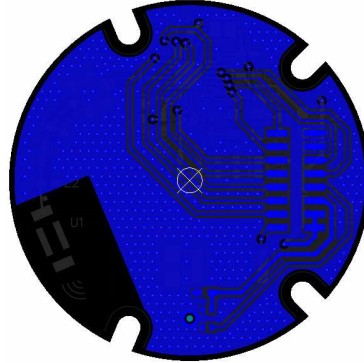
Fonte: Autor.

Figura 3.12: Layout da terceira camada PCB A2 LoRa.



Fonte: Autor.

Figura 3.13: Layout da quarta camada PCB A2 LoRa.



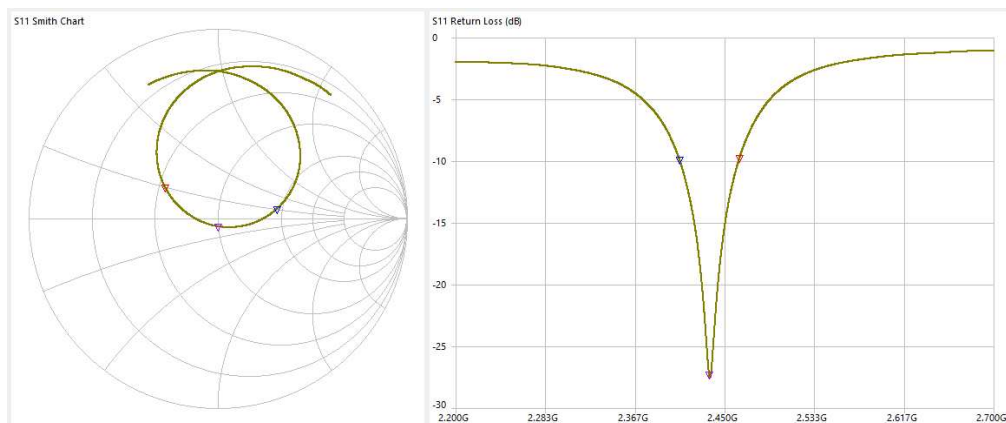
Fonte: Autor.

Concluída a apresentação dos *layouts* das PCBs A2 IEEE e A2 LoRa, é possível observar as particularidades de cada projeto em função das exigências específicas dos respectivos protocolos. A estrutura de cada placa foi desenvolvida visando atender aos requisitos de integridade de sinal e controle de impedância.

Com os circuitos fabricados, a etapa seguinte consistiu na validação experimental utilizando um Analisador de Redes Vetorial (VNA). O objetivo principal foi verificar o comportamento dos circuitos de RF e, especificamente, validar a eficácia da rede de casamento de impedância (topologia Pi) projetada para acoplar o transceptor à antena. Esses testes permitiram avaliar o coeficiente de reflexão (S_{11}), a adaptação de impedância e a largura de banda operacional, assegurando a conformidade com os parâmetros de projeto.

Os resultados das medições referentes ao módulo LoRa estão apresentados na Figura 3.14.

Figura 3.14: Carta de Smith e perda de retorno (LoRa) com atuação da rede Pi.



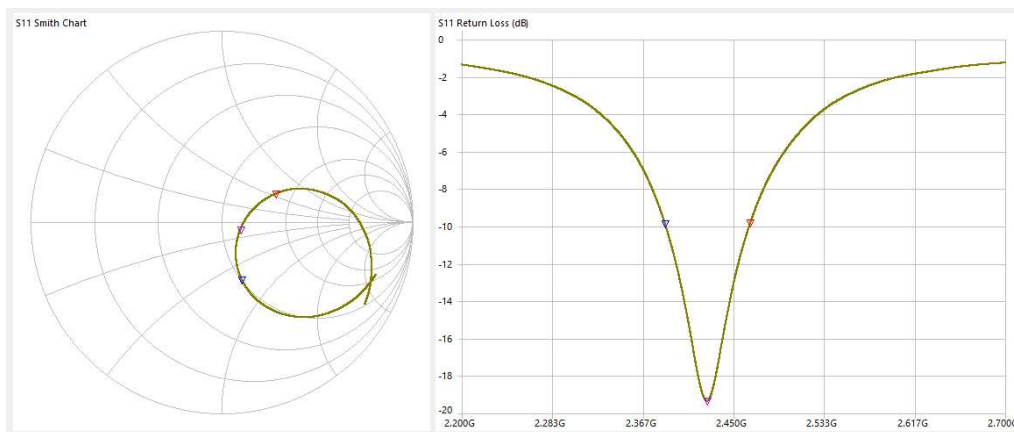
Fonte: Autor.

Na Figura 3.14, observa-se a Carta de Smith e o gráfico de perda de retorno para a placa A2 LoRa. Os dados detalhados na Tabela 3.3 evidenciam que a rede de casamento em Pi desempenhou corretamente sua função, ajustando a impedância do sistema para valores próximos aos $50\ \Omega$ ideais na frequência de operação.

O marcador 2 (2,43560 GHz) indica o ponto de melhor ressonância, com impedância de aproximadamente $50\ \Omega$, retorno de sinal (*return loss*) de $-27,338\ \text{dB}$ e um VSWR de 1,090. Este resultado confirma um excelente acoplamento, minimizando reflexões e maximizando a transferência de potência.

Além do ponto central, é fundamental analisar a largura de banda de impedância, definida como a faixa de frequências onde o coeficiente de reflexão se mantém abaixo de $-10\ \text{dB}$. Observando a curva, nota-se que o sistema opera eficientemente entre 2,40810 GHz e 2,46370 GHz. Essa largura de banda é suficiente para cobrir os canais de operação do protocolo LoRa, garantindo robustez na comunicação mesmo com pequenas variações de componentes.

Figura 3.15: Carta de Smith e perda de retorno (IEEE).



Fonte: Autor.

De forma análoga, os testes foram realizados para a PCB A2 (IEEE), cujos resultados constam na Figura 3.15 e na Tabela 3.3.

O marcador 2 (2,42580 GHz) apresenta uma impedância de $61,4\ \Omega$, retorno de sinal de $-19,348\ \text{dB}$ e VSWR de 1,242. Embora o acoplamento seja ligeiramente inferior ao do módulo LoRa, a rede de casamento ainda garantiu uma condição de operação muito favorável.

Analisando a largura de banda para o critério de $-10\ \text{dB}$, verifica-se que a antena IEEE mantém desempenho satisfatório na faixa de 2,38710 GHz a 2,46530 GHz. Isso engloba a frequência central típica do IEEE 802.15.4 (2,4 GHz), assegurando que a perda por reflexão permaneça em níveis aceitáveis para a aplicação.

Em suma, a Tabela 3.3 compara os principais marcadores. Nota-se que ambas as redes de casamento (LoRa e IEEE) foram bem-sucedidas em centrar a resso-

nância próxima a 2,43 GHz, com larguras de banda que atendem aos requisitos de transmissão de dados sem fio.

Tabela 3.3: Comparação dos principais parâmetros dos marcadores (LoRa e ZigBee).

Tecnologia	Frequência (GHz)	Impedância (Ω)	Return Loss (dB)	VSWR
LoRa – Marker 1	2,46370	$27 - j9,93$	-9,809	1,955
LoRa – Marker 2	2,43560	$50 - j4,3$	-27,338	1,090
LoRa – Marker 3	2,40810	$95,1 - j10,4$	-9,947	1,933
ZigBee – Marker 1	2,46530	$84,4 - j27,7$	-9,846	1,949
ZigBee – Marker 2	2,42580	$61,4 - j4,68$	-19,348	1,242
ZigBee – Marker 3	2,38710	$50,5 - j3,9$	-9,899	1,941

A PCB A2 ZigBee utiliza a antena modelo **2450AT42B100**, enquanto o transceptor LoRa emprega a antena modelo **2450AT42A100**, ambos fabricados pela Johanson Technology. Na Figura 3.16a e Figura 3.16b, são apresentados respectivamente os diagramas de radiação do sinal de RF para a antena 2450AT42B100 e 2450AT42A100, obtidos em ambiente controlado pela Johanson Technology.

Além dos padrões de radiação, destacam-se outros parâmetros elétricos relevantes da antena 2450AT42B100: impedância de entrada de 50 ohms, ganho médio de -1,5 dBi com pico de 0 dBi, e *return loss* mínimo de 9,5 dB, na faixa de operação de 2,4 GHz Johanson Technology Inc. (2023b).

Por sua vez, a antena 2450AT42A100, utilizada no módulo LoRa, apresenta características similares, como impedância de entrada de 50 ohms, porém com ganho médio ligeiramente inferior de -2,0 dBi, pico de -0,5 dBi, e *return loss* mínimo de 10 dB, também centrado na faixa ISM de 2,4 GHz Johanson Technology Inc. (2023a).

O principal motivo para a utilização de antenas diferentes para cada protocolo foi o casamento de impedância. Em testes práticos, o melhor desempenho no ajuste de impedância para o módulo LoRa foi obtido com a antena 2450AT42A100, apresentando menor perda de retorno, conforme ilustrado na Figura 3.14. Apesar de ambas as antenas possuírem impedância nominal de 50 ohms, as características de acoplamento e o comportamento em conjunto com o circuito impõem diferentes condições de casamento, o que justifica a escolha distinta.

As Figuras 3.16a e 3.16b apresentam os diagramas de radiação tridimensionais nos planos XY, XZ e YZ para as antenas **2450AT42B100** e **2450AT42A100**, respectivamente, ambos obtidos na frequência de 2,45 GHz.

Visualmente, observa-se que as duas antenas apresentam padrões de radiação bastante semelhantes, com comportamento quase omnidirecional nos planos analisados. Em particular:

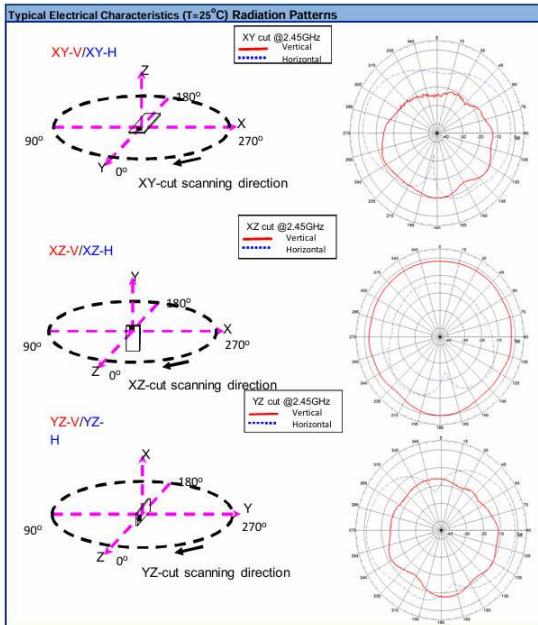
- **Plano XY:** Ambas exibem um padrão relativamente uniforme, com leve variação direcional, o que favorece aplicações em que o dispositivo pode mudar de orientação.
- **Plano XZ:** O padrão da antena 2450AT42B100 é ligeiramente mais achatado, enquanto a 2450AT42A100 apresenta maior simetria, o que pode indicar um desempenho mais estável nesse plano.
- **Plano YZ:** Pequenas diferenças também são notadas, com a antena 2450AT42A100 apresentando uma leve assimetria em torno dos ângulos de 90° a 270°, possivelmente causada pela geometria do encapsulamento ou pelo plano de terra utilizado nos testes.

De forma geral, os padrões de radiação entre os dois modelos são similares, especialmente para aplicações em 2,4 GHz onde há tolerância a pequenas variações angulares de ganho.

Apesar dos *layouts* serem semelhantes entre as PCB's LoRa e IEEE eles não são exatamente iguais, inclusive a impedância de saída do transreceptor SX1280 é de 40 ohms, como descrito no *datasheet* do componente 2450FM07D0034T (Inc., 2025), com filtro específico para o casamento de 40 para 50 ohms do módulo SX1280. O desempenho do casamento de impedância também pode variar devido a fatores como o posicionamento da antena na placa, plano de terra, solda e rede de *matching* utilizada e não apenas pela estrutura interna da antena.

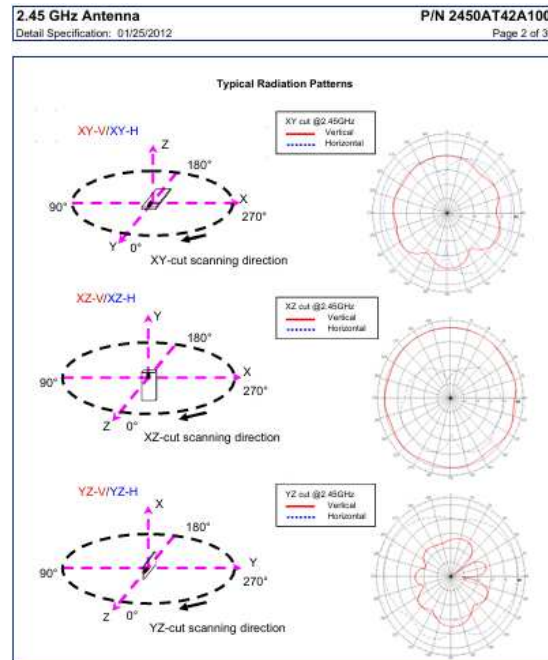
Buscando garantir condições equivalentes nos testes, foi realizada uma tentativa de casamento de impedância para o LoRa utilizando a antena 2450AT42B100. No entanto, devido às variações nos componentes da linha de transmissão, limitações na disponibilidade de capacitores e indutores, e às particularidades de cada layout, o melhor resultado de *return loss* foi obtido com a antena 2450AT42A100 para a placa A2 LoRa, enquanto a antena 2450AT42B100 foi mantida na placa A2 IEEE.

(a) Antena 2450AT42B100.



Fonte: Johanson Technology Inc. (2023b).

(b) Antena 2450AT42A100.



Fonte: Johanson Technology Inc. (2023a).

Figura 3.16: Comparação dos gráficos de radiação das antenas Johanson.

