



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DA PARAÍBA - CAMPUS CAMPINA GRANDE
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM TELEMÁTICA

FELIPE FERREIRA BEZERRA DA SILVA

**IMPACTO DAS MODULAÇÕES DO IEEE 802.15.4G NA
QUALIDADE DE COMUNICAÇÃO EM AMBIENTE DE SMART
BUILDING**

Campina Grande

2021

Felipe Ferreira Bezerra da Silva

Impacto das modulações do IEEE 802.15.4g na qualidade de comunicação em ambiente de Smart Building

Monografia apresentada à Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Telemática do IFPB - Campus Campina Grande, como requisito parcial para conclusão.

Orientador: Prof. Ruan Delgado Gomes, D.Sc.

Campina Grande

2021

Felipe Ferreira Bezerra da Silva

Impacto das modulações do IEEE 802.15.4g na qualidade de comunicação em ambiente de Smart Building

Monografia apresentada à Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Telemática do IFPB - Campus Campina Grande, como requisito parcial para conclusão.

Prof. Ruan Delgado Gomes, D.Sc.
Orientador

Professor
Prof. Bruno Jácome Cavalcanti, D.Sc.

Professor
Prof. Jerônimo Silva Rocha, D.Sc.

Campina Grande
2021

Agradecimentos

- A minha família por me dar apoio incondicional durante toda minha vida, principalmente na graduação, nos mais diversos sentidos;
- Ao professores e colaboradores do IFPB por tornarem o campus Campina Grande um ambiente favorável ao florescimento do conhecimento. Em especial os professores que fizeram parte da minha graduação compartilhando seus conhecimentos. E a Lúcio Andrade, técnico do laboratório de Eletrônica Analógica, pelas diversas conversas e por ser um dos melhores professores do campus mesmo sem nunca ter dado uma aula;
- Agradeço também aos amigos que fiz durante a graduação em especial a Henrique Martins e Diego Miranda os quais pude contar a todo momento para as mais diversas situações;
- Aos diversos amigos que fiz na vida por sempre me darem ouvidos ao reclamar sobre a a vida, o universo e tudo mais, mesmo, as vezes, sem entender sobre o que eu estava falando. Em especial Djhonathan Pimentel, Danillo Cavalcante, João Dantas e Stefano Tumbiolo, Mariana Hage e Fernanda Andrade por serem pessoas com extrema paciência e me suportarem.
- Aos discentes e docentes dos laboratórios GComPI e Assert por me ajudarem e apoiarem nos projetos e monitorias realizadas.
- Reforço os agradecimentos aos professores da banca avaliadora, Jerônimo Silva e Bruno Jácome, por tornarem este trabalho muito melhor do que ele jamais poderia ter sido sem as suas correções. E a Ruan Delgado, professor orientador, por direcionar o trabalho e me fazer entender que, às vezes, é bem melhor criar seu próprio código do que usar bibliotecas prontas.

*“Transmita o que aprendeu. Força, maestria.
Mas fraqueza, insensatez, fracasso também.
Sim, fracasso acima de tudo.
O maior professor, o fracasso é.”
(Yoda - Star Wars: Os Últimos Jedi)*

Resumo

A Internet das Coisas possibilita uma forma de registrar nos mínimos detalhes tudo ao seu redor, como variações de temperatura em locais de uma cidade, bem como prever se uma pessoa pode ou não ter problemas cardíacos a partir de sensores em seu corpo. A comunicação via rádio é uma solução para a implementação de sistemas IoT, porém este tipo de comunicação apresenta diversos desafios intrínsecos à sua utilização. Este trabalho se propõe a estender trabalhos anteriores, realizados em ambientes industriais e averiguar como a tecnologia de comunicação sem fio IEEE 802.15.4g Wi-SUN age em um ambiente predial, tendo em vista os diversos problemas que este tipo de ambiente causa em propagação de sinais de rádio. Para analisar, experimentalmente, o comportamento da tecnologia, foi implementada uma rede sem fio, na qual os dispositivos realizam cerca de 540 transmissões por hora, e os dados de suas transmissões foram armazenados e utilizados para analisar o desempenho da rede, a partir de parâmetros como taxa de entrega de pacotes e intensidade do sinal recebido. Como principal contribuição, este trabalho apresenta uma avaliação, em um ambiente real, do padrão IEEE 802.15.4g, mostrando como as particularidades das diferentes modulações são afetadas no ambiente predial. Como contribuição adicional, este trabalho cria e disponibiliza um conjunto de dados que podem ser utilizados por outros pesquisadores a fim de estudar e implementar técnicas de diversidade de modulação, possibilitadas graças aos diferentes esquemas de modulação disponíveis no 802.15.4g Wi-SUN.

Palavras-chaves: IEEE 802.15.4g Wi-SUN. Redes Sem Fio. Internet das Coisas.

Abstract

The Internet of Things provides a way to record everything around you in the smallest details, like the temperature variations in city locations, as well as predict whether or not a person may or may not have heart problems from sensors in their body. Radio communication is a solution for the implementation of IoT systems, however this type of communication presents several intrinsic challenges to its use. This work proposes to extend previous works, carried out in industrial environments, and to find out how the IEEE 802.15.4g Wi-SUN wireless communication technology acts in a building environment, considering the various problems that this type of environment causes in propagation radio signals. To analyze the behavior of the technology, a wireless network was implemented, in which the devices perform about 540 transmissions per hour, and the data of their transmissions were stored and used to analyze the performance of the network, using parameters such as Packet Delivery Rate and Received Signal Strength Indication. As a main contribution, this work presents an assessment, in a real environment, of the IEEE 802.15.4g standard, showing how the particularities of the different modulations are affected in the building environment. As an additional contribution, this work creates and makes available a dataset that can be used by other researchers in order to study and implement modulation diversity techniques, made possible thanks to the different modulation schemes available in 802.15.4g Wi-SUN.

Key-words: IEEE 802.15.4g Wi-SUN. Wireless Networks. Internet of Things.

Lista de ilustrações

Figura 1 – RSSF - Topologia Estrela	11
Figura 2 – Tecnologias de Redes Sem Fio	15
Figura 3 – Camada Física e Camada de Enlace do Modelo OSI	17
Figura 4 – Esquema de Modulação FSK	24
Figura 5 – Esquema de Modulação FSK	24
Figura 6 – Sub-Portadoras Sobrepostas Ortogonalmente	25
Figura 7 – Prédio dos Professores, Campus Campina Grande.	28
Figura 8 – Visão Geral da Rede.	29
Figura 9 – Exemplo de Posicionamento dos Dispositivos Tx.	29
Figura 10 – Ciclo de Envio de Mensagens.	30
Figura 11 – Dados do experimento.	34
Figura 12 – Valores de PDR para cada piso.	36

Lista de tabelas

Tabela 1 – Configurações utilizadas de cada modulação.	32
Tabela 2 – Primeiro Piso	33
Tabela 3 – Segundo Piso	35
Tabela 4 – Terceiro Piso	35
Tabela 5 – Quarto Piso	36

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa e Relevância do Trabalho	13
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	Metodologia	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Classificação de Redes: Escala de Abrangência	15
2.1.1	Redes Sem Fio Pessoais - WPAN	15
2.1.2	Redes Sem Fio Locais - WLAN	16
2.1.3	Redes Celulares de Telefonia e Dados	16
2.1.4	Redes de Longa Distância com Baixo Consumo Energético - LPWAN	16
2.2	Modelo de Camadas OSI	17
2.2.1	Camada Física	17
2.2.2	Camada de Enlace	19
2.3	Problemas da Comunicação Sem Fio	19
2.3.1	Ruído	20
2.3.2	Interferência	20
2.3.3	Propagação por Múltiplos Caminhos	21
2.3.4	Sombreamento	21
2.4	Padrões e tecnologias de comunicação para redes LPWAN	21
2.4.1	LoRa	22
2.4.2	NB-IoT	22
2.4.3	SigFox	22
2.4.4	IEEE 802.15.4	23
2.4.5	Emenda IEEE 802.15.4g	23
2.4.5.1	SUN-FSK	23
2.4.5.2	SUN-OQPSK	23
2.4.5.3	SUN-OFDM	25
2.4.5.4	Diversidade de Modulação	25
2.5	Parâmetros para Avaliação da Confiabilidade do Enlace Sem Fio	26
2.5.1	RSSI	26
2.5.2	PDR	26
2.5.3	CCA	26

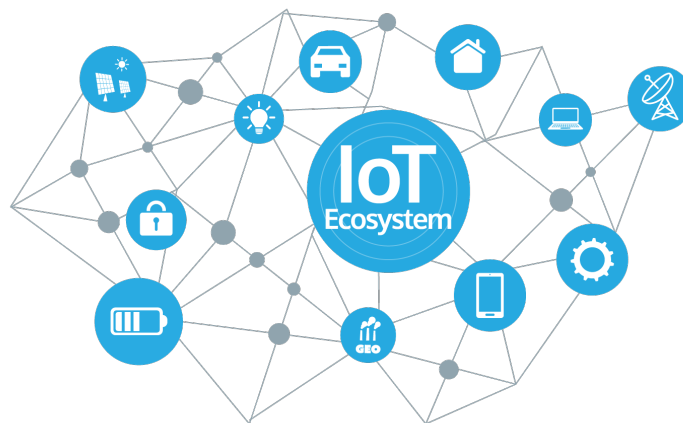
2.6	Trabalhos relacionados	27
3	EXPERIMENTO	28
3.1	Visão Geral	28
3.2	OpenMote B	29
3.3	Transmissão dos dados	30
3.4	Recepção e Persistência dos dados	31
4	RESULTADOS	33
4.1	Dados Obtidos	33
4.2	Análise dos dados	33
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	37
	REFERÊNCIAS	38

1 Introdução

A Internet das Coisas, mais conhecida pelo seu acrônimo em inglês IoT (*Internet of Things*), foi cunhada pelo engenheiro britânico Kevin Ashton no final dos anos 1990 onde ele, trabalhando para a empresa multinacional P&G (Procter & Gamble), pensou na possibilidade de que os produtos da empresa estivessem munidos de identificadores e capazes de estabelecer comunicação através da Internet, que na época estava se estabelecendo, criando assim uma rede em que as coisas estivessem conectadas [1]. Assim, os computadores se tornariam capazes de rastrear e identificar tudo, podendo reduzir desperdícios, minimizar custos e identificar o momento certo quando substituir ou reparar um produto [2].