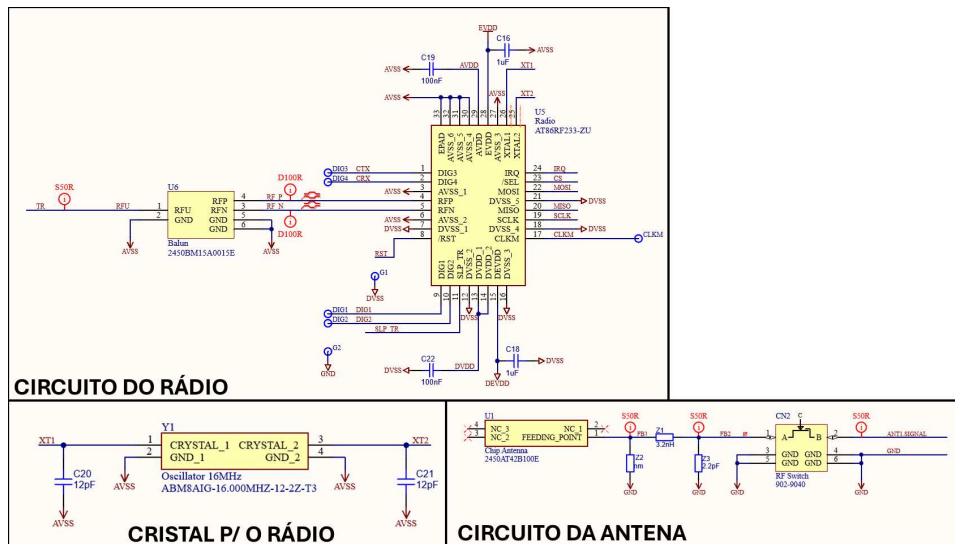
A Figura 3.17 mostra o esquemático da PCB A2 IEEE, detalhando suas três seções principais. Na parte de cristal, observa-se o oscilador de referência necessário para o funcionamento do transceptor AT86RF2331. Nos circuitos de rádio, destaca-se a integração com o front-end SKY66112-11, onde é utilizado um balun para converter o sinal diferencial de saída do rádio para o padrão *single-ended* exigido pela entrada do amplificador. Por fim, o circuito da antena ilustra a conexão de saída de 50 Ω acoplada à antena de cerâmica modelo 2450AT42B100.

De modo similar, a Figura 3.18 mostra o esquemático da PCB A2 LoRa. A seção do cristal apresenta dois osciladores dedicados: um oscilador de cristal com compensação de temperatura e outro oscilador externo, sendo que para os testes foi utilizada a primeira opção junto ao transceptor SX1280.

Nos circuitos de rádio, o diagrama evidencia as conexões da interface SPI e a malha de alimentação. Já na parte da antena, é detalhada a rede de casamento de impedância em topologia Pi, dimensionada para adaptar a impedância de saída de 40 Ω do transceptor para os 50 Ω da antena modelo 2450AT42A1005, garantindo a impedância de 40 Ω ao longo da trilha de radiofrequência.

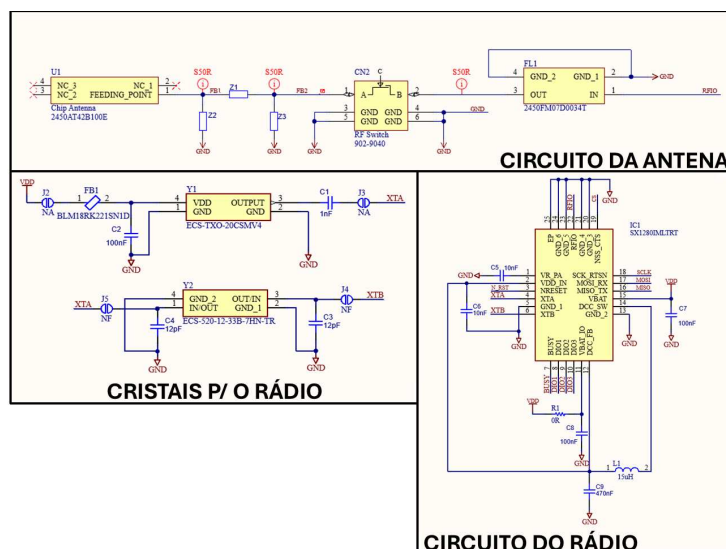
Outro componente fundamental na arquitetura da PCB A2 (IEEE) é o *front-end* de RF SKY66112-11, que integra as funções de Amplificador de Potência (PA) e

Figura 3.17: Esquemático da PCB A2 IEEE.



Fonte: Autor.

Figura 3.18: Esquemático da PCB A2 LoRa.



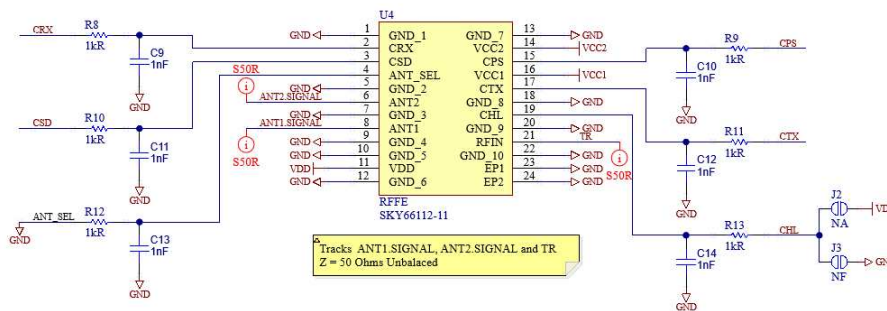
Fonte: Autor.

Amplificador de Baixo Ruído (LNA). A inclusão deste componente visa melhorar o alcance do *link*.

Inicialmente, é necessário compatibilizar o sinal de RF. O transceptor AT86RF233 possui uma saída diferencial, enquanto o SKY66112-11 opera com entrada *single-ended*. Para solucionar essa discrepância, foi inserido um *balun* na linha de transmissão entre os dois componentes, garantindo a conversão correta do sinal e a manutenção da integridade da impedância de 50 Ω .

A Figura 3.19 ilustra o esquemático do componente. Um ponto crítico do projeto é a estratégia de alimentação e controle de ganho. O SKY66112-11 é alimentado por reguladores lineares que fornecem tensões fixas de 1,8 V (VCC1) e 1,2 V (VCC2). Essas tensões, especialmente o VCC2 de 1,2 V, impõem um limite físico à potência máxima de saída, conforme será demonstrado nas curvas características, em modo *low power*, o amplificador externo SKY66112-11 adiciona um consumo quiescente de aproximadamente 8 mA.

Figura 3.19: Esquemático PCB A2 (SKY66112-11).



Fonte: Autor.

Para definir o comportamento do amplificador, a configuração dos pinos de controle é determinante. A Tabela 3.4 detalha a tabela verdade do componente. No entanto, para este projeto, optou-se por uma configuração de *hardware* fixa para otimizar o consumo:

- O pino **CHL** (Pin 19) foi mantido permanentemente em nível lógico baixo (aterrado).
- Os demais pinos (CSD, CRX, CTX) são controlados dinamicamente pelo microcontrolador.

Ao observar a Tabela 3.4, nota-se que forçar o pino CHL em '0' impede que o componente entre no **Modo 2 (Transmit HP mode - Alta Potência)**. Consequentemente, durante a transmissão, o sistema opera obrigatoriamente no **Modo 3 (Transmit LP mode - Baixa Potência)**.

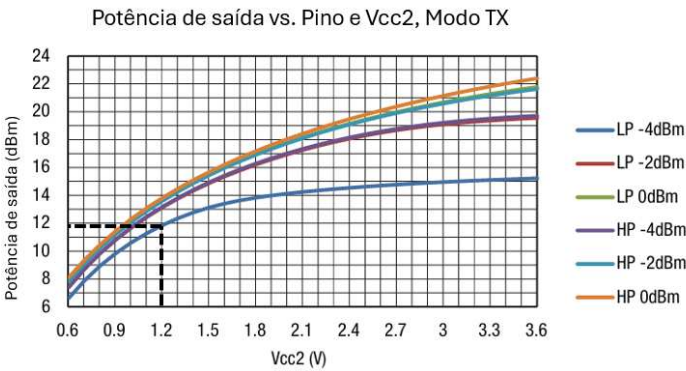
Essa escolha justifica-se por dois motivos: primeiramente, alinhar o consumo energético a níveis compatíveis com o módulo SX1280 (LoRa) para uma comparação justa de eficiência; e, em segundo lugar, devido à limitação da tensão VCC2 (1,2 V). Conforme a Figura 3.20, com VCC2 reduzido, o ganho de potência real do modo HP seria marginal frente ao aumento do consumo de corrente, tornando o modo LP (*Low Power*) a escolha mais eficiente para esta arquitetura.

Tabela 3.4: Modos de operação e lógica de controle (Destaque para a configuração utilizada).

Modo	Descrição	CSD	CPS	CRX	CTX	CHL
0	All off (Sleep)	0	X	X	X	X
1	Receive mode	1	0	1	0	X
2	Transmit HP mode	1	0	X	1	1
3	Transmit LP mode	1	0	X	1	0
4	Receive BP mode	1	1	1	0	X
5	Transmit BP mode	1	1	X	1	X
6	All off (Sleep)	1	X	0	0	X

Nota: O pino CHL fixo em 0 seleciona o Modo 3.

Figura 3.20: Relação entre Tensão VCC2 e Potência de Saída (em 2440 MHz).



Fonte: Adaptado de Skyworks Solutions, Inc. (2023).

3.3 Firmware

Nesta seção, discute-se o *firmware* empregado em ambos os módulos de transmissão e recepção. Nesta etapa, foram avaliados os transceptores, bem como o algoritmo responsável pela execução dos testes realizados. Os *firmwares* utilizados foram organizados de acordo com os diferentes cenários de teste, considerando as configurações de potência e o tamanho do *payload* transmitido.

Os algoritmos para os *firmwares* foram divididos nos seguintes itens:

- AT86RF233 com PA/LNA ativo operando com potência de -4 dBm, resultando em uma potência efetiva de 12 dBm (equivalente à potência máxima do SX1280), com 115 bytes de *payload*.
- AT86RF233 com PA/LNA no modo *BYPASS* inativo, operando na sua potência máxima de 4 dBm, com 115 bytes de *payload*.
- SX1280 operando na potência máxima permitida pelo protocolo ZigBee, 4 dBm, com 115 bytes de *payload*.
- SX1280 operando na sua potência máxima de 12 dBm, com 115 bytes de *payload*.
- SX1280 operando na sua potência máxima de 12 dBm, com 255 bytes de *payload*.

As máquinas de estados dos dois transceptores, SX1280 e AT86RF233, são apresentadas na Figura 3.21 e na Figura 3.22, respectivamente. Compreender o processo de comunicação é essencial para entender o funcionamento dessas máquinas de estado e como o *firmware* irá interagir com elas durante os testes.

A máquina de estados do SX1280 segue o fluxo ilustrado na Figura 3.21. No processo adotado no *firmware*, o rádio é inicialmente energizado com 3,3 V, entrando no estado *STANDBY*. A partir desse ponto, o *firmware* configura os parâmetros principais, como o canal de frequência, o modo de operação LoRa e os parâmetros específicos da modulação. Os parâmetros configurados na Tabela 3.5, são para a maior velocidade disponível no modo LoRa, podendo ser calculados com as equações 2.4, 2.5 e 2.6. A Semtech também possui uma calculadora online que permite calcular esses parâmetros (Semtech Corporation, 2024). O tempo no ar é importante para configurar a próxima transmissão do transmissor, com um *payload* de 115 bytes e com os parâmetros da Tabela 3.5, temos um tempo aproximado de 8,02ms e para 255 bytes, um tempo de 17,32ms.

Vale destacar duas diferenças importantes na máquina de estados do SX1280 em relação ao AT86RF233: (i) o SX1280 não possui um modo de *DEEP_SLEEP*, e (ii) o transceptor não permanece no estado de TX após a transmissão completa de um *payload*, retornando automaticamente ao estado *STDBY*.

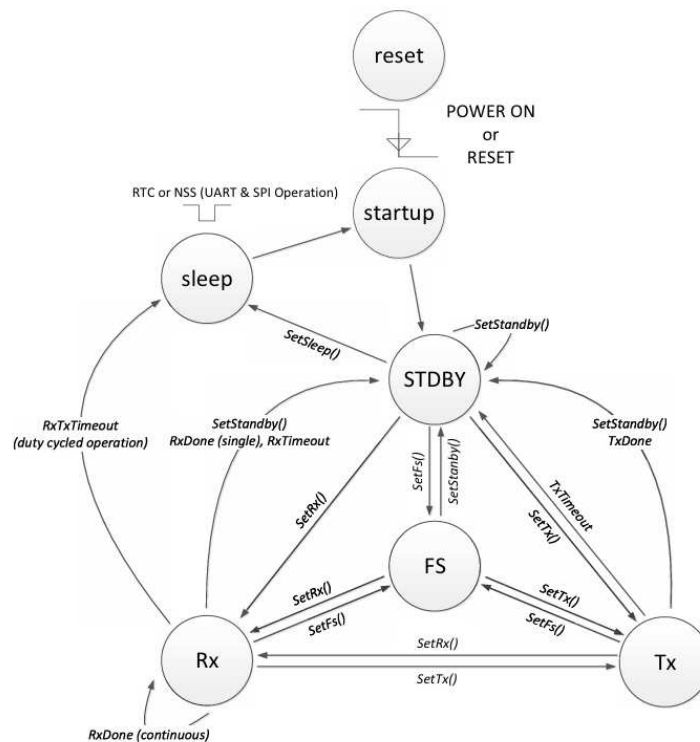
Tabela 3.5: Parâmetros do SX1280 utilizado nos testes.

Parâmetros LoRa 2,4 GHz			
Modulação	LoRa	Tamanho do Preâmbulo	8 símbolos
Fator de Espalhamento (SF)	5	Cabeçalho (<i>Header</i>)	Habilitado
Largura de Banda	1600	Comprimento do Payload	115 e 255 bytes
Taxa de Codificação (CR)	4/5	CRC	Ligado

Embora ambos os transceptores possuam recepção contínua (*continuous RX*), o SX1280 não oferece transmissão contínua (*continuous TX*) para o envio de *payloads*. Após a finalização da transmissão (*TxDone()*), o rádio do SX1280 retorna automaticamente ao estado *STDBY*, sendo necessário reconfigurá-lo manualmente para o modo de transmissão antes de realizar um novo envio.