IoT, como a interconexão de dispositivos, representada na Figura 1, vem ganhado força ao longo dos anos, graças ao estudo, prototipação e desenvolvimento de diversos protocolos e tecnologias. Os pontos chave para o seu desenvolvimento foram a miniaturização de processadores e sensores; melhoramento e otimização do uso de baterias; definição de novos protocolos de rede e aumento da robustez de protocolos de comunicação sem fio.

Figura 1 – RSSF - Topologia Estrela



Fonte: copiada de [3]

Atualmente há diversas aplicações de IoT, há implementações em larga escala como cidades inteligentes conforme descrito em [4], como em Santander na Espanha onde foram implementados por toda a cidade diversos nós com múltiplos sensores, afim de disponibilizar uma plataforma de testes. Há também aplicações de *smart campus* como a apresentada em [5] com uma rede de sensores sem fio para verificar a qualidade do ar. Há aplicações de saúde como em [6], com coleta e análise em tempo real de informações de pressão sanguínea e massa corporal do paciente, para verificar a probabilidade do paciente

ter um evento de insuficiência cardíaca, utilizando técnicas de aprendizado de máquina.

A implementação de uma aplicação IoT necessita de uma rede de nós sensores distribuídos, geralmente conectados a um nó central, conhecido como nó *gateway*, que tem por finalidade encaminhar os dados coletados para processamento. Para tal implementação existe duas abordagens clássicas: conexões cabeadas entre os nós da rede e a utilização de redes sem fio [7]. Como vantagem em relação às redes sem fio, as conexões cabeadas apresentam maior confiabilidade na conexão. Em contrapartida, a utilização de redes sem fio se destaca, em relação às redes cabeadas, nos quesitos de flexibilidade, custo de implantação, facilidade e rapidez na implementação e na manutenção [8].

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) se destacam na implementação de aplicações IoT, porém, há desafios para uma implementação robusta de comunicações sem fio, pois o meio de transmissão é caótico e pouco confiável. Interferências, ruídos, sombreamento e propagação por múltiplos percursos no meio podem ocasionar altas taxas de perda de pacotes e alta latência [7].

Para contornar os desafios da comunicação sem fio, padrões e tecnologias foram desenvolvidos. Um dos principais órgãos na padronização em telecomunicações é o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, mais conhecido pela sigla IEEE. Por exemplo, para redes locais, o Wi-Fi, baseado no padrão IEEE 802.11, se tornou uma tecnologia confiável que pode apresentar altas taxas de transmissão com baixa latência. Em redes de curto alcance, o Bluetooth, baseado no padrão IEEE 802.15.1, se tornou comum na vida das pessoas com seu uso para conexão de fones de ouvido, teclados e mouses sem fio. Estes padrões, apesar de bem estabelecidos no mercado, possuem alguns problemas para o desenvolvimento de RSSF, que geralmente requerem múltiplos dispositivos espalhados e, principalmente, sem acesso fácil a uma fonte contínua de energia.

Tendo em vista este problema energético, alguns padrões foram desenvolvidos para oferecer uma comunicação de qualidade, focando em eficiência energética para a utilização de baterias. Iniciativas privadas desenvolveram, por exemplo, o SigFox¹ e LoRa². O IEEE desenvolveu o padrão 802.15.4 e o aprimorou ao longo dos anos com adição de emendas, que foram responsáveis pelo desenvolvimento de aplicações como ZigBee³ e Wi-SUN⁴. A *3rd Generation Partnership Project* (3GPP)⁵ Projeto de Parceria de Terceira Geração em tradução livre, desenvolveu a tecnologia NB-IoT, uma versão simplificada da tecnologia de comunicação celular LTE, *Long Term Evolution* (Evolução de Longo Prazo), que visa utilizar a mesma infraestrutura, porém com melhor eficiência energética. Estas tecnologias

¹ <https://www.sigfox.com/en>

² <https://lora-alliance.org/>

³ <https://zigbeealliance.org/>

⁴ <https://wi-sun.org/>

⁵ <https://www.3gpp.org/>

podem ser utilizadas para a implementação de redes classificadas como Redes de Longo Alcance e Baixo Consumo Energético.

1.1 Justificativa e Relevância do Trabalho

Em [9], os autores implementaram uma RSSF utilizando as modulações propostas na emenda “g” do padrão IEEE 802.15.4. O experimento foi realizado em um cenário industrial, durando 99 dias e gerou um conjunto de dados que foi utilizado para averiguar a confiabilidade da rede e, nesse caso, propor mecanismos de diversidade de modulação que, como mostrado em [10], podem melhorar a taxa de entrega de pacotes.

O cenário industrial apresenta diversos problemas, principalmente relacionados à interferência e propagação por múltiplos caminhos. Diferentes ambientes possuem diferentes problemas em relação a comunicação via rádio. Então, este trabalho tem como objetivo analisar a comunicação sem fio de transceptores do padrão IEEE 802.15.4g SUN em um ambiente predial, também denominado neste texto como *Smart Building*, cuja principal fonte de problemas para a comunicação é a falta de linha de visada. Devem ser estudadas as características da RSSF a partir da verificação da taxa de entrega de pacotes e verificar sua viabilidade de implementação com a tecnologia utilizada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Coletar e analisar as informações das transmissões de uma RSSF realizadas com as modulações definidas no padrão IEEE 802.15.4g em um cenário de *smart building*.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Implementar uma RSSF utilizando transceptores que implementam as modulações do IEEE 802.15.4g;
- Coletar os dados das transmissões realizadas;
- Avaliar o desempenho da rede implementada, a partir da análise dos dados coletados.

1.3 Metodologia

Para alcançar tais objetivos, foram realizados os seguintes passos:

- Estudo e implementação dos dispositivos: Entender o funcionamento dos dispositivos que utilizam o código-fonte presente em [11]. E a realização de alterações no código-fonte para a aplicação proposta;
- Desenvolvimento do *gateway*: Criar *scripts* para utilização de um computador como gateway da rede, capaz de coletar os dados das transmissões e persisti-los em um banco de dados;
- Execução do experimento: Distribuir os nós transmissores pelo prédio, conectar os nós receptores ao gateway e coletar dados;
- Análise dos resultados: Com os dados gerados, realizar sua análises, que é apresentada no Capítulo 4.

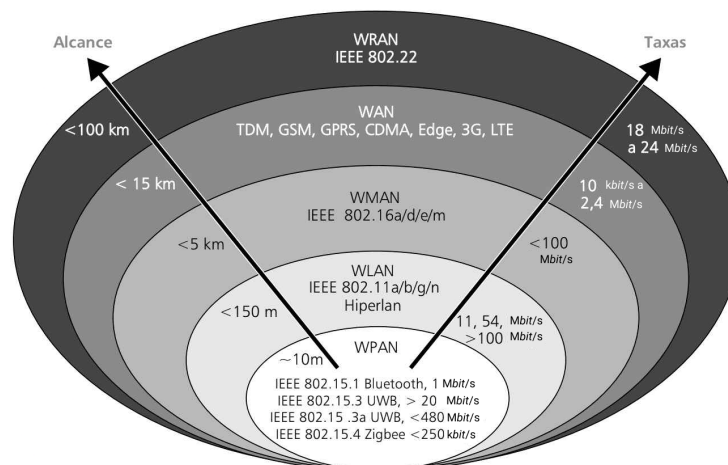
2 Fundamentação Teórica

Nesta Seção são abordados os conceitos fundamentais utilizados neste trabalho e necessários para melhor entendimento do experimento.

2.1 Classificação de Redes: Escala de Abrangência

Segundo Tanenbaum, em [12], redes de telecomunicações são classificadas, comumente, de acordo com sua escala de abrangência. A seguir são apresentadas algumas das classificações de redes sem fio (Figura 2) mais relevantes para o escopo deste trabalho.

Figura 2 – Tecnologias de Redes Sem Fio



Fonte: adaptada de [13].

2.1.1 Redes Sem Fio Pessoais - WPAN

Inicialmente estas redes foram definidas para apresentar alcance limitado com a principal função de facilitar a conectividade de dispositivos periféricos ao computador ou telefone celular por uma conexão sem fio. O padrão IEEE 802.15 especifica a arquitetura destas redes sem fio, também denominadas *piconets*. A principal tecnologia comercial de redes WPAN é o Bluetooth (padrão IEEE 802.15.1).

O conceito de redes WPAN foi expandido para designar qualquer tipo de rede sem fio que atua em área restrita interconectando dispositivos, periféricos, atuadores ou um conjunto de sensores, geralmente com a capacidade de se auto-organizarem. E a partir dessa expansão é possível aplicações como redes de sensores sem fio, sistemas anticolisão e de condução automática em veículos, automação industrial, prédios inteligentes

e monitoramento de pacientes. Geralmente, estas redes utilizam a tecnologia ZigBee (IEEE 802.15.4) para a implementação da comunicação de rádio [13].

2.1.2 Redes Sem Fio Locais - WLAN

São redes com a finalidade de conectar computadores domésticos, de escritórios ou prédios em uma rede privada. Nesse tipo de rede, a tecnologia Wi-Fi (padrão IEEE 802.11) se tornou popular sendo adotada praticamente em todo computador e dispositivos móveis como *smartphones* e *tablets*.

No padrão IEEE 802.11 são utilizadas duas faixas de frequência não licenciadas ISM, *Industrial, Scientific and Medic* (Industrial, Científica e Médica), em torno de 2,4 GHz e 5 GHz. Esta última faixa de frequência foi adicionada para garantir maiores taxas de transmissão. Como utiliza uma faixa de frequência não licenciada, é comum ocorrer interferência com outras redes Wi-Fi e com redes formadas por outras tecnologias que atuam na mesma faixa de frequências como Bluetooth e ZigBee [13].

2.1.3 Redes Celulares de Telefonia e Dados

Essas redes abrangem diversos sistemas de telefonia conectados e ganharam bastante popularidade nas últimas décadas devido, principalmente, à redução de custos e aumento nas taxas de transmissão oferecidas pelas operadoras. Exemplos mais recentes de telefonia celular são GSM, *Global System for Mobile Communications* (Sistema Global de Comunicações Móveis), EDGE, *Enhanced Data Rates For GSM Evolution* (Taxas de Dados Ampliadas para a Evolução do GSM), e LTE que são tecnologias da segunda, terceira e quarta geração (2G, 3G e 4G) de telefonia celular, respectivamente.

Como demonstrado na Seção 2.4, há aplicações que utilizam infraestrutura GSM e LTE para aplicações de RSSF [13].

2.1.4 Redes de Longa Distância com Baixo Consumo Energético - LPWAN

Em algumas aplicações IoT há requisitos muito específicos como atuação por uma grande extensão, dispositivos que possam passar longos períodos utilizando baterias e um bom custo benefício. Tecnologias como ZigBee e Bluetooth não apresentam grande área de cobertura. Aplicações de telefonia celular, apesar de grandes áreas apresentam alto consumo energético. Então, aplicações IoT impulsionaram a criação de novos padrões e tecnologia para um novo tipo de rede denominada de redes de longa distância com baixo consumo energético ou *Low Power Wide Area Network* (LPWAN).

Dispositivos que implementam redes de baixo consumo energético ganharam popularidade na indústria e nas comunidades de pesquisa pois estabelecem comunicação sem

fio de longas distâncias, de centenas de metros até poucos quilômetros, com baterias que podem durar anos com uma única carga [14].

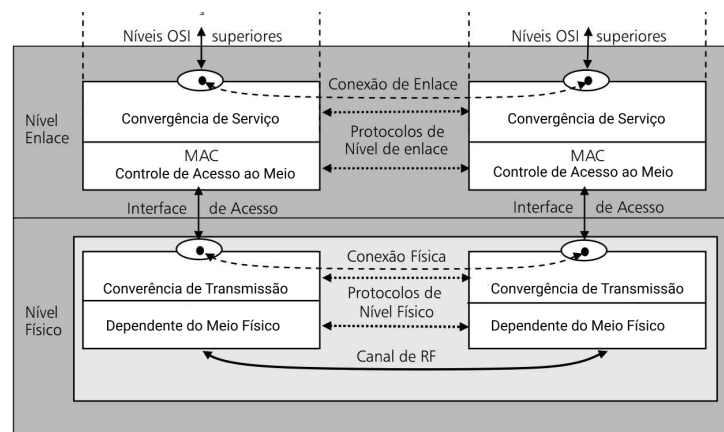
A utilização desse tipo de rede se tornou fundamental para a implementação de RSSF, oferecendo confiabilidade e baixo custo de implantação e manutenção. Na Seção 2.4 são apresentados alguns dos principais padrões e tecnologias utilizadas nessas redes.

2.2 Modelo de Camadas OSI

O modelo de referência para Interconexão de Sistemas Abertos, *Open Systems Interconnection*, ou apenas modelo OSI, foi um passo para a padronização de redes de computadores. No modelo há sete camadas com funções bem definidas. A comunicação entre camadas é abstraída e se dá através de interfaces, ou seja, uma camada não tem acesso direto aos detalhes internos camadas subjacentes, a informação chega até ela no padrão pré-definido.

Para este trabalho é mais relevante a apresentação das camadas 1 e 2 (Figura 3) física e de enlace, respectivamente, e suas subcamadas do modelo OSI de forma generalizada de acordo o apresentado por Tanenbaum em [12] e por Rochol em [13].

Figura 3 – Camada Física e Camada de Enlace do Modelo OSI



Fonte: adaptada de [13].

2.2.1 Camada Física

A camada física, de acordo [12], é uma abstração do meio físico de comunicação por onde trafegam os sinais do transmissor para o receptor definindo que sinais utilizar para os *bits* 0 e 1; a duração de um bit; se a transmissão pode ser realizada nos dois sentidos ao mesmo tempo ou um de cada vez. De acordo Rochol em [13] são consideradas duas sub-camadas: de convergência de transmissão do nível físico e a sub-camada dependente do meio.

Na sub-camada de convergência de transmissão é feita a codificação de canal, para obter confiabilidade na transmissão dos dados mesmo considerando as características problemáticas do canal de rádio frequência. Algumas funções implementadas nessa camada são descritas a seguir:

- Embaralhamento do fluxo de *bits*:

Garante que os *bits* 1 e 0 tenham a mesma probabilidade antes de serem enviados para transmissão. Ao realizar essa função, a utilização do canal é otimizada.

- Controle de erros:

Utilização de técnicas para detectar e corrigir erros da transmissão. Por exemplo, adicionando alguns *bits* à mensagem original e utilizá-los para detectar se algum *bit* da mensagem original foi modificado, podendo ser necessária uma retransmissão ou corrigir a mensagem recebida.

- Entrelaçamento de *bits*:

Uma técnica que utiliza algoritmos de distribuição temporal dos *bits* da mensagem para espalhar a concentração de erros ao longo da sequência de *bits*. Tornando mais eficiente a utilização das técnicas de controle de erros. Esses algoritmos são pré-definidos no transmissor e no receptor.

A segunda sub-camada da camada física corresponde às funcionalidades do transceptor de dados que depende do meio em que são implementadas. Transceptores mais simples, como modems ou regeneradores de sinais, utilizam protocolos e modulações para a transmissão/recepção do sinal mais simples, como a codificação por pulsos. Alguns transceptores mais complexos, que permitem maiores taxas de transmissão, múltiplos usuários e maior robustez a efeitos negativos no sinal rádio, possuem sistemas, geralmente com vários subsistemas mais complexos utilizando diversos esquemas de modulação ao mesmo tempo, por exemplo, o esquema de modulação OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência).

Há várias técnicas de transmissão e recepção de dados, porém, é possível agrupá-las em três classes, que são apresentadas a seguir em ordem crescente de complexidade:

1. Técnicas de codificação por pulsos (ou modulação de banda base);
2. Processos de modulação de um ou mais parâmetros de portadora única;
3. Processo de modulação e transmissão utilizando múltiplas portadoras. Essas portadoras podem ser caracterizadas no domínio da frequência, utilizando múltiplas portadoras do tipo OFDM, Multiplexação por Divisão em Frequências Ortogonais. Ou podem ser caracterizadas no domínio do tempo como ocorre no CDMA, Acesso

Múltiplo por Divisão em Código, em que diferentes códigos ortogonais são aplicados simultaneamente sobre uma portadora digital gerando vários espectros ao redor de uma única portadora analógica, técnica também conhecida como espalhamento espectral.

2.2.2 Camada de Enlace

A principal função implementada nessa camada, segundo Rochol em [13], é aumentar a garantia de que os *bits* trafeguem na camada física livre de erros de transmissão. Essa camada faz com que o transmissor separe os dados e transmita cada parte de forma sequencial. Caso alguma dessas partes, ou quadros, da mensagem apresente erro, então pode ser retransmitida. Na camada de enlace há duas sub-camadas: de convergência de serviço e de acesso ao meio.

A sub-camada de convergência de serviço estabelece os requisitos de QoS, *Quality of Service* (Qualidade de Serviço), da aplicação, como taxa de transmissão, atraso máximo de pacotes e taxa mínima de perda de pacotes.

A sub-camada de controle de acesso ao meio, ou *Medium Access Control* (MAC), define como é feito o acesso ao meio de comunicação e, dependendo do protocolo utilizado, quem tem prioridade de utilização do meio. Há, principalmente, duas famílias de protocolos MAC utilizados em comunicações sem fio, ALOHA e CSMA, Acesso Múltiplo com Detecção de Portadora (*Carrier Sense Multiple Access*).