Em contraste, no transceptor AT86RF233, ao término do envio de um *frame*, o dispositivo permanece automaticamente no estado *PLL_ON*, permitindo maior agilidade em transmissões subsequentes e isso impacta diretamente no *throughput* de dados.

Figura 3.21: Máquina de estados SX1280.



Fonte: Semtech (2020)

No caso do ZigBee, a máquina de estados é iniciada assim que o rádio é energizado com 3,3 V, sendo automaticamente direcionada para o estado *TRX_OFF*. A partir

dos dois transceptores. Pode-se observar que, embora ambos operem na mesma frequência de 2,445 GHz, as tecnologias de modulação e os recursos de cada transceptor são significativamente distintos.

Em relação ao tamanho do *payload*, o SX1280 oferece maior flexibilidade com pacotes de até 255 bytes, enquanto o AT86RF233 segue o limite de 127 bytes do padrão IEEE 802.15.4, dos quais 115 bytes foram usados nos testes. O SX1280 opera com correção de erro direta (FEC) implícita, melhorando a confiabilidade da comunicação, enquanto o AT86RF233 não possui esse recurso nativamente.

Outros diferenciais incluem o controle de potência de transmissão mais amplo no SX1280 e a ausência de recursos como ACK automático e CSMA/CA no LoRa, o que requer uma abordagem de controle de acesso ao meio implementada no *firmware*. Por fim, o barramento SPI do SX1280 opera com 10MHz a mais em comparação ao AT86RF233 (o limite indicado por cada *datasheet*).

Tabela 3.6: Parâmetros comparáveis para os testes entre SX1280 e AT86RF233.

Parâmetro	SX1280 (LoRa 2,4 GHz)	AT86RF233 (O-QPSK 802.15.4)
Modulação	LoRa	O-QPSK
Frequência	2,445 GHz	2,445 GHz
Taxa de Dados	203,12 kbps	250 kbps
Tamanho do Payload	115 e 255 bytes	115 bytes
Código de Correção (CR / FEC)	4/5 (implícito no LoRa)	Não aplicável
Preâmbulo	8 símbolos	Padrão IEEE 802.15.4 (4 bytes + SFD)
CRC	Desligado	Habilitado (obrigatório no 802.15.4)
Cabeçalho (Header)	Habilitado	Padrão IEEE 802.15.4
Potência de Transmissão	4 dBm e 12 dBm	-4 dBm (PA 12dBm) e 4dBm (BYPASS)
ACK Automático	Não	Não
CSMA/CA	Não disponível	Sim (BE: 1–4, CCA modo 1)
SPI	18MHz	8MHz

Para as operações de transmissão (**TX**), o funcionamento do *firmware* segue a seguinte sequência de estados:

- **AT86RF233**

- O rádio é iniciado em *TRX_OFF*.
- O rádio é direcionado ao estado *PLL_ON*.
- O rádio transmite o número de bytes designado.
- O rádio é direcionado ao estado *TRX_OFF*.

- **SX1280**

- O rádio é iniciado em *STDBY*.
- O rádio é direcionado ao estado *Tx*.
- O rádio transmite o número de bytes designado.

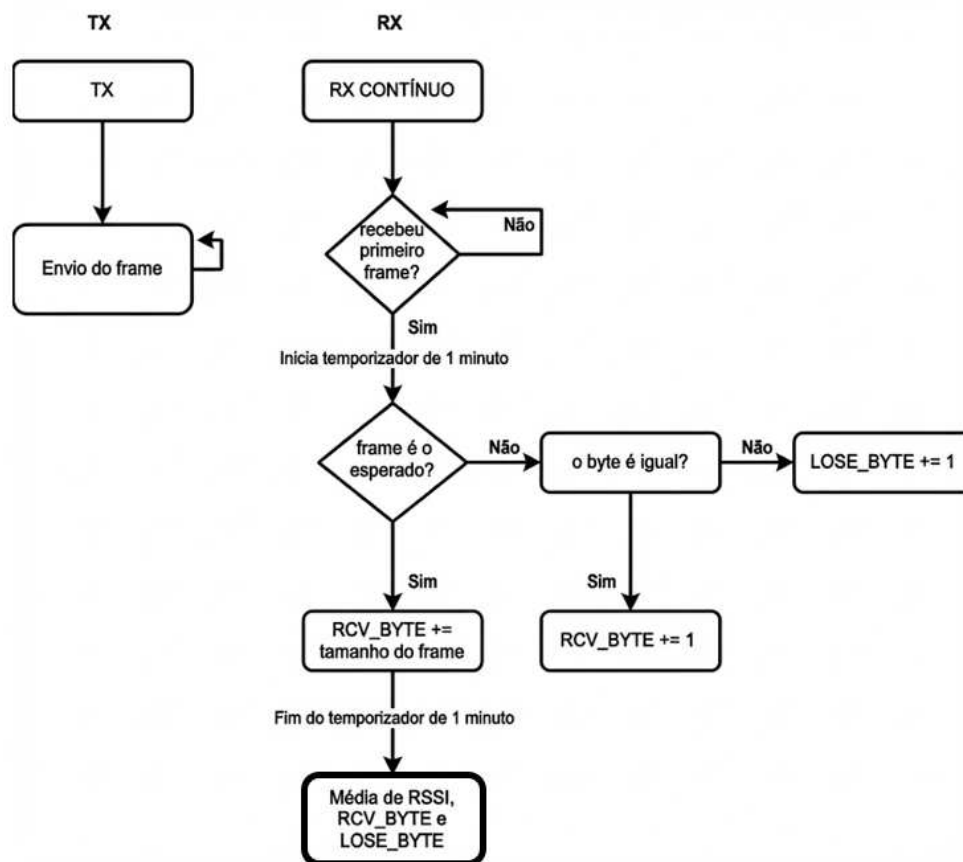
- O rádio é direcionado ao estado via `TxDone` (*callback* do radio) para o estado *STDBY*.

Para o estado de recepção (**RX**), o radio funciona da seguinte forma:

- **AT86RF233 e SX1280**

- O rádio é iniciado em *TRX_OFF*.
- O rádio é direcionado ao estado *RX_ON*.
- O rádio fica em modo de espera até receber o primeiro *frame*.
- O rádio após receber o primeiro *frame*, inicia um *timer*.
- Se o *frame* recebido é todo igual ele adiciona a variável `RCV_BYTE` o tamanho do *frame*, caso ele não seja igual é conferido byte a byte quais bytes são iguais e quais são diferentes, se os bytes são iguais é adicionado a variável `RCV_BYTE` e se são diferentes é adicionado à variável `LOSE_BYTE`.
- Após 1 minuto, o rádio faz uma média dos valores de *RSSI*.

Figura 3.23: Fluxograma do *firmware*.



Fonte: Autor.

3.4 Testes Práticos

Nesta seção, detalham-se as condições, o cenário e os procedimentos adotados para a execução dos experimentos de campo.

A metodologia para avaliação da taxa de dados baseou-se em transmissões de fluxo contínuo (*continuous streaming*) durante intervalos ininterruptos de 60 segundos por ponto de medição. Essa estratégia foi adotada em substituição ao método de múltiplas amostragens de curta duração, fundamentando-se nas características de alta vazão da camada física das tecnologias em 2,4 GHz. Como o IEEE 802.15.4 e o LoRa nesta frequência atingem taxas teóricas de até 250 kbps e ~ 203 kbps, respectivamente, o volume de tráfego gerado em um único minuto situa-se na ordem de 10^4 pacotes. Tal densidade amostral confere ao teste contínuo uma significância estatística intrínseca.

Além da robustez amostral, o teste de duração contínua desempenha o papel de teste de estresse (*stress test*) do sistema embarcado, verificando a capacidade de manutenção da estabilidade do fluxo de dados e da integridade do sincronismo temporal sob carga máxima. Ademais, dada a natureza ruidosa da banda ISM de 2,4 GHz, uma janela de observação estendida permite uma média consolidada que absorve as variações estocásticas e interferências externas, refletindo um cenário de desempenho verossímil para aplicações de monitoramento constante na IIoT.

A validação estatística desta abordagem apoia-se na Lei dos Grandes Números. Diferentemente de protocolos LPWAN sub-GHz de baixa taxa, onde um minuto resultaria em poucos dados, o alto rendimento dos protocolos estudados garante que o número de eventos discretos (n) atinja magnitudes entre 10^4 e 10^5 . Estatisticamente, à medida que $n \rightarrow \infty$, o Erro Padrão da Média (*SEM*) decresce com $\frac{1}{\sqrt{n}}$, tornando a incerteza de uma amostragem massiva inferior à de múltiplas amostragens pequenas.

Sob a ótica dos *Bernoulli Trials*, onde cada pacote representa um evento binário independente, a margem de erro (E) para um intervalo de confiança de 95% é expressa por:

$$E = 1,96 \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \quad (3.1)$$

Para $n > 10.000$, E torna-se estatisticamente desprezível ($< 1\%$), assegurando que a Taxa de Entrega de Pacotes (PDR) observada reflete a qualidade do enlace.

O arranjo experimental é apresentado nas Figuras 3.24 e 3.25. O módulo transmissor foi fixado ao topo de um mastro de PVC com 3 metros de altura, simulando uma instalação de infraestrutura elevada, com referências visuais para garantir o alinhamento da antena. O módulo receptor foi posicionado manualmente por um operador, mantendo-se a mesma altura do transmissor para assegurar a consistência das condições de propagação.

Figura 3.24: Módulo de transmissão.



Fonte: Autor.

Figura 3.25: Módulo de recepção.



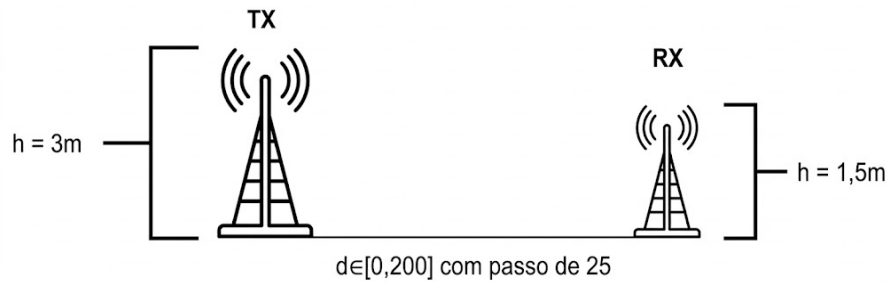
Fonte: Autor.

Na Figura 3.26, é apresentado o modelo teórico de medição que serviu de base para as aquisições de dados.

Os experimentos foram conduzidos nas dependências da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). O módulo transmissor foi posicionado no topo de um tubo de PVC com 3 metros de altura, enquanto o módulo receptor registrava continuamente as variáveis `RCV_BYTE`, `LOSE_BYTE` e a média do RSSI.

A Figura 3.27 ilustra o percurso e os pontos de medição utilizados durante os testes. Para todas as distâncias (25 m, 50 m, 75 m, 100 m, 125 m, 150 m, 175 m e 200 m), as leituras foram realizadas durante um intervalo de 1 minuto.

Figura 3.26: Processo experimental entre módulos de recepção e transmissão.



Fonte: Autor.

Figura 3.27: Distâncias medidas para os testes.



Fonte: Autor.

Durante os testes, foram variados os seguintes parâmetros: o número de bytes transmitidos, a potência dos rádios e a distância entre os módulos. Para o padrão IEEE 802.15.4, adotou-se o valor de 115 bytes, visando assegurar uma margem de segurança em relação ao limite máximo de 127 bytes permitido pelo protocolo. No que tange ao LoRa, considerando que seu buffer suporta até 255 bytes, os testes foram conduzidos com 115 bytes (para possibilitar a comparação com o IEEE) e com o valor máximo de 255 bytes.

Outro parâmetro avaliado foi a potência de transmissão dos rádios. O transreceptor AT86RF233 possui potência máxima de 4 dBm, enquanto o SX1280 alcança até 12 dBm. Assim, os testes foram conduzidos utilizando essas potências máximas. Para que o AT86RF233 atingisse 12 dBm, foi utilizado um amplificador externo do

tipo PA/LNA, conforme descrito na Seção 3.2.

A Figura 3.28 ilustra a configuração experimental para a coleta de dados de campo, com uma distância de 75 metros entre os módulos transmissor (indicado pela seta superior) e receptor (indicado pela seta inferior). O módulo receptor está acoplado a um notebook, que realiza as medições.

Figura 3.28: Local onde foram aferidos os testes.



Fonte: Autor.

Capítulo 4

Resultados

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos a partir dos testes experimentais realizados com os módulos de comunicação LoRa e IEEE 802.15.4 operando na faixa de 2,4 GHz, especificamente na frequência 2,45 GHz, detalhado na seção 3.2. Conforme descrito na Seção 3.4 (“Testes Práticos”), do Capítulo 3 (“Metodologia”), as avaliações foram conduzidas em um ambiente de campo aberto.

Os resultados abrangem métricas de desempenho, qualidade do sinal, volume de dados perdidos e a taxa de transferência de dados, além de detalhar o consumo de energia dos módulos em diferentes cenários operacionais. A análise comparativa desses dados busca oferecer uma compreensão aprofundada das capacidades e limitações de cada protocolo, contribuindo diretamente para o objetivo de avaliar a aplicabilidade dessas tecnologias no contexto da Internet das Coisas Industrial (*Industrial Internet of Things – IIoT*).

4.1 Consumo

Esta seção dedica-se à avaliação do consumo de energia dos módulos operando com os protocolos LoRa e IEEE 802.15.4, intrínsecos à classe LPWAN. Em paralelo, será investigada a viabilidade de painéis fotovoltaicos em suprir esses requisitos de consumo ou em otimizar a distribuição energética em conjunto com sistemas de bateria, visando a sustentabilidade das operações. Os critérios de avaliação para as medições de consumo correspondem aos parâmetros empregados nos testes de campo. Especificamente, será analisada a potência do rádio durante um minuto de transmissão contínua e um minuto de recepção contínua.

4.1.1 Sistema

O sistema de medição baseou-se no STLINK-V3PWR. Este dispositivo atua como uma unidade autônoma de medição de energia, capaz de fornecer alimentação e

medir o consumo de corrente da aplicação alvo. Sua conexão foi realizada diretamente no conector da bateria do módulo em teste. Conforme ilustrado na Figura 4.1, o aparato experimental consistiu na utilização do STLINK-V3PWR (STMicroelectronics, 2020) para alimentar e monitorar o consumo de um dos módulos com uma tensão de operação de 3,6 V. Os dados foram coletados por meio do *software* STM32Cube-MonitorPWR e registrados em formato .csv. Simultaneamente, o outro módulo operava alimentado por uma bateria de 3,6 V, estabelecendo assim o cenário completo de comunicação.

Figura 4.1: Sistema de medição de corrente.



Fonte: Autor.

A Figura 4.2 detalha o comportamento do consumo de corrente do módulo IEEE 802.15.4 durante a recepção contínua de pacotes de 115 bytes. Observa-se uma corrente média de 16,3 mA nesse estado de escuta ativa.

Complementarmente, a Figura 4.3 ilustra a demanda energética em modo de transmissão. Neste cenário de transmissão contínua de pacotes, ao longo de um período de 1 minuto, a corrente média registrada foi de 24,94 mA. Vale salientar, que o cenário de medição destas duas figuras foram com a potência máxima do rádio de 4dBm e o PA/LNA em *BYPASS*.

Figura 4.2: Corrente em função do tempo (RX 4dBm IEEE 802.15.4).

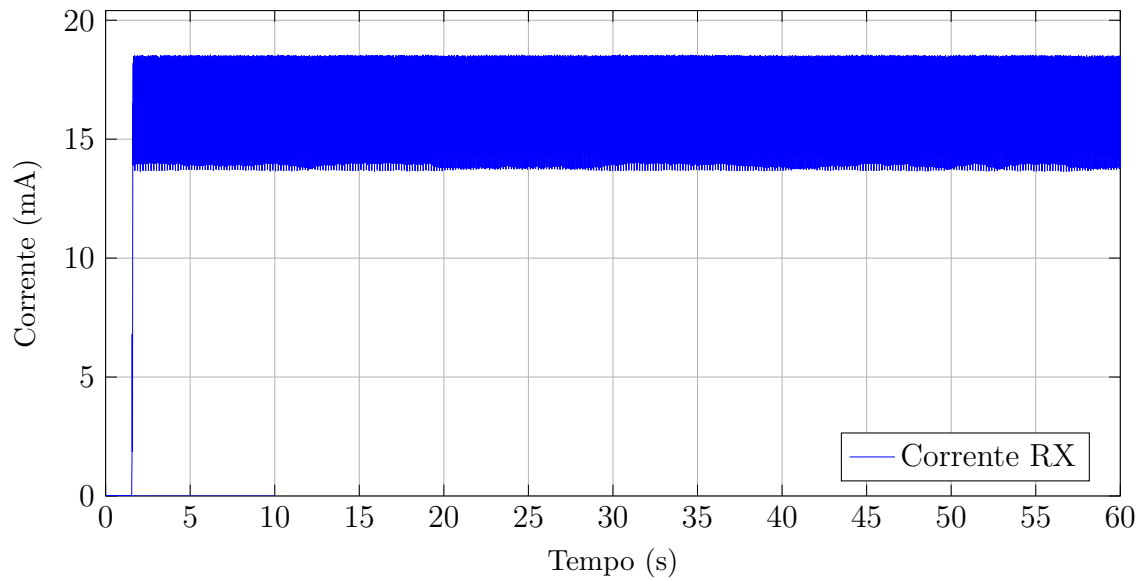
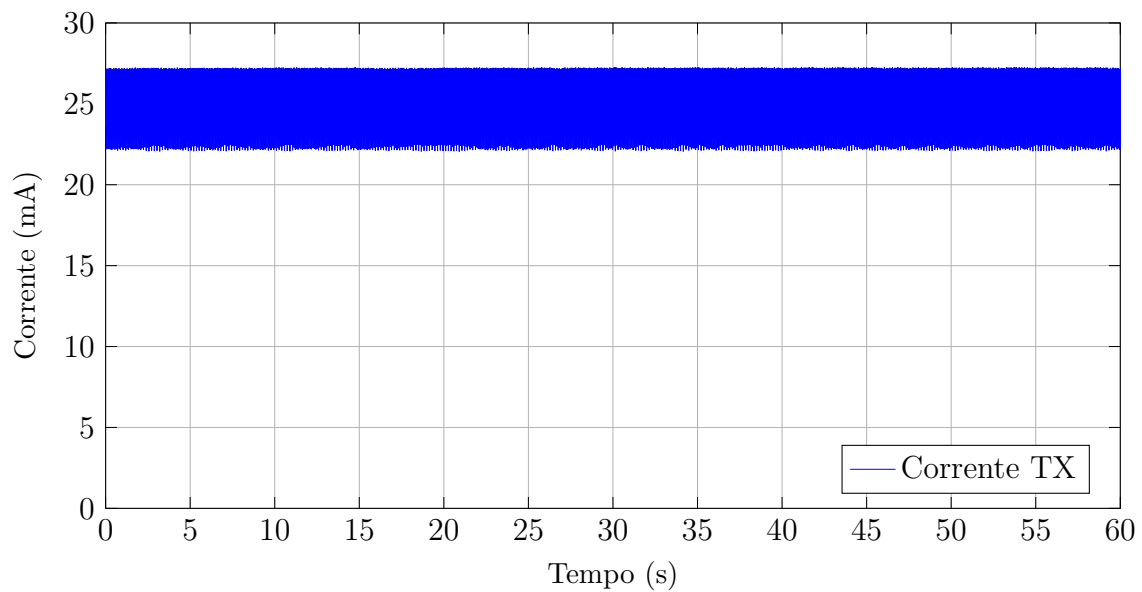


Figura 4.3: Corrente em função do tempo (TX 4dBm IEEE 802.15.4).



Para o módulo de transmissão e recepção, foram avaliadas diferentes configurações de potência. Inicialmente, partindo de um nível base de -4 dBm, a utilização de um amplificador de potência (PA) externo e um amplificador de baixo ruído (LNA) permitiu elevar a potência de transmissão para 12 dBm, conforme ilustrado e detalhado na Figura 3.20. As curvas de consumo de corrente associadas a esta potência de 12 dBm são apresentadas nas Figuras 4.5 e 4.4. Para os estados de transmissão

e recepção contínuos, os valores médios de corrente registrados foram de 36,37 mA e 58,14 mA, respectivamente. Na Figura 4.4, observa-se um comportamento mais constante (*flatline*) em comparação com as outras curvas de recepção, o que pode ser atribuído à resolução do instrumento de medição, que apresenta limitações na captura de variações de menor amplitude em níveis de corrente mais elevados.

Figura 4.4: Corrente em função do tempo (RX 12dBm IEEE 802.15.4).

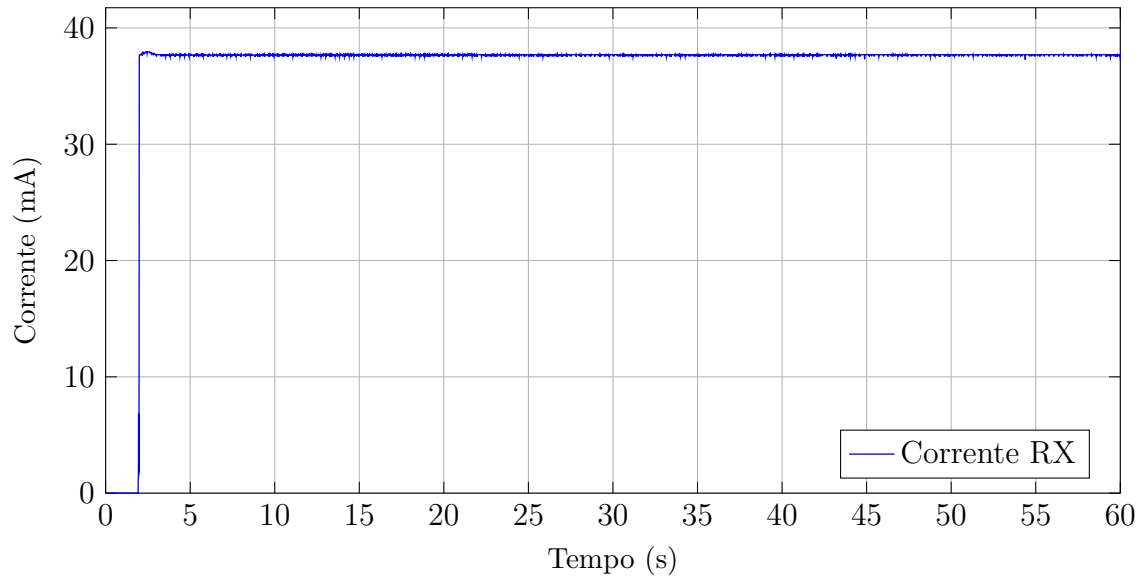
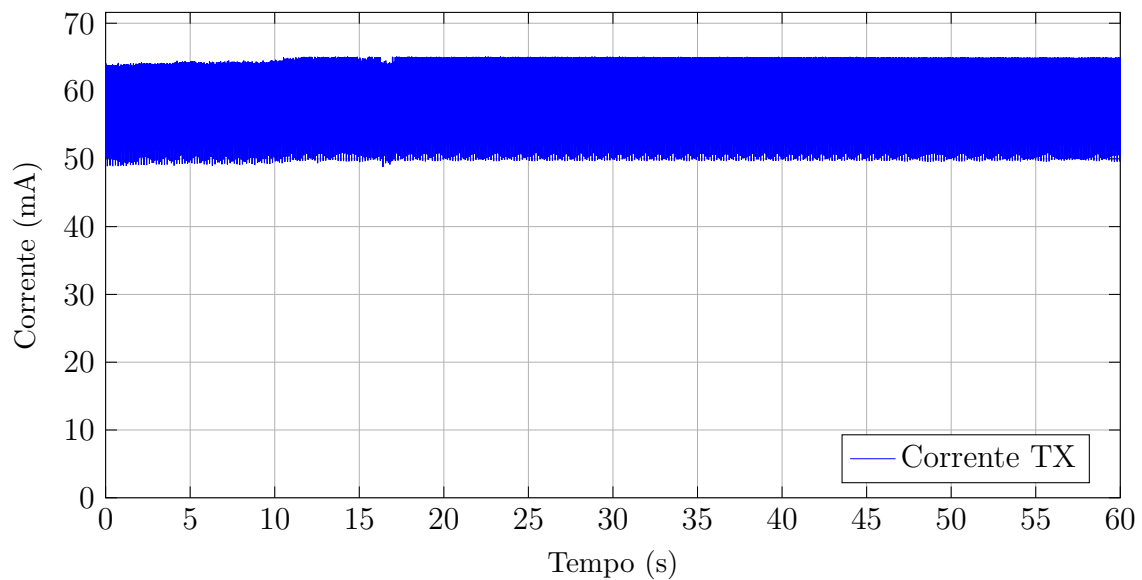


Figura 4.5: Corrente em função do tempo (TX 12dBm IEEE 802.15.4).



No que se refere aos módulos de transmissão e recepção LoRa com o transreceptor SX1280 para assegurar a comparabilidade e a validade dos resultados, as medições

foram realizadas de maneira análoga às condições de teste estabelecidas na seção 3.4. Isso permite uma análise direta do comportamento do SX1280 em relação a outros protocolos e configurações, sob cenários controlados. Assim, foram conduzidas as seguintes aferições detalhadas:

Para o protocolo LoRa, a Figura 4.6 apresenta o consumo de corrente em modo de recepção contínua. Sob as condições de envio de 115 bytes, potência de 4 dBm e um período de coleta de 1 minuto, a corrente média registrada foi de 16,42 mA. Em contraste, para a transmissão de dados, a Figura 4.7 evidencia uma corrente média de 20,89 mA, sob as mesmas condições de potência e duração.

Figura 4.6: Corrente em função do tempo (RX 4dBm LoRa).

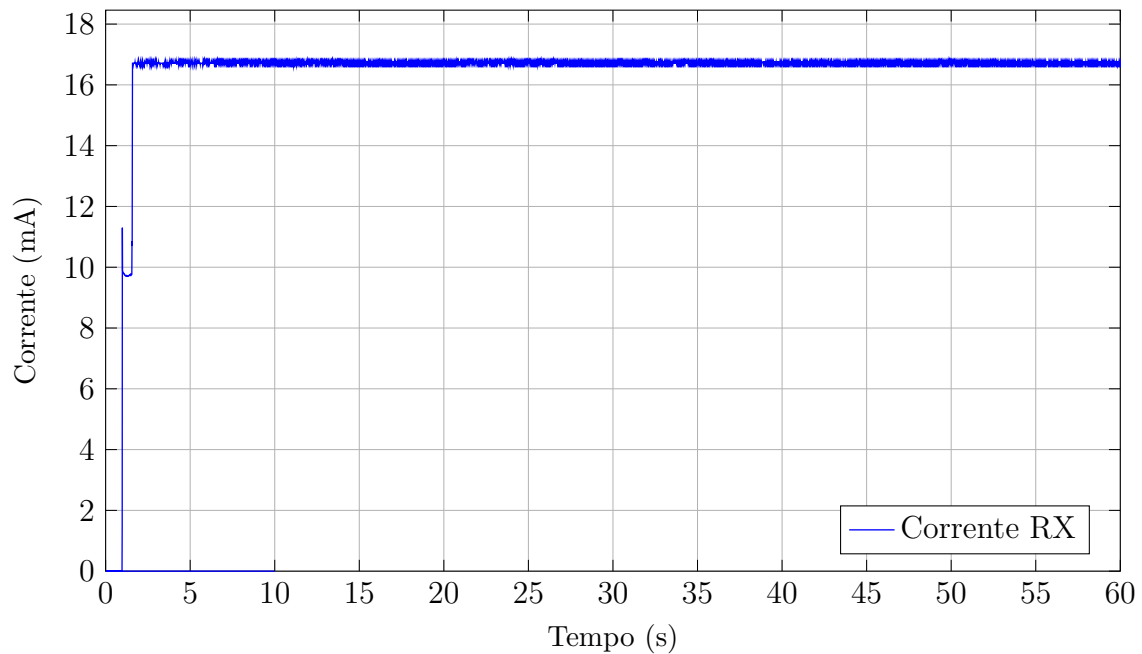
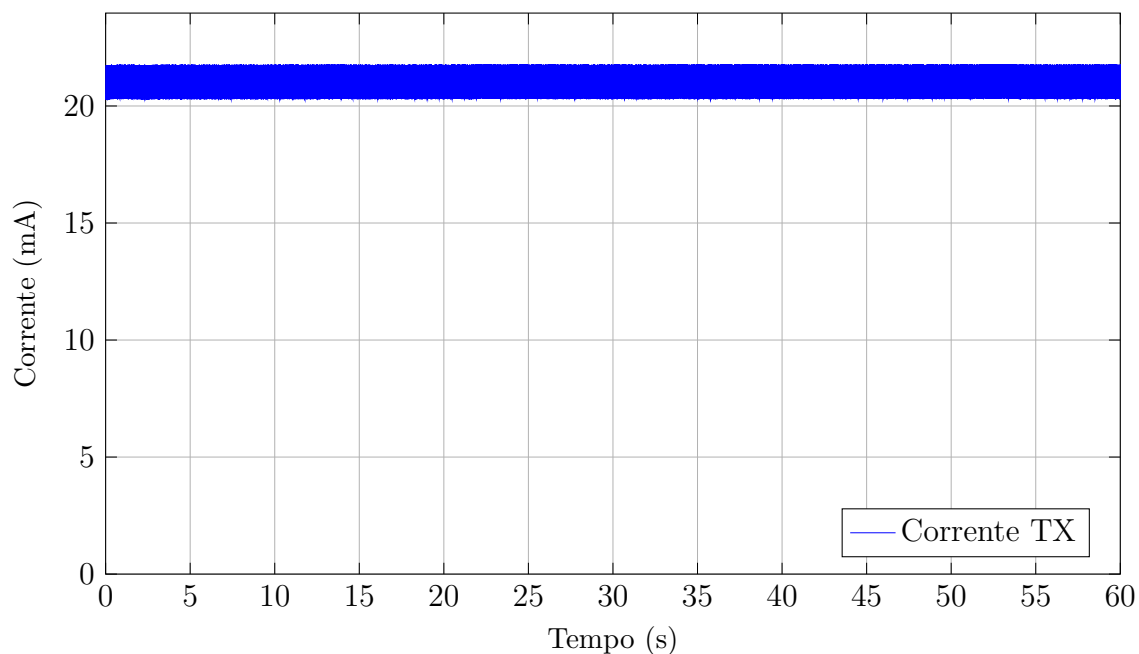