O protocolo ALOHA define que os dados dos usuários devem ser transmitidos, mesmo que cause colisões de pacotes, porém, ao transmitir, o usuário deve sensoriar o canal durante a transmissão e retransmitir a mensagem, caso seja percebido, por parte do transmissor, se houve colisão ou se o receptor da mensagem não confirmou o seu recebimento. Uma variação desse protocolo, chamado de *Slotted ALOHA* foi desenvolvido com a intenção de diminuir a probabilidade de colisão dividindo o tempo em intervalos discretos de tempo, *time slots*, exigindo sincronia entre todos os integrantes da rede para transmitir apenas nos intervalos certos.

O protocolo CSMA evita colisão de pacotes no canal. Para tal o transmissor tem que sensoriar o canal antes de realizar uma transmissão. Caso o canal esteja livre, a transmissão é realizada. Caso o canal esteja ocupado, o transmissor espera até que esteja livre para transmitir ou transmite após um intervalo aleatório.

2.3 Problemas da Comunicação Sem Fio

Redes sem fios apresentam algumas vantagens em relação às redes cabeadas, por exemplo, facilidade de implementação e manutenção, flexibilidade, custos reduzidos e

rapidez de implementação. Porém, o meio por onde as ondas de rádio são propagadas apresenta diversos desafios. O canal de radiofrequência pode apresentar, além do sinal do transmissor, sinais de estações transmissoras próximas, resíduos de transmissões passadas ou resíduos de efeitos térmicos do próprio transmissor, além, é claro, da forma como as ondas eletromagnéticas se propagam no meio, que pode ser um problema para recepção do sinal.

A seguir são apresentados alguns dos principais problemas para a recepção de sinais de rádio.

2.3.1 Ruído

Em [13] são apresentados dois tipos de ruídos: ruído branco (ou ruído térmico) e ruído impulsivo. Ruído térmico é caracterizado como a agitação molecular nos condutores e dispositivos físicos que realizam o processamento do sinal até a antena. Este tipo de ruído é impossível de ser eliminado completamente e limita o canal de radiofrequência; Ruído impulsivo é gerado por descargas atmosféricas ou equipamentos elétricos, que não são dispositivos de comunicação via rádio, próximos ao transmissor ou receptor, é imprevisível e de difícil controle, por exemplo, máquinas industriais e fornos micro-ondas, este que gera ruídos na faixa de 2,4 GHz. Este tipo de ruído gera sequências de erros na transmissão, mecanismos de controle de erro dificilmente irão corrigir devido a alta concentração de erros.

2.3.2 Interferência

Interferência, segundo Rappaport em [15], é o maior fator limitante no desempenho de sistemas de rádio. Há dois tipos principais de interferência geradas pelo próprio sistema de rádio que são a interferência co-canal e a interferência de canal adjacente. Há também a interferência externa, gerada por dispositivos de comunicação que utilizam das mesmas faixas de frequência utilizados pelo sistema, por exemplo, na faixa ISM em torno das frequências 2,4 GHz há uma sobrecarga pois as tecnologias como Bluetooth e Wi-Fi operam nesta faixa. Interferência co-canal, segundo [13], é gerada, principalmente, em sistemas com múltiplos usuários que utilizam o mesmo canal. No caso de sistemas telefônicos, isto pode resultar em ligações cruzadas, em que usuários podem receber as informações de outras chamadas [15]. A interferência de canal adjacente ocorre quando uma transmissão é realizada próxima de um receptor que está recebendo sinal de um outro transmissor. A recepção é prejudicada podendo se tornar inviável durante a transmissão do transmissor próximo ao receptor [15].

2.3.3 Propagação por Múltiplos Caminhos

Segundo Rochol em [13], ao ser irradiada pela antena, a onda eletromagnética do sinal de rádio sofre inúmeras reflexões em obstáculos ao longo da sua trajetória até chegar ao receptor. Esse fenômeno é denominado de propagação por múltiplos caminhos. Este fenômeno explica três tipos de distorções observadas na transmissão por ondas de rádio: desvanecimento, espalhamento de atraso e espalhamento de Doppler.

O desvanecimento é causado quando várias cópias de um sinal, que percorreram vários caminhos, chegam à antena receptora com diferenças de fase, que fazem se somarem de forma destrutiva, causando uma recepção de má qualidade do sinal original, esse efeito pode também gerar áreas de sombra do sinal. Os diversos sinais refletidos podem também se somar de forma construtiva melhorando a recepção do sinal em alguns pontos do espaço.

O espalhamento de atraso ocorre quando o sinal irradiado pela antena percorre caminhos diferentes e chegam ao receptor em intervalos diferentes. Fazendo com que a recepção do sinal seja duplicada ou ocorra uma interferência destrutiva como no caso do desvanecimento.

No espalhamento de Doppler é observada uma diferença na frequência da portadora, causado, principalmente, pela mobilidade do receptor em relação ao transmissor. Quando o receptor está se movendo, aumenta a quantidade de percursos que o sinal pode percorrer e fatores como frequência da portadora, velocidade, prédios e carros podem influenciar na ocorrência do efeito Doppler.

2.3.4 Sombreamento

O efeito de sombreamento é definido como áreas onde sinal recebido apresenta baixa potência devido às obstruções entre o transmissor e o receptor, onde a recepção dos sinais acontece principalmente, por reflexões do sinal, sendo que os múltiplos caminhos que o sinal pode percorrer para chegar no local do receptor, podem ter um efeito negativo na recepção do sinal.

2.4 Padrões e tecnologias de comunicação para redes LPWAN

Segundo Tanenbaum em [12], sem coordenação e cooperação entre fabricantes de dispositivos, não seria possível a interoperabilidade de sistemas. Sistemas IoT, como demonstrado em [4], podem ser constituídas de sistemas com vários dispositivos diferentes. Portanto, a padronização das telecomunicações são imprescindíveis, permitindo que dispositivos de diferentes fabricantes consigam se comunicar, não importando quem produziu a placa de rede, os cabos, roteadores ou comutadores.

2.4.1 LoRa

LoRaWAN, abreviação para *Long Range Wide Area Networks*, é uma tecnologia que utiliza a implementação de camada física LoRa e protocolos de acesso ao meio. Utiliza uma técnica de modulação proprietária da SemTech baseada na técnica de modulação CSS, *Chirp Spread Spectrum*. Essa técnica espalha um sinal de faixa estreita em um canal de banda larga, tornando o sinal mais resistente a interferências, mais difícil de se detectar por outros dispositivos que estejam sensoriando o canal de comunicação e mais resistente a obstruções no canal de comunicação. Utiliza as faixas ISM de 868 MHz, 915MHz e 433MHz na Europa, América do Norte e Ásia, respectivamente. A taxa de transmissão pode variar de 300 *bit/s* a até 50 *kbit/s*, dependendo do fator de espalhamento utilizado na comunicação. A carga útil máxima de uma mensagem é 243 *bytes* [14].

A tecnologia LoRa é desenvolvida pela empresa estadunidense SemTech e o padrão LoRaWAN é mantido pelo consórcio de empresas chamado *LoRa Alliance*.

2.4.2 NB-IoT

NarrowBand IoT é uma tecnologia especificada na versão 13 do 3GPP [16]. Esta tecnologia opera na faixa de frequência celular (LTE e GSM), modulando os sinais utilizando a técnica QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying* (Modulação por Deslocamento de Fase em Quadratura). Seu protocolo é uma versão simplificada do protocolo LTE, com menos funcionalidades, para melhor adequar sua utilização para IoT, utilizando faixas de frequência não ocupadas. Por exemplo, funções como monitoramento da qualidade do sinal ou conectividade dupla não são utilizadas, visando diminuir o consumo de energia e aumentar a vida útil da bateria. Apresenta taxa de transmissão máxima de 200 *kbits/s* e sua carga útil máxima é de 1600 *bytes*.

2.4.3 SigFox

SigFox é uma tecnologia que não possui padronização oficial e é mantida pela empresa homônima. Os nós finais conectados a esta rede enviam para as estações rádio base mensagens utilizando a modulação BPSK, *Binary Phase Shift Keying* (Modulação por Deslocamento de Fase Binária) utilizando bandas de frequência ultra-estreitas, de até 100 Hz, na faixa de frequência ISM. Como utiliza uma faixa de frequência ultra estreita é eficiente energeticamente e resistente à interferência. Porém, não oferece taxas de transmissão acima de 100 *bit/s*.

A empresa SigFox oferece uma solução com conectividade ponta a ponta, o que significa que os dados entre o nó final são transmitidos para as estações rádio-base e vão diretamente para os servidores da empresa. Sendo possível apenas o envio de 140 mensagens por dia e cada mensagem enviada pode ter um carga útil máxima de 12 *bytes*.

2.4.4 IEEE 802.15.4

No padrão IEEE 802.15.4 são definidas camadas físicas e de acesso ao meio utilizando as faixas ISM abaixo de 1 GHz e 2,4 GHz, com as modulações BPSK e O-QPSK, *Offset Quadrature Phase Shift Keying* (Modulação por Deslocamento de Fase em Quadratura Deslocada), respectivamente. Com taxa de transmissão máxima de 250 kbit/s utilizando a faixa de frequência de 2,4 GHz com um tamanho máximo de carga útil de 127 bytes [17]. Este padrão é utilizado como base do ZigBee.