Figura 4.7: Corrente em função do tempo (TX 4dBm LoRa).



Agora, nas mesmas condições e com uma potência maior de 12 dBm, utilizando os mesmos 115 bytes, observa-se que a corrente de recepção contínua do LoRa mantém uma média semelhante à anterior, até porque não utiliza um C.I. externo para amplificação (16,44 mA). Já a Figura 4.9 apresenta uma corrente média de 27,56 mA.

Figura 4.8: Corrente em função do tempo (RX 12 dBm LoRa (115 bytes)).

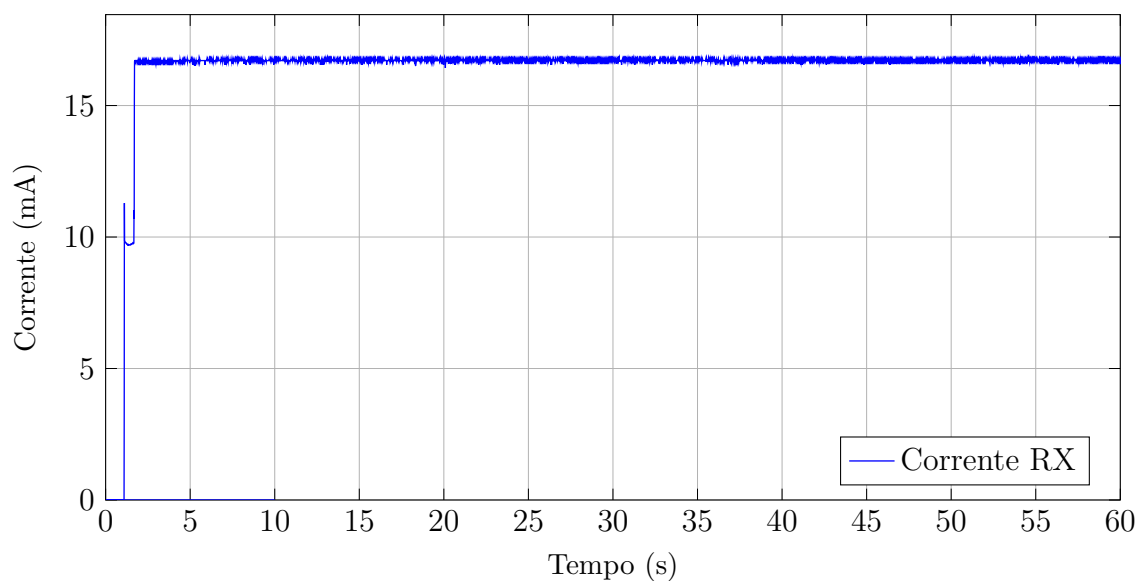
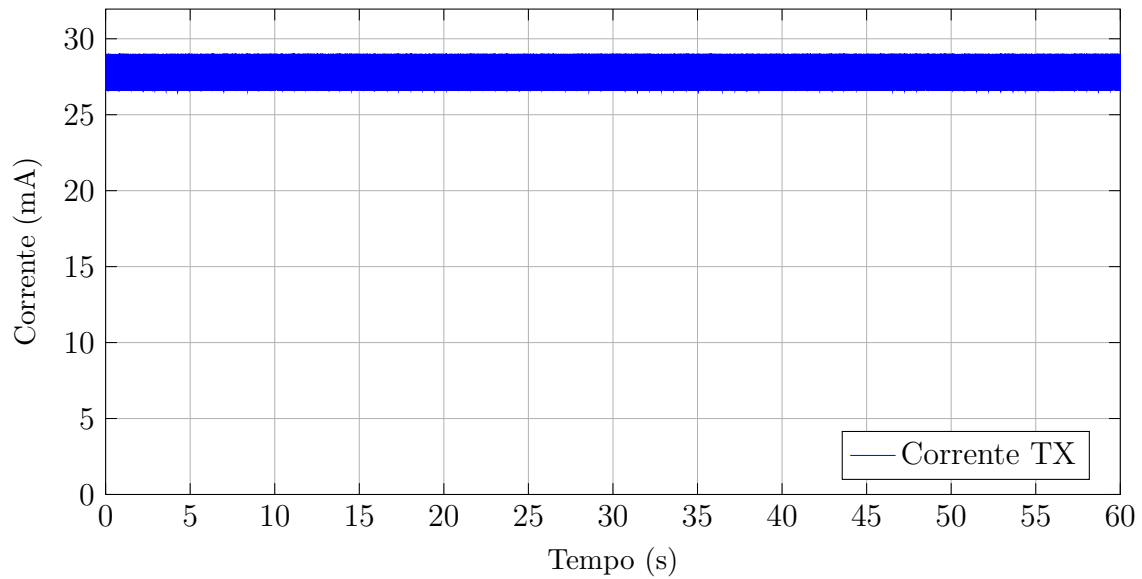


Figura 4.9: Corrente em função do tempo (TX 12 dBm LoRa (115 bytes)).



Para os testes finais, foram utilizados pacotes com 255 bytes e a mesma potência de transmissão de 12 dBm. Além disso, empregou-se um quadro de 255 bytes (capacidade máxima do SX1280) ao invés dos 115 bytes realizado nos últimos testes, operando com *Spreading Factor 5*, como nas outras medições do LoRa.

Com essa configuração e em recepção contínua demonstrada pela Figura 4.10, temos uma corrente média de 16,43 mA e em transmissão contínua, temos uma corrente média de 28,21 mA, um consumo médio ligeiramente maior que o de 115 bytes, porém com picos maiores de 31,40 mA.

Figura 4.10: Corrente em função do tempo (RX 12 dBm LoRa (255 bytes)).

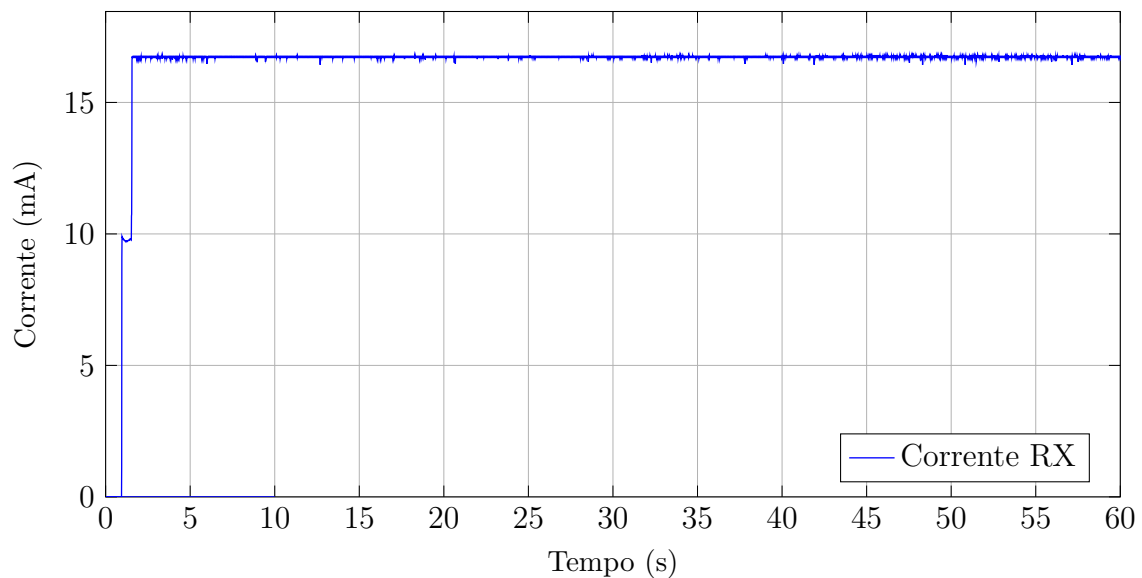
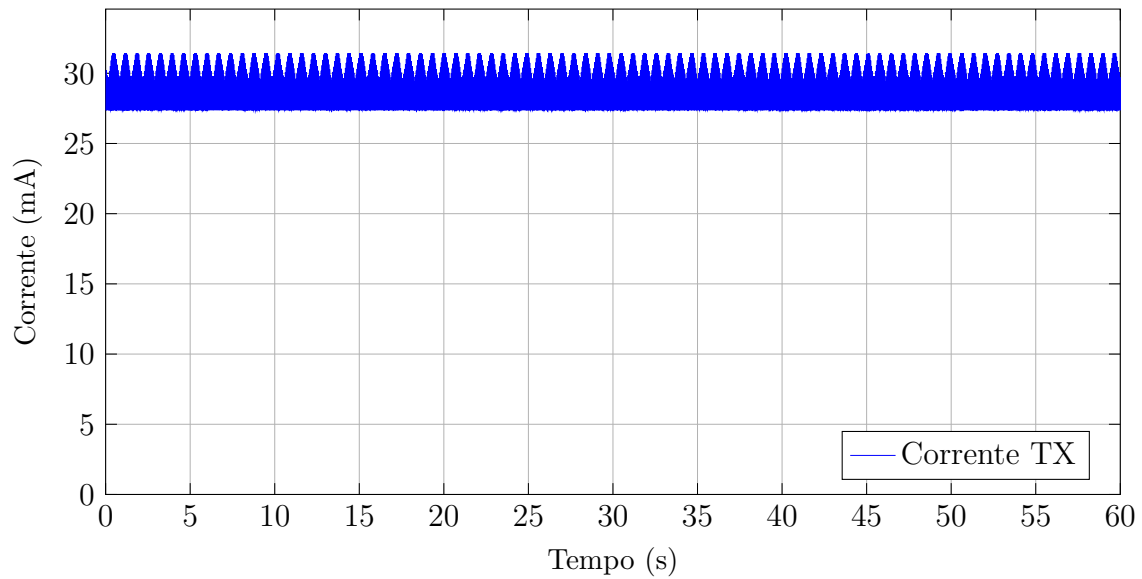
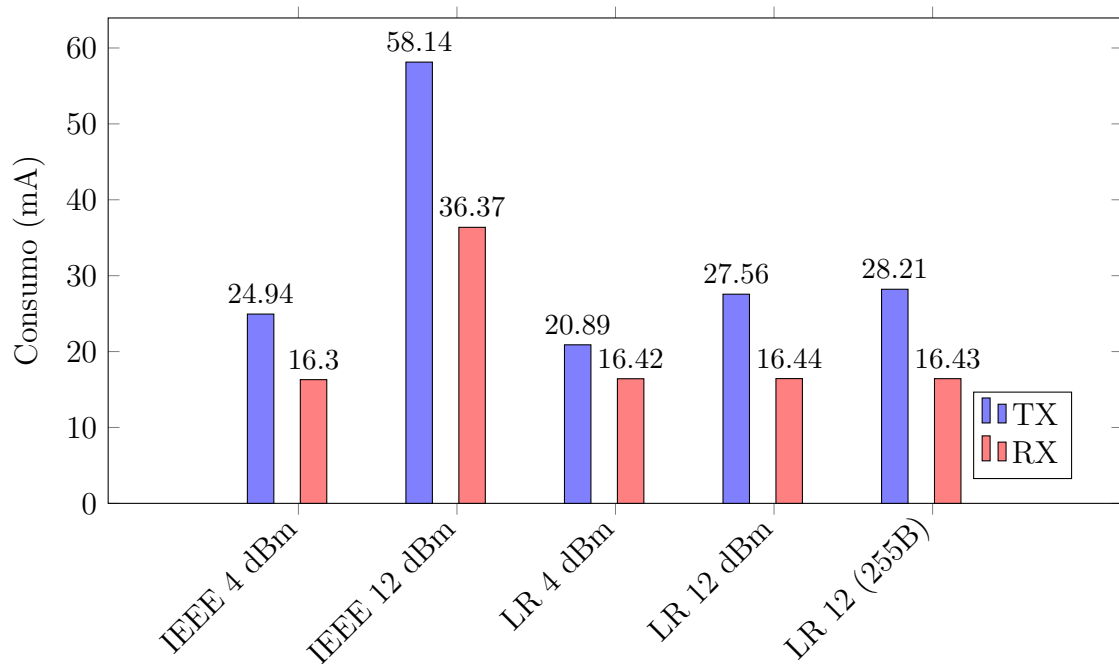


Figura 4.11: Corrente em função do tempo (TX 12 dBm LoRa (255 bytes)).



A partir dos gráficos de consumo, foi gerado um gráfico de barras com o objetivo de facilitar a visualização e análise das informações. A Figura 4.12 ilustra a média de consumo energético de todo o sistema, considerando o uso dos transceptores SX1280 e AT86RF233 em conjunto com o PA/LNA externo. Vale ressaltar que esta média foi obtida durante operações de transmissão e recepção **contínuas** ao longo de um intervalo de 1 minuto.

Figura 4.12: Consumo de corrente na transmissão e recepção.



4.1.2 Fontes Renováveis

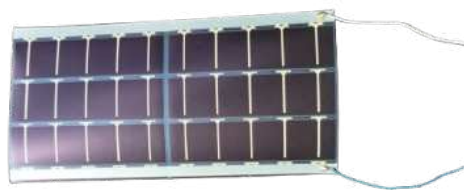
Os testes de consumo energético detalhados na subseção anterior utilizaram como referência uma bateria primária de Lítio Cloreto de Tionila (Li-SOCl_2), modelo ER26500 (tamanho C), com tensão nominal de 3,6 V e capacidade de 9000 mAh.

Nesta etapa, visando a sustentabilidade e a extensão da autonomia do sistema, analisa-se a transição para o uso de painéis solares fotovoltaicos. Considerando que os transceptores IEEE 802.15.4 e LoRa operam na categoria LPWAN e demandam baixa potência, torna-se viável a aplicação de fontes renováveis. O objetivo a seguir é validar a curva de geração e consumo, verificando a viabilidade técnica da substituição da bateria pela célula fotovoltaica na alimentação do módulo sensor.

A Figura 4.13 ilustra o painel selecionado, modelo *MPT3.6-150* da fabricante PowerFilm Inc. Este componente foi projetado para aplicações de baixa potência, destacando-se pela flexibilidade mecânica, baixo peso (2,9 g) e dimensões compactas ($74,0 \times 146,0$ mm), características ideais para sistemas portáteis em ambientes com disponibilidade variável de luz solar (PowerFilm Inc., 2025).

Quanto às especificações elétricas, o painel oferece uma tensão nominal de 3,6 V e corrente de até 150 mA sob condições padrão de teste. A tensão de circuito aberto média (V_{oc}) é de 4,9 V, podendo atingir 5,5 V, enquanto a corrente de curto-circuito (I_{sc}) alcança 128 mA. Mesmo em cenários de baixa luminosidade ($\frac{1}{4}$ da irradiância solar), o dispositivo mantém a tensão de operação em 3,6 V, entregando uma potência de 81 mW com corrente reduzida de 22,5 mA (PowerFilm Inc., 2025).

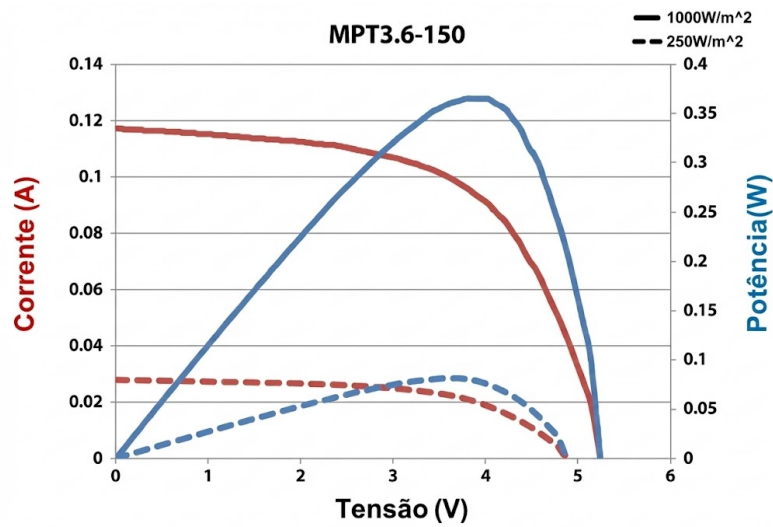
Figura 4.13: Painel fotovoltaico (MPT3.6-150).



Fonte: PowerFilm Inc. (2025).

A curva característica de Tensão (V) $\times$ Corrente (mA) em função da variação da incidência solar é apresentada na Figura 4.14.

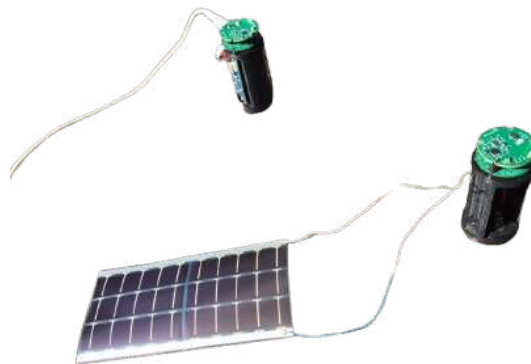
Figura 4.14: Curva do painel MPT3.6-150.



Fonte: Adaptado de PowerFilm Inc. (2025).

Para a integração ao sistema, o painel alimenta o módulo de rádio através de um conversor DC/DC *Buck-Boost* LTC3536EDD#TRPBF. Este regulador aceita tensões de entrada entre 1,8 V e 5,5 V e possui uma corrente quiescente de 800 μ A, sendo capaz de fornecer até 1 A na saída (Analog Devices, 2015). Essa configuração assegura energia suficiente para os transceptores SX1280 ou AT86RF233 (detalhados na Seção 4.1), permitindo a operação contínua do sistema, tanto em transmissão quanto em recepção, desde que haja irradiância solar adequada.

Figura 4.15: Sistema com painel conectado.



Fonte: Autor.

A Figura 4.15 demonstra a montagem experimental, onde o painel foi soldado

diretamente aos terminais de entrada do circuito, substituindo a bateria de 3,6 V.

Para a caracterização do consumo nesta configuração, utilizou-se o *Power Profiler Kit II* (PPK2) da Nordic Semiconductor. A escolha deste equipamento, em detrimento do medidor da STMicroelectronics utilizado anteriormente, deve-se à sua funcionalidade de amperímetro, que permite medir a corrente de entrada sem a necessidade de fornecer tensão, uma vez que a fonte de energia é o próprio painel solar.

Os resultados obtidos durante os testes revelam uma corrente média de 24,84 mA consumida pelo sistema (incluindo o conversor *Buck-Boost* e os componentes ativos). A estabilidade demonstrada ao longo dos testes de operação confirma que, sob condições de irradiância adequadas, o painel é capaz de suprir a demanda energética e manter o sistema operacional.

Na Tabela 4.1, são apresentados os resultados dos testes de comunicação realizados em distâncias de até 100 metros, incluindo as métricas RCV_BYTE, LOSE_BYTE e RSSI. Esses testes foram conduzidos com o transmissor alimentado por um painel fotovoltaico sob irradiância solar total constante. As medições ocorreram na Universidade Federal de Uberlândia, em um local distinto daquele utilizado nos testes com bateria, priorizando uma área com máxima incidência solar. Optou-se por realizar o teste em uma distância reduzida, com passos menores, uma vez que os dados obtidos demonstraram que o sistema alimentado pelo painel fotovoltaico apresenta uma taxa de transmissão equivalente à obtida com alimentação por bateria convencional.

Tabela 4.1: PCB A2 com potência de 4dBm com quadro de 255 bytes (LoRa - painel solar).

Distância (m)	<25	50	100
RCV_BYTE (bytes)	1206915	1062826	866509
LOSE_BYTE (bytes)	0	21893	60926
RSSI (dBm)	-56	-83	-83

4.2 Taxa de dados

As Tabelas apresentadas a seguir sintetizam os dados coletados em campo, considerando as distâncias especificadas na Figura 3.27, o método de coleta de dados descrito na Seção 3.3 e o de consumo descrito na seção 4.1. São reportados os valores de dados recebidos (em bytes por minuto), dados perdidos (em bytes por minuto), a média dos níveis de RSSI, bem como o PDR (*Packet Delivery Rate*), que expressa a proporção entre os dados entregues e aqueles perdidos em cada *frame*.

Além disso, a taxa teórica indica a relação percentual entre os dados efetivamente transmitidos e as taxas máximas de transmissão especificadas para as tecnologias avaliadas, a saber: LoRa (203,12 kbps) e IEEE 802.15.4 (250 kbps). Os demais

Tabela 4.5: PCB A2 com potência de 12dBm com quadro de 115 bytes (LoRa).

Distância (m)	<25	25	50	75	100	125	150	175	200
RCV_BYTE (bytes)	1.094.915	1.034.219	1.033.820	762.248	973.003	954.738	901.686	646.284	303.264
LOSE_BYTE (bytes)	0	13.557	10.300	68.675	33.132	17.435	26.610	56.135	66.253
RSSI (dBm)	-51	-55	-53	-90	-80	-82	-86	-95	-100
PDR (%)	100	98,69	99,00	90,99	96,59	98,17	97,05	91,31	78,15
Taxa Teórica (%)	71,87	67,89	67,86	50,04	63,87	62,67	59,19	42,42	19,91
Consumo TX	27,56mA								
Consumo RX	16,44mA								

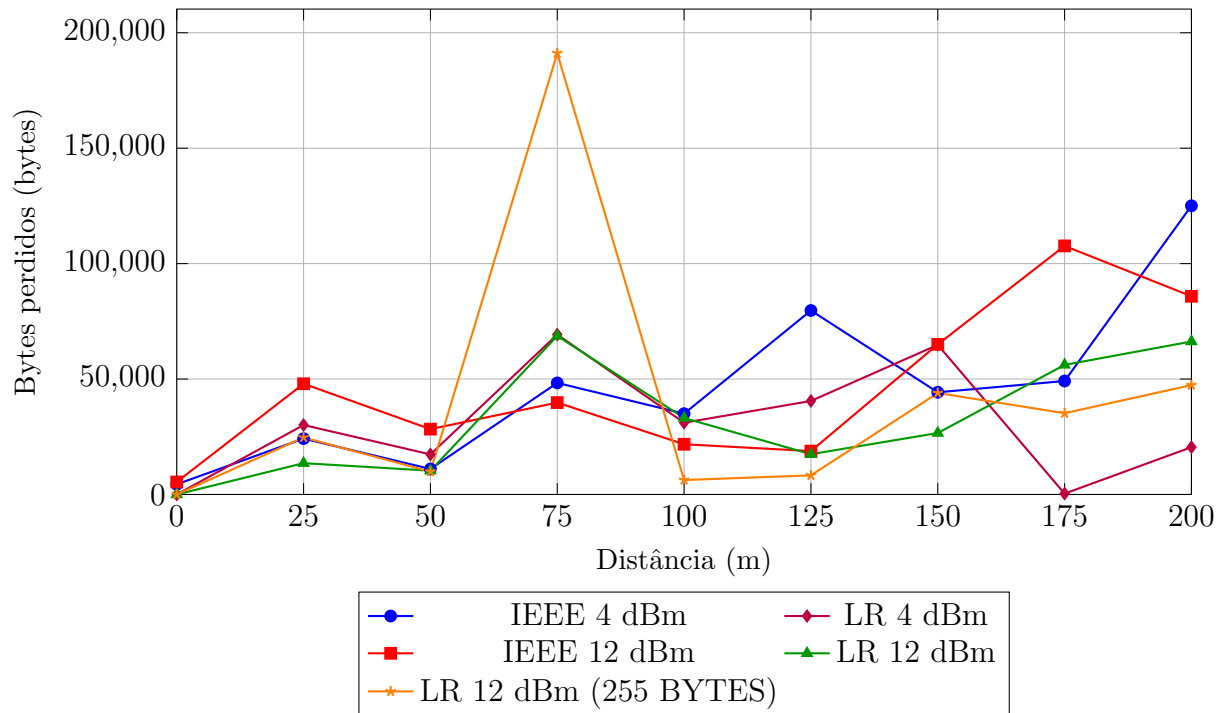
Tabela 4.6: PCB A2 com potência de 12dBm com quadro de 255 bytes (LoRa).

Distância (m)	<25	25	50	75	100	125	150	175	200
RCV_BYTE (bytes)	1.205.130	1.109.549	1.162.351	784.592	1.196.069	1.186.647	1.031.704	418.545	250.000
LOSE_BYTE (bytes)	0	24.691	9.884	191.145	6.256	8.270	43.948	35.196	47.375
RSSI (dBm)	-33	-56	-51	-89	-57	-60	-64	-94	-100
PDR (%)	100	97,77	99,15	75,64	99,48	99,30	95,74	91,59	81,05
Taxa Teórica (%)	79,11	72,83	76,30	51,50	78,51	77,89	67,72	27,47	16,41
Consumo TX	28,21mA								
Consumo RX	16,43mA								

As Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam os dados coletados com o módulo PCB A2 (LoRa), equipado com o transceptor SX1280. A principal diferença entre os experimentos refere-se à potência de transmissão e ao tamanho do quadro utilizado. As duas primeiras tabelas consideram testes realizados com potência equivalente à máxima do IEEE 802.15.4 e com pacotes de 115 bytes, valor previamente justificado ao longo da dissertação. Já a Tabela 4.6 contempla a operação do LoRa explorando suas capacidades máximas, com o quadro e a potência de transmissão configurados nos valores limites suportados pelo transceptor.

A Figura 4.16 apresenta a quantidade de bytes perdidos dentro de cada *frame* recebido durante os experimentos. Essa métrica indica a ocorrência de erros de transmissão que comprometem a integridade dos dados. Por exemplo, ao receber um pacote de 115 bytes, se 3 desses bytes não corresponderem ao conteúdo esperado, eles são contabilizados nesta análise como bytes perdidos. Esse tipo de perda pode estar associado a fatores como atenuação do sinal, interferências no canal de comunicação ou limitações do próprio transceptor em condições de maior distância. A representação gráfica permite identificar tendências de degradação na comunicação conforme a distância aumenta, fornecendo um indicativo direto da robustez do protocolo e da configuração utilizada.