2.4.5 Emenda IEEE 802.15.4g

Em 2015 foi proposta uma revisão do padrão IEEE 802.15.4 com novos esquemas de modulação com parâmetros de operação predefinidos para permitir uma melhor relação de compromisso entre faixa de comunicação, ocupação da largura de banda, taxa de transmissão de dados e confiabilidade da comunicação, para melhor se adequar aos requisitos de diferentes aplicações. Assim, foi definido o padrão IEEE 802.15.4g, que inclui as modulações SUN, *Smart Utility Network* (Redes de Utilidades Inteligentes) [18].

A seguir é apresentada uma visão geral das modulações.

2.4.5.1 SUN-FSK

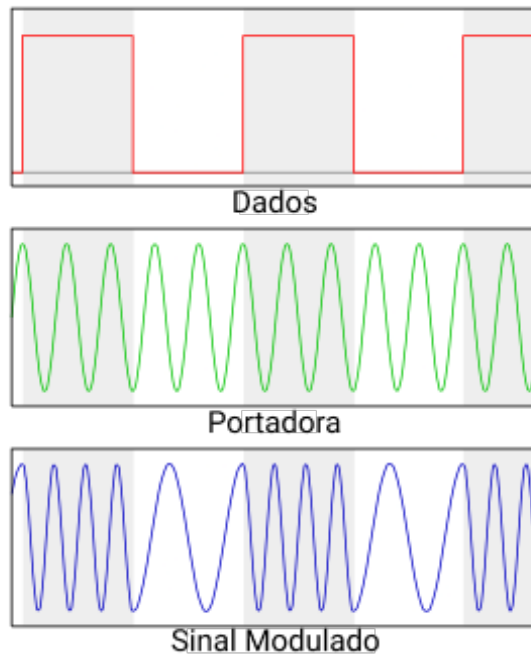
A técnica de modulação digital FSK, *Frequency Shift Keying* (Chaveamento de Mudança de Frequência), altera a frequência, mantendo a amplitude da portadora constante, e os *bits* de informação são transmitidos por meio do chaveamento de diferentes frequências [19]. O esquema de modulação é demonstrado na Figura 4.

Foi incluída no padrão por sua eficiência e compatibilidade com sistemas legados. Apresenta 3 modos de operação para cada uma das faixas de frequência definidas no padrão e possui parâmetros de canal e de modulação, em que é possível definir o tipo de modulação, a largura de banda do canal e o índice de modulação. Estes parâmetros definem a taxa de transmissão de 50 kbit/s a até 200 kbit/s.

2.4.5.2 SUN-OQPSK

Originalmente, ao padrão IEEE 802.15.4 foi adicionada a técnica de modulação DSSS-OQPSK, *Direct Sequence Spread Spectrum Offset Quadrature Phase Shift Keying* (Modulação por Deslocamento de Fase em Quadratura Deslocada com Espalhamento Espectral de Sequência Direta), que se trata de uma técnica de modulação que utiliza chaveamento de fase, como representado na Figura 5, em um ângulo de 90°, do sinal da portadora para transmitir dois *bits* por vez e em seguida utilizando a técnica de espalhamento espectral de sequência direta espalha o sinal em uma ampla faixa de frequência utilizando uma sequência aleatória de alta taxa de *bits*. Essas técnicas visam

Figura 4 – Esquema de Modulação FSK

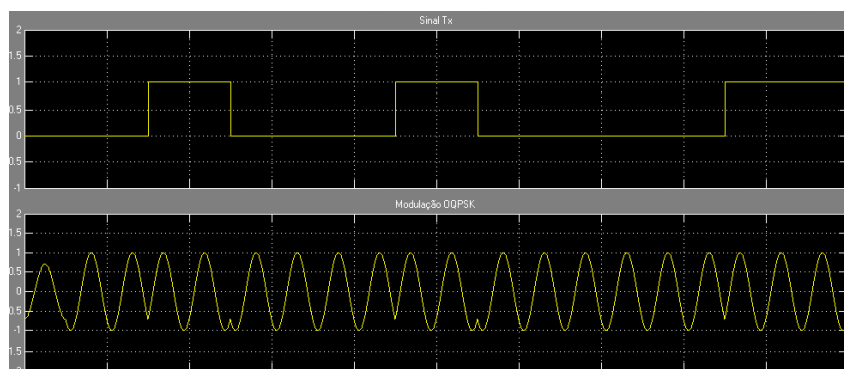


Fonte: adaptada de [20]

aumentar a taxa de transmissão e aumentar a robustez da transmissão, principalmente, tornando o sinal resiliente a interferência de faixa estreita, ruídos e diminuindo os efeitos de desvanecimento por múltiplos caminhos [21].

Essa modulação está presente no texto original do padrão e foi estendida nesta emenda para adicionar bandas de frequência e suportar diferentes fatores de espalhamentos para conseguir atingir taxas de transmissão entre 6,25 *kbit/s* a até 500 *kbit/s*.

Figura 5 – Esquema de Modulação FSK



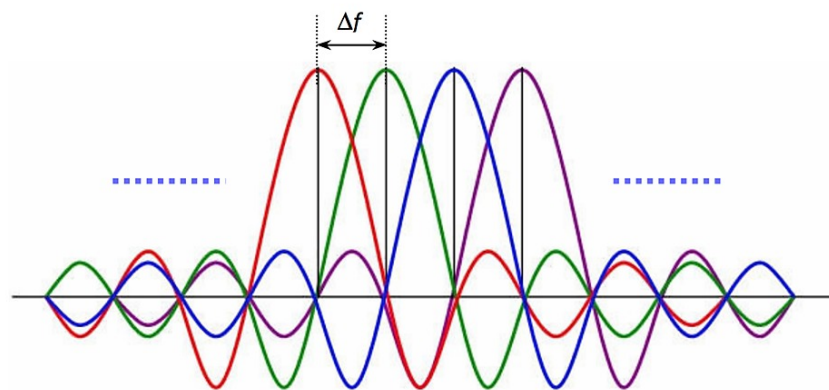
Fonte: copiada de [22]

2.4.5.3 SUN-OFDM

O esquema de modulação de OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência), divide os dados a serem transmitidos em sub-canais ortogonais centrados em sub-portadoras com frequências diferentes. Essas sub-portadoras são comprimidas em uma faixa de frequência de acordo com a largura de banda disponível. Como é possível enviar dados por cada uma das sub-portadoras, é possível também ter uma elevada taxa de transmissão. As frequências de cada sub-portadora se sobrepõem, cada delas é ortogonal, como demonstrado na Figura 6, às suas subjacentes, garantindo que não haja interferência entre elas [15][21].

Esta modulação consegue prover altas taxas de transmissão e maiores faixas de comunicação, enquanto consegue lidar com interferência e propagação por múltiplos caminhos. Utiliza diferentes esquemas de modulação e codificação para alternar entre modulações, como BPSK, QPSK e 16-QAM, e esquemas de repetição de frequência para prover uma faixa de taxa de transmissão entre 50 *kbits/s* a até 800 *kbits/s* em um canal com a largura de banda que varia entre 200kHz e 1,2MHz.

Figura 6 – Sub-Portadoras Sobrepostas Ortogonalmente



Fonte: copiada de [23]

2.4.5.4 Diversidade de Modulação

Segundo Rappaport em [15], diversidade é uma técnica utilizada para compensar os danos da atenuação do canal melhorando a qualidade do enlace de comunicações sem fio sem alterar a interface aérea, sem aumentar a potência ou a largura de banda transmitida.

A ideia de diversidade é que diferentes sinais são enviados por diferentes caminhos e, portanto, dificilmente, sofrera das mesmas complicações, aumentando a probabilidade de receber um sinal com menor quantidade de erros [21]. Normalmente, são utilizadas técnicas de diversidade aumentando o número de antenas receptoras ou utilizando múltiplos canais de comunicação.

Como demonstrado pelos autores em [10] é possível utilizar as diferentes modulações do padrão IEEE 802.15.4g SUN para criar um esquema de diversidade de modulação, ou seja, utilizar as diferentes modulações do padrão de acordo com as variações do ambiente ou enviar repetições da mensagem com mais de uma modulação, podendo melhorar a qualidade do enlace.

2.5 Parâmetros para Avaliação da Confiabilidade do Enlace Sem Fio

Algumas métricas são utilizadas para medir a qualidade de um enlace sem fio, algumas estão mais relacionadas à camada física, como RSSI, *Received Signal Strength Indicator* (Indicador da Força do Sinal Recebido) e CCA, *Clear Channel Assessment* (Verificação do Canal Limpo), ou mais relacionadas à camada de aplicação, como o PDR, *Packet Delivery Ratio*, Taxa de Entrega de Pacotes. Estas métricas são detalhadas a seguir.

2.5.1 RSSI

RSSI é uma medida da energia de um sinal de rádio recebido. O RSSI é um valor relativo e pode variar de acordo com a fabricante do transceptor de rádio [24]. O valor de RSSI varia de -100dB até 0dB, os maiores valores, próximos a 0dB, significam uma boa qualidade do sinal recebido e valores menores, próximos a -100dB, significam sinais de baixa qualidade.

2.5.2 PDR

PDR é um indicador de camada de aplicação que relaciona a quantidade de pacotes recebidos pelo receptor com a quantidade de pacotes enviados pelo transmissor. Dependendo da aplicação, há uma taxa mínima de entrega de pacotes requeridas, por exemplo, aplicações industriais com requisitos críticos de confiabilidade necessitam de um PDR superior a 99,9%.

2.5.3 CCA

CCA é uma forma de verificar o canal antes da transmissão, a fim de detectar se ele está em uso. Obtido a partir da verificação da energia no canal, é medido em dBm. Caso o valor medido esteja acima de um limiar pré-determinado o transmissor não pode transmitir e espera um tempo aleatório em milissegundos para verificar novamente o canal. Este parâmetro faz parte do protocolo CSMA, citado na Seção 2.2.

2.6 Trabalhos relacionados

Em [9], os autores do realizaram um experimento no qual implementaram uma RSSF, em um cenário industrial, utilizando transceptores IEEE 802.15.4g SUN. Para avaliar o desempenho dessa rede, utilizaram as métricas RSSI, CCA e PDR. O experimento resultou em um conjunto de dados de aproximadamente 11 milhões de linhas que foi disponibilizado com o propósito de permitir que outros pesquisadores proponham novos mecanismos de melhoria de recepção ou utilizem o conjunto de dados para testar suas propostas de mecanismos em ambientes reais. O trabalho apresentado neste documento é uma extensão do trabalho realizado em [9] e, assim, provê uma avaliação do desempenho do IEEE 802.15.4g SUN em um ambiente diferente.

Em [25], a partir de um experimento realizado em quatro diferentes cenários, os autores estudaram o impacto dos cenários na forma de propagação do sinal utilizando diferentes parametrizações das três modulações do padrão IEEE 802.15.4g e diferentes distâncias entre o transmissor e o receptor. Este estudo também compara a utilização de transceptores 802.15.4g SUN, utilizando as faixas ISM abaixo de 1 GHz, em relação a utilização de transceptores ZigBee (IEEE 802.15.4) utilizando as faixas ISM de 2,4 GHz em operações ao ar livre. E a utilização das modulações SUN pode reduzir o número de nós repetidores de sinais nestes cenários.

Em [17], os autores comparam dois esquemas de modulação em cenário de *Smart Building*. Foi utilizada a modulação O-QPSK (IEEE 802.15.4) na faixa de 2,4 GHz e a modulação OFDM (IEEE 802.15.4g SUN) nas faixas ISM abaixo de 1 GHz. Os resultados deste trabalho indicam que OFDM tem maior alcance mesmo em altas taxas de transmissão, 800kbits/s e pode ter menor consumo energético comparado ao O-QPSK nas faixas ISM de 2,4 GHz.

Em [5], a partir de uma implementação RSSF de transceptores LoRa, os autores estudaram como o PDR é afetado pela distância, potência de transmissão, tamanho da carga útil, ângulo da antena, horário e condições climáticas. E concluíram que 99% dos pacotes perdidos ocorrem com até três retransmissões.

3 Experimento

Nesta Seção é apresentado o experimento de implementação de uma RSSF em um ambiente de *Smart Building*, utilizando a implementação do padrão IEEE 802.15.4g SUN dos dispositivos OpenMote-B [9]. A finalidade deste experimento é avaliar o desempenho da rede analisando valores de PDR e RSSI obtidos.

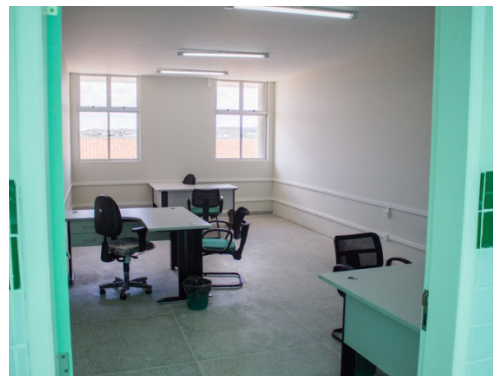
O experimento foi realizado em um dos prédios do campus Campina Grande do IFPB, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (Figura 7a). O prédio é constituído, principalmente, de salas de escritório (Figura 7b), possuindo 4 andares separados por pisos de concreto. Além desse cenário ser particularmente desafiador para um enlace sem fio, pois, não é possível ter uma linha de visada entre o transmissor e o receptor, e as paredes e pisos facilitam a ocorrência de propagação por múltiplos caminhos, com possibilidade de áreas de sombreamento de sinais.

Figura 7 – Prédio dos Professores, Campus Campina Grande.

(a) Imagem Externa do Prédio.



(b) Salas do Prédio.



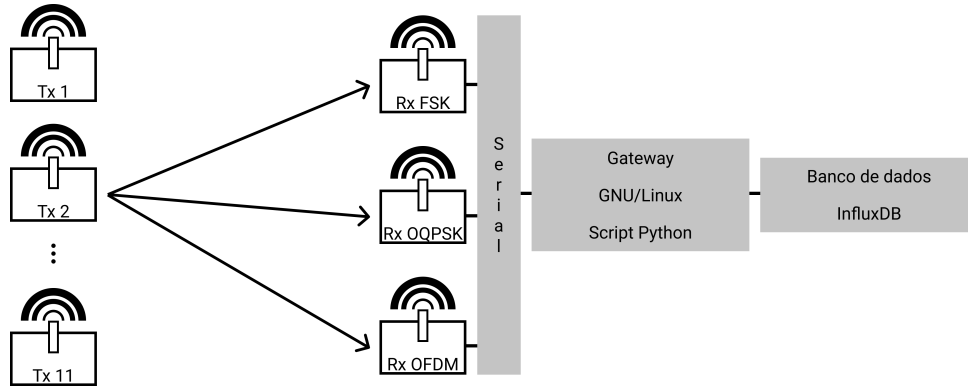
Fonte: copiada de [26]

3.1 Visão Geral

A rede é composta por 11 dispositivos transmissores, denominados no restante do texto de Tx, que enviam nove réplicas de mensagens, três para cada modulação do padrão IEEE 802.15.4g SUN. Três receptores, chamados no restante do texto de Rx, foram configurados para receber mensagens em apenas uma das modulações do padrão, sendo que cada Rx recebe pacotes em uma modulação diferente. Os dispositivos Rx enviam as mensagens recebidas via rádio por uma porta serial para um computador que utiliza um sistema operacional de base GNU/Linux, o Linux Mint 19 e executa um *script Python* que lê as mensagens seriais enviadas pelos dispositivos Rx, estrutura e persiste os dados em um

banco de dados InfluxDB. Na Figura 8 é representada uma visão geral do funcionamento da rede.

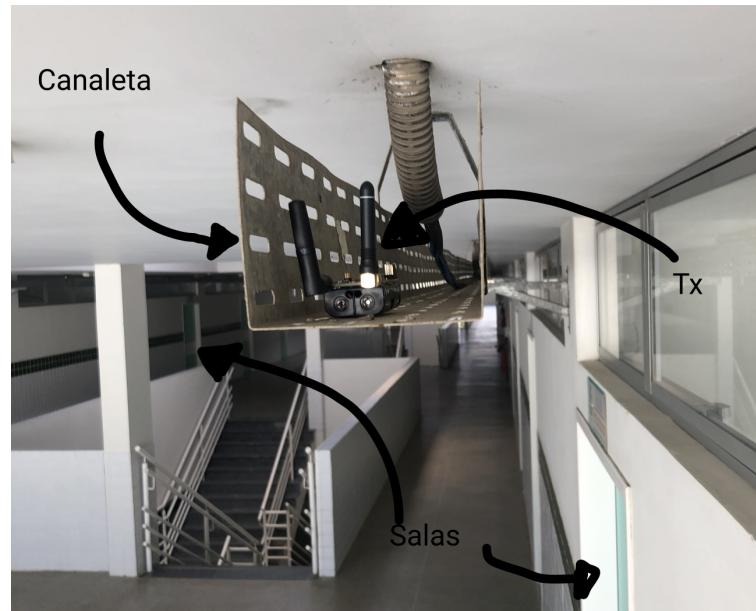
Figura 8 – Visão Geral da Rede.



Fonte: autoral.

Os dispositivos Tx foram posicionados nos quatro pisos do prédio, em canaletas, como demonstrado na Figura 9, e no interior de uma sala. Os dispositivos Rx foram colocados no interior do laboratório do GComPI, presente no primeiro piso do prédio.

Figura 9 – Exemplo de Posicionamento dos Dispositivos Tx.



Fonte: autoral.