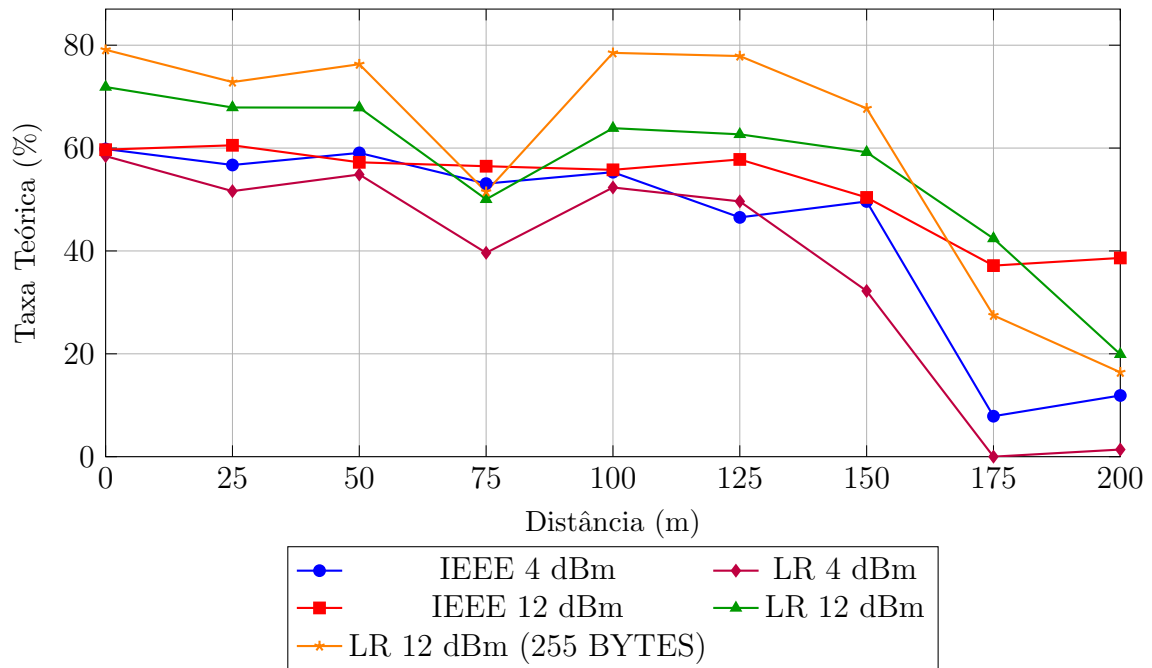
Figura 4.16: Quantidade de bytes perdidos em função da distância.



Vale ressaltar que, na distância de 175 m, para o LoRa de 4 dBm praticamente nenhum dado foi recebido (apenas 93 bytes, conforme Tabela 4.4). Esse comportamento anômalo pode ser atribuído a fatores geográficos ou interferências eletromagnéticas específicas daquele ponto de medição, uma vez que a 200 m o sistema voltou a receber dados. Observação semelhante pode ser feita para a distância de 75 m, onde tanto o LoRa quanto o IEEE 802.15.4 apresentaram quedas de desempenho superiores às observadas em distâncias adjacentes (50 m e 100 m), sugerindo a presença de obstáculos, reflexões ou fontes de interferência localizadas.

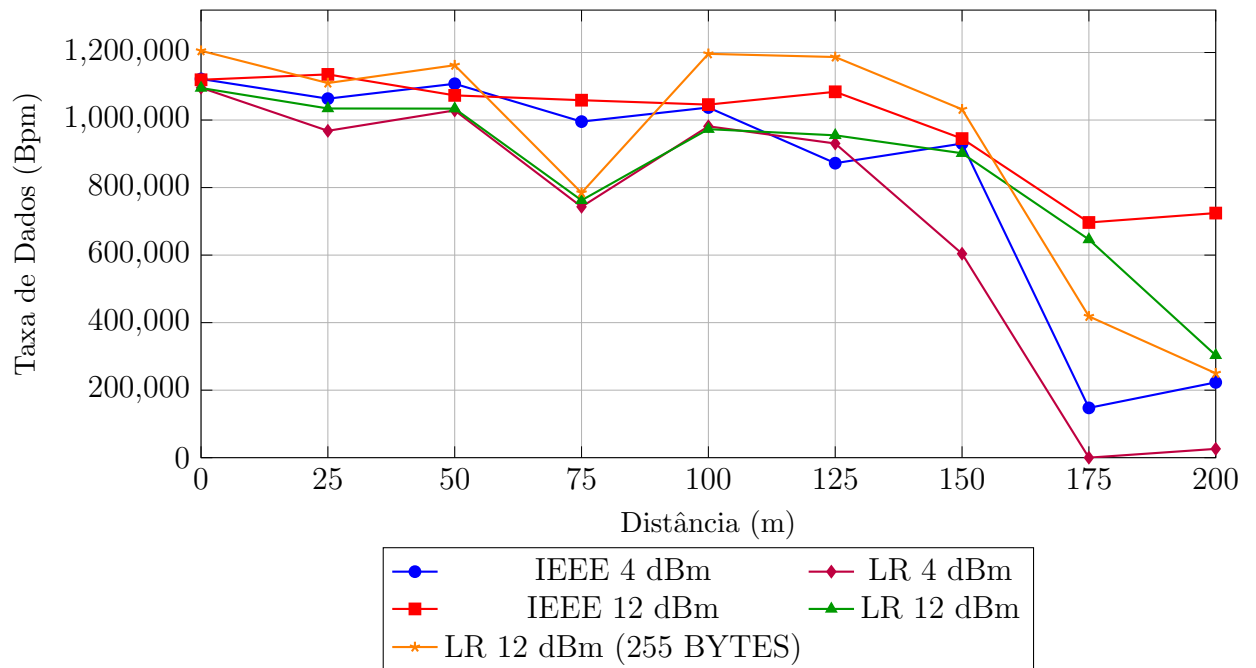
Já a Figura 4.17 representa a eficiência de cada configuração em relação à taxa teórica de dados, expressa em termos percentuais. Por exemplo, considerando as taxas de transmissão em bytes por minuto, o IEEE 802.15.4 possui um valor teórico de 1,875,000 bytes/min, enquanto o LoRa apresenta 1,523,400 bytes/min. A partir desses valores, foi elaborado o gráfico comparativo percentual entre os valores teóricos e os obtidos em campo nas condições descritas na seção 3.4 em função da distância.

Figura 4.17: Comparação da taxa teórica em função da distância.



E por fim, a Figura 4.18 demonstra as taxas de dados efetivas em relação à distância.

Figura 4.18: Comparação das taxas de dados em função da distância.



Capítulo 5

Discussão

Este capítulo apresenta uma análise crítica dos resultados experimentais obtidos no capítulo 4. Os testes realizados com os módulos de comunicação LoRa (SX1280) e IEEE 802.15.4 (AT86RF233), operando na frequência de 2,4 GHz, permitiram a coleta de dados para a avaliação do desempenho de ambos os protocolos em diferentes cenários.

As tabelas e gráficos apresentados anteriormente forneceram informações sobre métricas, como *Packet Delivery Rate* (PDR), intensidade do sinal recebida (RSSI), quantidade de bytes perdidos, eficiência em relação à taxa teórica de transmissão, bem como o consumo energético dos módulos durante operações de transmissão e recepção contínuas. Esses resultados evidenciam o impacto de parâmetros como potência de transmissão, tamanho do quadro e distância entre os módulos na robustez da comunicação e no consumo do sistema.

A partir desses dados, esta seção busca aprofundar a interpretação dos resultados, identificando padrões, correlações e possíveis limitações associadas a cada tecnologia. Além disso, será discutida a aplicabilidade dos módulos analisados em cenários típicos da Internet das Coisas Industrial (IIoT), destacando suas vantagens e desafios quando submetidos a diferentes condições operacionais.

5.1 Desempenho do IEEE 802.15.4

As Tabelas 4.2 e 4.3 destacam o impacto da potência de transmissão sobre o desempenho do IEEE 802.15.4. Quando operando com o PA/LNA externo em modo *BYPASS* (Tabela 4.2), a tecnologia apresentou limitações significativas em distâncias superiores a 150 m. O *Packet Delivery Rate* (PDR) caiu de 95,24% a 66,68% entre 150 m e 175 m, chegando a apenas 43,93% em 200 m. Essa queda evidencia que a potência de 4 dBm não é suficiente para manter uma comunicação com um nível de performance semelhante em distâncias mais elevadas. Além disso, o valor do

RSSI também apresentou degradação acentuada, chegando a -94 dBm nos maiores alcances.

Por outro lado, ao aumentar a potência de transmissão para 12 dBm (Tabela 4.3), observa-se uma melhora expressiva na taxa de entrega de pacotes. Mesmo a 200 m, o PDR se manteve em 88,15%, evidenciando maior robustez na comunicação. Essa melhoria, entretanto, teve como consequência um aumento no consumo de corrente, saltando de 24,94 mA (TX) e 16,3 mA (RX) para 58,14 mA (TX) e 36,37 mA (RX), um aumento de aproximadamente 2,3 vezes na transmissão e 2,23 vezes na recepção. Além disso, o amplificador externo SKY66112-11 adiciona um consumo quiescente de aproximadamente 8 mA, o que contribui para o maior consumo total do módulo IEEE 802.15.4 em relação ao LoRa. Esse *overhead* pode ser uma limitação importante para aplicações que exigem menor consumo energético.

5.2 Desempenho do LoRa

No caso do LoRa, os resultados apresentados nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 evidenciam um desempenho inferior ao IEEE 802.15.4 quando comparados sob as mesmas condições de taxa de dados e potência de 4 dBm. Nessa configuração, o LoRa conseguiu alcançar de forma consistente distâncias de até 150 m, enquanto o IEEE 802.15.4 apresentou maior estabilidade na entrega de dados. Em contrapartida, quando operando a 12 dBm, o LoRa, apesar de demonstrar maior instabilidade em relação ao IEEE 802.15.4, apresentou um desempenho considerável até 175 m, podendo ser considerado tecnicamente comparável ao IEEE 802.15.4 dentro desse intervalo.

É importante ressaltar que o LoRa oferece uma ampla gama de configurações possíveis, variando o *Coding Rate* (CR), a largura de banda (BW) e o *Spreading Factor* (SF). No entanto, a configuração utilizada neste trabalho (SF5, BW1600 e CR4/5) foi escolhida visando maximizar a taxa de dados. Nessa configuração, em potência máxima (12 dBm) e com o quadro de 115 bytes, o *Packet Delivery Rate* (PDR) manteve-se acima de 90% até 175 m, apresentando uma leve queda para 78,15% em 200 m. Quando o tamanho do quadro foi aumentado para 255 bytes (Tabela 4.6), o sistema conseguiu manter PDRs superiores a 95% até 150 m e apresentou taxas de dados consistentemente maiores do que as obtidas com o IEEE 802.15.4 em todas as distâncias até 150 m.

Outro ponto relevante é que, em relação à taxa teórica de transmissão, o LoRa em potência máxima apresentou os melhores resultados até 150 m, mostrando uma boa correlação entre o valor esperado e a quantidade de dados efetivamente entregues.

Contudo, mesmo apresentando um bom desempenho em alcance, o consumo energético do LoRa também aumentou proporcionalmente com o incremento da potência e do tamanho do quadro. Por operarem na mesma faixa de frequência de protocolos amplamente difundidos, como Bluetooth e Wi-Fi, algumas colisões

podem ocorrer, resultando na perda de dados que não são contabilizados como *lose bytes*. Ainda assim, o uso de um quadro maior contribui para mitigar parcialmente esse efeito, por tratar de menos envios durante uma faixa de tempo. Mesmo com o aumento no consumo energético, o LoRa em potência máxima ainda apresentou um consumo significativamente menor do que o IEEE 802.15.4 operando com o PA/LNA externo em 12 dBm. É importante ressaltar que essa diferença é expressiva apenas nessa configuração de potência elevada, onde o amplificador externo do IEEE 802.15.4 eleva substancialmente o consumo total.

5.3 Análise Comparativa

Comparando IEEE 802.15.4 e LoRa, observa-se que:

- Para a mesma condição de potência e tamanho de quadro, o IEEE 802.15.4 apresentou uma estabilidade superior na entrega de dados. O aumento da distância não deteriorou significativamente a sua taxa de transmissão, e em 4 dBm o protocolo mostrou resultados consideravelmente superiores ao LoRa, destacando-se pela confiabilidade e consistência da comunicação.
- O LoRa, por outro lado, demonstrou um consumo energético significativamente mais baixo, como evidenciado na Figura 4.12. Apesar de apresentar desempenho levemente inferior ao IEEE 802.15.4 na configuração de 12 dBm com quadro 115 bytes, o protocolo conseguiu manter ou até superar o nível de transmissão em diversas distâncias quando operando com o quadro de 255 bytes e 12 dBm. Essa performance, embora mais instável, pode ser considerada competitiva com a do AT86RF233 aliado ao PA/LNA externo.
- Em termos de consumo, o LoRa destaca-se como uma solução mais econômica, mesmo em potência máxima, enquanto o IEEE 802.15.4 se sobressai pela robustez e estabilidade na entrega de dados em diferentes distâncias. Essa análise reforça que a escolha entre os dois protocolos depende diretamente do equilíbrio entre alcance, eficiência energética e confiabilidade de transmissão exigido pela aplicação.

Capítulo 6

Conclusões

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a análise de uma solução embarcada para comunicação sem fio, baseada nos protocolos IEEE 802.15.4 e LoRa, operando na frequência *Industrial, Scientific and Medical* (ISM), globalmente aceita em 2,4 GHz. O principal objetivo foi avaliar o desempenho de cada tecnologia em cenários representativos de redes para Internet das Coisas Industrial (IIoT). Foram projetados tanto o *hardware* quanto o *firmware*, com a implementação de dois módulos de comunicação: um utilizando o transreceptor AT86RF233 (IEEE 802.15.4) e outro com o SX1280 (LoRa), ambos integrados a um microcontrolador de baixo consumo energético. Além disso, investigou-se a viabilidade do uso de fontes renováveis, como células fotovoltaicas, para possibilitar uma operação autônoma e sustentável.