3.2 OpenMote B

O OpenMote B é um *hardware* de desenvolvimento e prototipação de plataformas IoT. Contém o processador SoC, *System-on-Chip* (Sistema em um *Chip*), CC2535 da Texas

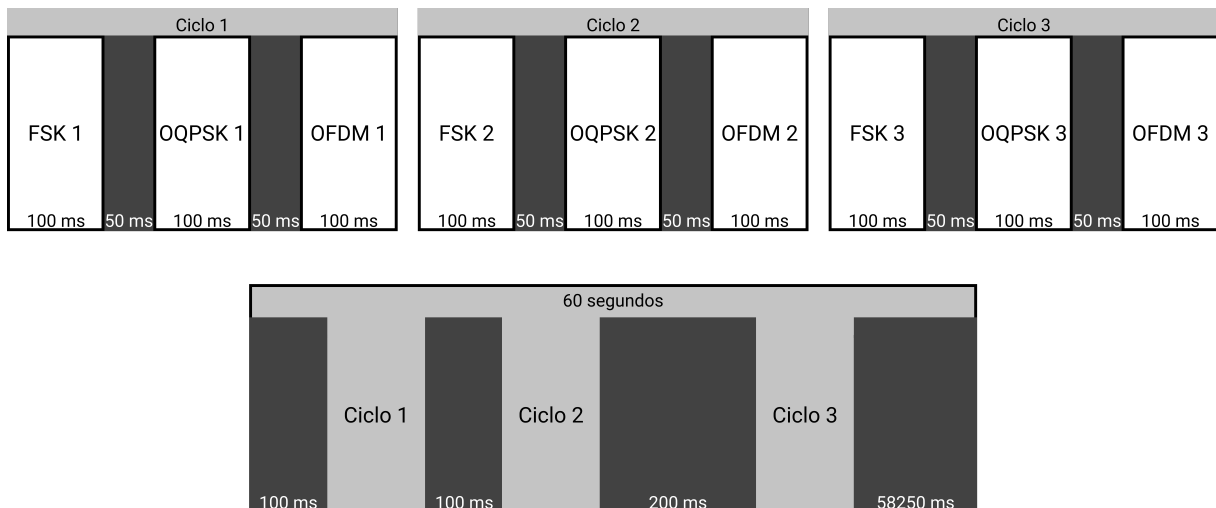
Instruments, constituído de um ARM Cortex-M3, com 32 *kbytes* de memória RAM e 512 *kbytes* de memória Flash. Embarcado nesse processador, há um transceptor com suporte ao padrão IEEE 802.15.4 que utiliza a modulação DSSS-OQPSK na faixa ISM de 2,4 GHz. O OpenMote B também contém um transceptor AT86RF215 da ATMEL que implementa as três modulações do padrão IEEE 802.15.4g, nas faixas de frequência ISM abaixo de 1 GHz e na faixa ISM de 2,4 GHz [27].

O código-fonte do *firmware* dos dispositivos está presente no repositório em [11]. Nele foram realizadas alterações que estão disponíveis no repositório em [28].

3.3 Transmissão dos dados

Os dispositivos foram configurados para realizar transmissões de acordo com ciclos de execução, como representado na Figura 10. Em cada ciclo, o dispositivo envia três mensagens, uma mensagem para cada modulação, com um intervalo de 50 ms entre as transmissões. Entre os ciclos de envio é realizada uma pausa de 100 ms, entre o primeiro e o segundo ciclo, ou 200 ms, entre o segundo e terceiro ciclo. Ao realizar três ciclos, o dispositivo entra em modo de espera por 58250 ms. Cada mensagem possui um total de 32 *bytes* de informação, com a taxa de 50 *kbits/s*, leva cerca de 100 ms para a transmissão. Os três ciclos de transmissão e pausas levam, no total, 1 minuto para ser completo.

Figura 10 – Ciclo de Envio de Mensagens.



Fonte: autoral.

Cada mensagem transmitida é constituída dos seguintes campos:

- Identificador do dispositivo: um campo de 6 *bytes* que registra um carácter entre “a” e “k”, que identifica cada um dos onze dispositivos Tx;
- Identificador de pacote: um campo de 8 *bytes* que registra um contador que é também a identificação do pacote;

- Identificador da modulação: um campo de 1 *byte* que registra em qual modulação o pacote foi enviado;
- Identificador de Pacote do Transmissor: um campo de 1 *byte* que registra em qual dos ciclos de transmissão (ciclo um, dois ou três) o pacote foi enviado;
- Quantidade de Tentativas do CSMA: um campo de 1 *byte* que registra quantas vezes o transmissor sensoriou o canal de radiofrequência antes de realizar a transmissão, o valor pode ser de 1 até 3, caso chegue na terceira tentativa e o canal não for acessado, o dispositivo não realiza a transmissão;
- Valor de RSSI do CCA: um campo de 1 *byte* que registra o valor de energia do canal. Se o valor estiver acima do valor apresentado no campo “Limiar do CCA” na Tabela 1, o dispositivo espera um tempo aleatório, em milissegundos, e realiza outra tentativa de transmissão.

Para completar os 32 *bytes* de carga útil cada mensagem foi preenchida com 14 *bytes*.

Na Tabela 1 estão descritas as configurações de operação de cada modulação.

3.4 Recepção e Persistência dos dados

Os dispositivos Rx foram configurados para, a cada pacote recebido, verificar o valor de RSSI durante a recepção e concatenar este valor na sequência de bytes recebida. A sequência é envelopada utilizando o protocolo HDLC, *High-Level Data Link Control* (Controle de Enlace de Dados de Alto Nível, em tradução livre), este protocolo torna a transmissão serial mais robusta e facilita a leitura dos dados na serial no receptor [12]. Então, essa sequência é transmitida pela porta serial para o computador no qual os dispositivos Rx estão conectados.

No computador conectado, as mensagens recebidas são processadas por meio de um *script Python*. Cada mensagem recebida é extraída do envelope HDLC e se não ocorrer problemas, os *bytes* da mensagem são lidos e armazenados numa estrutura chave-valor da linguagem *Python*, chamada dicionário. Cada chave é um dos campos citados na Seção 3.3 e o RSSI adicionado pelo dispositivo Rx. Nessa estrutura são adicionados alguns valores de controle, por exemplo, a quantidade de pacotes seriais recebidos e extraídos corretamente pelo HDLC, e alguns campos relativos ao banco de dados, como a Tabela em que os dados serão armazenados.

Com todos os dados estruturados em um dicionário, eles são enviados utilizando uma biblioteca de funções que facilita a comunicação com o banco de dados, para o qual é utilizada uma função para enviar os dados estruturados. Foi utilizado o InfluxDB,

Tabela 1 – Configurações utilizadas de cada modulação.

Modulação	SUN-FSK	SUN-OQPSK	SUN-OFDM
Taxa de transmissão(Kbit/s)	50	50	50
Tipo de Modulação	BFSK	OQPSK	BPSK
Índice de Modulação	1,0	N/A	N/A
Taxa de <i>Chips</i> (kchips/s)	N/A	100	N/A
Modo de Espalhamento	N/A	SHR:(32,1)-DSS PHR:(8,1)-DSS PSDU:none	N/A
Frequência Central (MHz)	863,125	868,3	863,425
Largura de banda do canal (MHz)	0,2	1,3	0,8
Canais disponíveis	129	12	31
Potência de Transmissão (dBm)	15	15	9
Sensibilidade de Recepção (dBm)	-114	-116	-111
Limiar do CCA (dBm)	-94	-93	-91
Notas	FEC Habilitado	Taxa de Codificação: 1/2	Taxa de Codificação: 1/2 Repetição de Frequência: 4x

um banco de dados não-relacional de séries temporais otimizado para armazenar dados com marcas temporais, ou seja, os dados armazenados estão relacionados a um intervalo específico [29].

O código do *script Python* está disponível no repositório [30].

4 Resultados

4.1 Dados Obtidos

Os dados armazenados foram extraídos do banco de dados em um arquivo no formato CSV, *Comma Separated Values* (Valores Separados por Vírgula), o arquivo apresenta as informações descritas na Seção 3 e contém um total de 462.065 linhas. Na Figura 11a são ilustradas as primeiras linhas do arquivo CSV. A partir do arquivo CSV, foram gerados onze novos arquivos, um para cada dispositivo Tx, contendo o identificador do pacote, o horário da transmissão e quais tentativas de transmissão foram bem sucedidas. Na Figura 11b é ilustrado um desses arquivos, em que o número “1” significa uma tentativa de transmissão bem sucedida e o número “0” significa que não foi recebida a mensagem com a modulação daquele identificador.

Todos os arquivos CSV e scripts utilizados para a análise de dados estão disponíveis no repositório [31].

4.2 Análise dos dados

Os onze arquivos com as tentativas de transmissão foram computados e a partir disso foi calculado o PDR de cada modulação, estes valores são apresentados nas tabelas 2a, 3a, 4a e 5a, e apresentam os valores de PDR dos dispositivos agrupados por piso. Foi calculado também os valores de RSSI médios das transmissões recebidas, os valores, em dBm, são apresentados nas tabelas 2b, 3b, 4b e 5b.

Importante destacar que os dispositivos Rx estavam no primeiro piso do prédio, o

Tabela 2 – Primeiro Piso

ID	SUN-FSK			SUN-OQPSK			SUN-OFDM		
	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3
D	80.39	78.71	80.17	99.20	99.17	99.17	99.21	99.21	99.21
H	80.86	78.67	80.97	99.21	99.21	99.21	45.12	45.19	45.31

(a) PDR

ID	SUN-FSK			SUN-OQPSK			SUN-OFDM		
	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3
D	-99.68	-99.52	-99.62	-90.39	-90.42	-90.38	-98.54	-98.20	-98.67
H	-106.05	-105.97	-106.05	-90.75	-90.78	-90.76	-108.36	-108.37	-108.19

(b) RSSI(dBm)

Figura 11 – Dados do experimento.