Os experimentos em campo permitiram avaliar métricas como *Packet Delivery Rate* (PDR), intensidade de sinal (*RSSI*), taxa teórica de transmissão e consumo energético em diferentes distâncias, potências de transmissão e tamanhos de *buffer*. Os principais resultados obtidos foram:

- O **IEEE 802.15.4**, com pacotes de 115 bytes e potência de transmissão de 4 dBm, apresentou elevada estabilidade e robustez na entrega de dados, com PDRs superiores a 90% até 150 m. Quando a potência foi aumentada para 12 dBm, observou-se uma comunicação ainda mais confiável (PDR acima de 88% a 200 m), porém com aumento significativo no consumo de corrente (58,14 mA em transmissão contínua).
- O **LoRa**, na configuração inicial (4 dBm, 115 bytes), apresentou menor estabilidade, com queda acentuada no PDR em distâncias superiores a 150 m. Contudo, ao operar com potência máxima de 12 dBm e utilizando um *buffer* ampliado (255 bytes), o protocolo manteve PDRs acima de 95% até 150 m e atingiu taxas de dados mais elevadas que o IEEE 802.15.4 em todas as distâncias até esse limite. Esses resultados evidenciam o potencial do LoRa nesta configuração para aplicações que demandam maior volume instantâneo de dados e menor alcance.

- Em termos de eficiência energética, o LoRa apresentou consumo significativamente inferior, variando entre 20,89 mA e 28,21 mA nas configurações testadas, enquanto o IEEE 802.15.4 com PA/LNA externo apresentou consumos até aproximadamente duas vezes maiores. Essa característica é essencial para aplicações alimentadas por baterias ou sistemas de energia solar, como os propostos neste estudo.

Na Tabela 2.9, mostra-se que o LoRa oferece elevada flexibilidade em seus parâmetros (SF, BW e CR), permitindo ajustes que impactam diretamente a taxa de dados e a distância. Neste trabalho, utilizou-se a configuração SF5, BW1600 e CR4/5, priorizando maior taxa de dados, o que resultou em desempenho competitivo em relação ao IEEE 802.15.4 até a distância de 150m, como evidenciado na Figura 4.18, porém ao aumentar o parâmetro de *spreading factor*, em teoria, o LoRa alcançaria distâncias maiores, com taxa de velocidades menores.

Destaca-se ainda que protocolos industriais amplamente utilizados, como WirelessHART e ISA100, baseiam-se no padrão IEEE 802.15.4 (Liu et al., 2018). Os resultados obtidos demonstram que o transceptor LoRa SX1280 apresenta viabilidade para aplicações industriais, mesmo em ambientes com obstáculos típicos de um campus universitário, como edifícios, veículos e estruturas metálicas, apesar das medições terem sido realizadas em *line-of-sight*. Embora o desempenho do LoRa decresça significativamente em distâncias superiores a 175 m, até esse limite o protocolo apresentou resultados comparáveis ao padrão IEEE 802.15.4, confirmando seu potencial para aplicações IIoT, desde que consideradas as especificidades de cada cenário.

Em relação ao uso de fontes renováveis, os resultados demonstraram que o painel fotovoltaico MPT3.6-150 foi capaz de substituir integralmente a bateria sob condições de irradiância solar total durante os testes. Essa substituição garantiu o funcionamento contínuo do sistema transmissor e receptor, mantendo uma taxa de transmissão equivalente à obtida com alimentação por bateria convencional. Tais resultados validam a viabilidade do uso de energia solar para alimentar sistemas de comunicação sem fio em ambientes externos, especialmente em aplicações de Internet das Coisas Industrial (IIoT), onde a autonomia energética é um fator crítico. No entanto, destaca-se que a eficiência do sistema está diretamente relacionada às condições de iluminação, sendo necessário avaliar o desempenho em cenários de menor irradiância para garantir a robustez da solução em diferentes contextos operacionais.

6.1 Trabalhos Futuros

Como perspectivas para trabalhos futuros, propõe-se a avaliação do desempenho dos protocolos em ambientes com obstáculos físicos (*Non-Line of Sight*), de modo a simular condições industriais mais realistas, incluindo, se possível, cenários industriais reais. A exploração de diferentes combinações dos parâmetros do LoRa (SF, BW

e CR), com o objetivo de otimizar o *trade-off* entre taxa de dados, alcance e consumo energético, potencialmente ampliando de forma significativa o alcance do rádio em detrimento da taxa de transmissão. O formato circular das PCBs desenvolvidas oferece flexibilidade para integração de diferentes tipos de antenas, permitindo investigar o impacto de antenas alternativas (*patch*, direcional, omnidirecional de maior ganho) no desempenho dos protocolos. Outra linha de investigação relevante consiste na integração de sensores ao sistema, permitindo a coleta de dados reais e, conseqüentemente, a validação de sua operação em aplicações IIoT completas. Além disso, destaca-se o potencial desenvolvimento de placas de circuito impresso (PCBs) projetadas especificamente para acomodar células fotovoltaicas, possibilitando o carregamento de baterias em sistemas baseados em protocolos LPWAN. Essa abordagem amplia a aplicabilidade do sistema, tornando-o viável para ambientes com irradiância solar variável, uma vez que o carregamento das baterias garante o funcionamento contínuo mesmo em condições de iluminação reduzida.

Referências

- Abdallah, B., Khriji, S., Chéour, R., Lahoud, C., Moessner, K., e Kanoun, O. (2024). Improving the Reliability of Long-Range Communication against Interference for Non-Line-of-Sight Conditions in Industrial Internet of Things Applications. *Applied Sciences*, 14(2):868. <https://doi.org/10.3390/app14020868>
- Alabadi, M., Habbal, A., e Wei, X. (2022). Industrial Internet of Things: Requirements, Architecture, Challenges, and Future Research Directions. *IEEE Access*, 10:66374–66400. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3185049>
- Ali, A. I. e Zorlu Partal, S. (2022). Development and performance analysis of a Zig-Bee and LoRa-based smart building sensor network. *Frontiers in Energy Research*, 10:933743. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.933743>
- Analog Devices (2015). LTC3536: 1 A Low-Noise Buck-Boost DC/DC Converter. Datasheet, Rev. 3536f.
- Corporation, S. (2025). Lr1121 datasheet: Long range, low power, multi-band lora transceiver. Revision 2.1.
- Demertzi, V., Demertzis, S., e Demertzis, K. (2023). An Overview of Privacy Dimensions on the Industrial Internet of Things (IIoT). *Algorithms*, 16(8):378. <https://doi.org/10.3390/a16080378>
- Dervianckine, G. H., Guitton, A., Iova, O., Ning, B., e Valois, F. (2023). Opportunities and Challenges of LoRa 2.4 GHz. *IEEE Communications Magazine*, 61(10):164–170. <https://doi.org/10.1109/MCOM.010.2200566>
- Farahani, S. (2008). *ZigBee wireless networks and transceivers*. Newnes/Elsevier, Amsterdam ; Boston. OCLC: ocn190777991.
- Greengard, S. (2015). *The Internet of Things*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1st edição. <https://doi.org/10.7551/mitpress/10277.001.0001>
- Hernandez, D. M., Peralta, G., Manero, L., Gomez, R., Bilbao, J., e Zubia, C. (2017). Energy and coverage study of lpwan schemes for industry 4.0. In *2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)*, páginas 1–6. <https://doi.org/10.1109/ECMSM.2017.7945893>

- Inc., J. T. (2025). Filtro de frente de banda 2.45 ghz - 2450fm07d0034t. <https://www.mouser.com/ProductDetail/Johanson-Technology/2450FM07D0034T>. Acessado em: 1º de julho de 2025.
- International Telecommunication Union (ITU) (2018). Recommendation itu-r sm.1896-1: Frequency ranges for global or regional harmonization of short-range devices. SM Series: Spectrum Management.
- Islam, M., Jamil, H., Pranto, S., Das, R., Amin, A., e Khan, A. (2024). Future Industrial Applications: Exploring LPWAN-Driven IoT Protocols. *Sensors*, 24(8):2509. <https://doi.org/10.3390/s24082509>
- Johanson Technology Inc. (2023a). *2450AT42A100 - 2.4GHz Ceramic Chip Antenna Datasheet*. Johanson Technology Inc., Camarillo, CA, USA. <https://www.johansontechnology.com/datasheets/2450AT42A100.pdf>.
- Johanson Technology Inc. (2023b). *2450AT42B100 - 2.4GHz Ceramic Chip Antenna Datasheet*. Johanson Technology Inc., Camarillo, CA, USA. <https://www.johansontechnology.com/datasheets/2450AT42B100.pdf>.
- Kolesnikov, V., Neves, M., e Goswami, B. (2022). LoRa-based IoT applications on campus: Experimental demonstrations and performance evaluation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1272(1):012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1272/1/012014>
- Leonardi, L., Lo Bello, L., e Patti, G. (2023). Mrt-lora: A multi-hop real-time communication protocol for industrial iot applications over lora networks. *Computer Communications*, 199:72–86. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.12.013>
- Liu, Y., Candell, R., Kashef, M., e Benmohamed, L. (2018). Dimensioning wireless use cases in industrial internet of things. In *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, páginas 1–4. <https://doi.org/10.1109/WFCS.2018.8402370>
- Liu, Y., Kashef, M., Lee, K. B., Benmohamed, L., e Candell, R. (2019). Wireless network design for emerging iiot applications: Reference framework and use cases. *Proceedings of the IEEE*, 107(6):1166–1192. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2905423>
- LoRa Alliance (2020). Lorawan® l2 1.0.4 specification. Relatório técnico, LoRa Alliance®, Fremont, CA, United States. LoRa Alliance® and LoRaWAN® are licensed trademarks. All company, brand and product names may be trademarks that are the sole property of their respective owners.
- LoRa Alliance® (2022). Lorawan regional parameters rp002-1.0.4. Relatório técnico, LoRa Alliance®, Fremont, CA, United States. LoRa Alliance® and LoRaWAN® are trademarks of the LoRa Alliance, used by permission. All company,

- brand and product names may be trademarks that are the sole property of their respective owners.
- Magrin, D., Capuzzo, M., Zanella, A., Vangelista, L., e Zorzi, M. (2021). Performance Analysis of LoRaWAN in Industrial Scenarios. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(9):6241–6250. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3044942>
- Melo, P. (2017). Introdução ao lpwan. Acesso em: 03/01/2023.
- Microchip Technology Inc. (2023a). *AT86RF215 Datasheet: Dual-band 2.4 GHz and Sub-GHz Transceiver*. Microchip Technology Inc. Último acesso: 2025.
- Microchip Technology Inc. (2023b). *AT86RF233 Datasheet: IEEE 802.15.4 2.4 GHz Transceiver*. Microchip Technology Inc. Último acesso: 2025.
- Misra, S., Roy, C., e Mukherjee, A. (2020). *Introduction to industrial internet of things and industry 4.0*. CRC Press, Boca Raton London New York. <https://doi.org/10.1201/9781003020905>
- Narayan, R., Hoeppe, A., Finnerty, B., Davenport, J., Sharpington, K., Pessin, G., e Unni, S. (2023). Cross-industry insight: Iot market opportunities and top spend use cases. Acesso em: 03/06/2024.
- Nurelmadina, N., Hasan, M. K., Memon, I., Saeed, R. A., Zainol Ariffin, K. A., Ali, E. S., Mokhtar, R. A., Islam, S., Hossain, E., e Hassan, M. A. (2021). A systematic review on cognitive radio in low power wide area network for industrial iot applications. *Sustainability*, 13(1):338. <https://doi.org/10.3390/su13010338>
- Pal, S. e Jadidi, Z. (2021). Analysis of Security Issues and Countermeasures for the Industrial Internet of Things. *Applied Sciences*, 11(20):9393. <https://doi.org/10.3390/app11209393>
- Paul, Y. e Singh, R. (2015). Zigbee technology: A comprehensive review of protocol, applications, and advancements. *IJRDO - Journal of Computer Science and Engineering*, 1(2):1–7. <https://doi.org/10.53555/cse.v1i2.6309>
- PowerFilm Inc. (2025). Mpt3.6-150 classic application series electronic component solar panel datasheet. <https://www.mouser.com/ProductDetail/PowerFilm/MPT3.6-150>. Acesso em 14 de julho de 2025.
- SA, I. (2020). Ieee standard for low-rate wireless networks. *IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)*, páginas 1–800. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9144691>
- Schwab, K. (2016). *A Quarta Revolução Industrial*. Edipro, São Paulo, Brasil.
- Semtech (2017). Wi-fi immunity of lora® at 2.4 ghz. Application Note AN1200.30 Rev 1, Semtech. SX1280 Long Range, Low Power 2.4 GHz Transceiver.

- Semtech (2019). Sx1280 lora connect™ long range low power lora® 2.4ghz rf transceiver with ranging.
- Semtech (2020). *SX1280/SX1281: Long Range, Low Power, 2.4GHz Transceiver with Ranging Capability*. Proprietary & Confidential.
- Semtech Corporation (2024). Lora calculator. Accessed: 2025-07-01.
- Semtech Corporation (2025). Semtech official website. Accessed: 2025-01-30.
- Shi, J., Chen, X., e Sha, M. (2019). Enabling direct messaging from lora to zigbee in the 2.4 ghz band for industrial wireless networks. In *2019 IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII)*, páginas 180–189. <https://doi.org/10.1109/ICII.2019.00043>
- Simka, M. e Polak, L. (2022). On the RSSI-Based Indoor Localization Employing LoRa in the 2.4 GHz ISM Band. *Radioengineering*, 31(1):135–143. <https://doi.org/10.13164/re.2022.0135>
- Skyworks Solutions, Inc. (2023). *SKY66112-11 2.4 GHz Front-End Module for Zigbee®, Thread, and Bluetooth® Applications*. Skyworks Solutions, Inc., Irvine, CA, USA. Datasheet, Document Number: SKY66112-11.
- STMicroelectronics (2020). Getting started with stm32 power consumption optimization. Relatório Técnico AN3364, STMicroelectronics. Accessed: 2026-01-18.
- Texas Instruments (2006). *CC2420 Datasheet: 2.4 GHz IEEE 802.15.4 RF Transceiver*. Texas Instruments. Último acesso: 2025.
- Texas Instruments (2011). *CC2520 Datasheet: 2.4 GHz IEEE 802.15.4/ZigBee RF Transceiver*. Texas Instruments. Último acesso: 2025.
- Vena, M. (2024). The internet of things market grows up. Accessed: 2024-01-15.
- Xu, Z., Tong, S., Xie, P., e Wang, J. (2023). From demodulation to decoding: Toward complete lora phy understanding and implementation. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 18(4). <https://doi.org/10.1145/3546869>
- ZigBee Alliance (2017). ZigBee Specification. ZigBee Document 05-3474-22.