(a) Exemplo das Colunas do Arquivo CSV.

```

1 time,cca_retries,cca_rssi,modulation,node_id,pkt_number,pkt_retries,rssi
2 2020-11-24 11:30:23-03:00,1,-111,0,d,35,0,-102
3 2020-11-24 11:30:23-03:00,1,-117,1,d,35,0,-97
4 2020-11-24 11:30:23-03:00,1,-127,2,d,35,0,-92
5 2020-11-24 11:30:23-03:00,1,-113,0,d,35,1,-102
6 2020-11-24 11:30:23-03:00,1,-117,1,d,35,1,-97
7 2020-11-24 11:30:24-03:00,1,-125,2,d,35,1,-91
8 2020-11-24 11:30:24-03:00,1,-111,0,d,35,2,-102
9 2020-11-24 11:30:24-03:00,1,-117,1,d,35,2,-97
10 2020-11-24 11:30:24-03:00,1,-125,2,d,35,2,-90
11 2020-11-24 11:31:22-03:00,1,-112,0,d,36,0,-102
12 2020-11-24 11:31:22-03:00,1,-116,1,d,36,0,-97
13 2020-11-24 11:31:22-03:00,1,-125,2,d,36,0,-91
14 2020-11-24 11:31:23-03:00,1,-114,0,d,36,1,-102
15 2020-11-24 11:31:23-03:00,1,-119,1,d,36,1,-97
16 2020-11-24 11:31:23-03:00,1,-125,2,d,36,1,-92
17 2020-11-24 11:31:23-03:00,1,-109,0,d,36,2,-102
18 2020-11-24 11:31:23-03:00,1,-117,1,d,36,2,-97
19 2020-11-24 11:31:23-03:00,1,-125,2,d,36,2,-92
20 2020-11-24 11:32:22-03:00,1,-110,0,d,37,0,-97

```

(b) Exemplo do Arquivo com as Tentativas de Transmissão.

```

1 pkt_number,pkt_day,fsk_0,fsk_1,fsk_2,oqpsk_0,oqpsk_1,oqpsk_2,ofdm_0,ofdm_1,ofdm_2
2 19,2020-11-24 11:30:52-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
3 20,2020-11-24 11:31:51-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
4 21,2020-11-24 11:32:51-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
5 22,2020-11-24 11:33:50-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
6 23,2020-11-24 11:34:49-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
7 24,2020-11-24 11:35:49-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
8 25,2020-11-24 11:36:48-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
9 26,2020-11-24 11:37:47-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
10 27,2020-11-24 11:38:46-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
11 28,2020-11-24 11:39:46-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
12 29,2020-11-24 11:40:45-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
13 30,2020-11-24 11:41:44-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
14 31,2020-11-24 11:42:43-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
15 32,2020-11-24 11:43:43-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
16 33,2020-11-24 11:44:42-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
17 34,2020-11-24 11:45:41-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
18 35,2020-11-24 11:46:40-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
19 36,2020-11-24 11:47:40-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
20 37,2020-11-24 11:48:39-03:00,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1

```

Fonte: autoral.

mesmo nível dos dispositivos “D” e “H”. Mas os dispositivos Tx deste piso apresentam um menor desempenho a nível de aplicação (PDR) em relação aos dispositivos do segundo piso. Os valores de RSSI dos dispositivos presentes nos dois pisos não apresenta uma grande divergência, então, é deduzido que a diferença de valores de PDR é causada por áreas de sombreamento de sinal transmitido nos arredores dos receptores que levam a uma alta taxa de erros de *bits* nas mensagens, tornando difícil o uso, por exemplo, de FEC, *Forward Error Correction* (Códigos de Correção de Erros) o que leva a perda do pacote.

Os dados obtidos dos dispositivos presentes no quarto piso do prédio mostram que o dispositivo “K” obteve PDR entre 97% e 99% nas modulações SUN-OQPSK e SUN-FSK e cerca de 56% na modulação SUN-OFDM. A disparidade de valores entre

Tabela 3 – Segundo Piso

ID	SUN-FSK			SUN-OQPSK			SUN-OFDM		
	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3
A	99.17	99.15	99.15	99.20	99.21	99.21	99.15	99.15	99.18
B	98.08	97.93	98.10	97.85	98.32	98.44	99.04	98.94	99.02
C	28.11	20.21	28.17	99.07	98.95	99.01	96.40	96.40	96.37

(a) PDR

ID	SUN-FSK			SUN-OQPSK			SUN-OFDM		
	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3
A	-98.31	-98.29	-98.30	-81.76	-81.76	-81.76	-103.01	-103.18	-103.01
B	-100.27	-100.26	-100.28	-88.96	-89.13	-89.15	-101.32	-101.36	-101.11
C	-109.06	-108.67	-109.07	-91.13	-91.14	-91.11	-106.81	-106.88	-106.68

(b) RSSI(dBm)

Tabela 4 – Terceiro Piso

ID	SUN-FSK			SUN-OQPSK			SUN-OFDM		
	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3
E	69.71	63.88	69.71	99.20	99.21	99.21	98.53	98.60	98.58
F	86.56	83.35	85.67	99.21	99.21	99.18	88.12	88.23	88.17
G	0.18	0.15	0.15	76.59	76.45	75.82	0.07	0.07	0.15

(a) PDR

ID	SUN-FSK			SUN-OQPSK			SUN-OFDM		
	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3
E	-105.77	-105.65	-105.74	-86.88	-86.89	-86.88	-106.06	-106.13	-105.92
F	-104.92	-104.83	-104.90	-86.23	-86.26	-86.22	-108.02	-108.01	-107.87
G	-111.42	-111.50	-111.70	-104.36	-104.38	-104.32	-112.80	-112.80	-112.80

(b) RSSI(dBm)

este dispositivo e os outros do mesmo piso é atribuído, principalmente, ao fato de que o dispositivo encontra-se em uma sala diretamente acima da sala dos dispositivos Rx.

O motivo da modulação SUN-OFDM obter um pior desempenho, nos valores de PDR, em relação as outras modulações no dispositivo “K” é atribuída ao desvanecimento do sinal já que, de acordo com a Tabela 1, a modulação possui o menor valor de potência de transmissão das três modulações.

Os gráficos apresentados na Figura 12, mostram a média dos valores de PDR por piso de acordo com as modulações e o ciclo de transmissão. [refatorar] A linha preta mostra os valores mínimos e máximos de PDR do piso.

Observando os gráficos da Figura 12, a modulação SUN-OQPSK se destaca em relação às outras. Como apresentado na Seção 2.4, as modulações SUN-OQPSK e SUN-

Tabela 5 – Quarto Piso

ID	SUN-FSK			SUN-OQPSK			SUN-OFDM		
	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3
I	6.10	5.77	6.12	57.90	57.92	58.36	0.00	0.00	0.00
J	0.01	0.01	0.00	25.02	25.33	24.86	1.78	1.94	1.83
K	97.56	97.36	97.53	98.15	98.15	98.16	56.75	57.29	56.89

(a) PDR

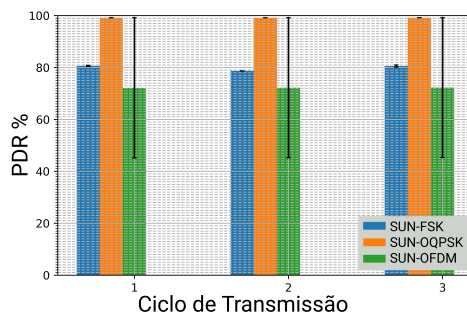
ID	SUN-FSK			SUN-OQPSK			SUN-OFDM		
	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3
I	-112.21	-112.20	-112.18	-105.09	-105.11	-105.10	N/A	N/A	N/A
J	-112.00	-113.00	N/A	-106.62	-106.68	-106.59	-112.56	-112.56	-112.54
K	-101.33	-101.30	-101.33	-90.29	-90.34	-90.32	-109.19	-109.26	-109.16

(b) RSSI(dBm)

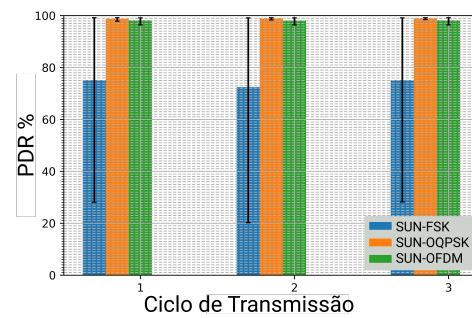
OFDM apresentam maior robustez a interferências e efeitos negativos da propagação por múltiplos caminhos. Porém, como apresentado na Tabela 1, a modulação SUN-OQPSK apresenta maior potência de transmissão e maior largura de banda do canal, o que garante, junto com a técnica de modulação do DSSS-OQPSK, Seção 2.4.5.2, melhor aproveitamento do canal de transmissão e, conseqüentemente, uma melhor recepção do sinal.

Figura 12 – Valores de PDR para cada piso.

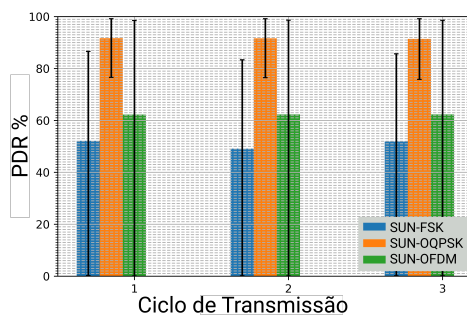
(a) Primeiro Piso.



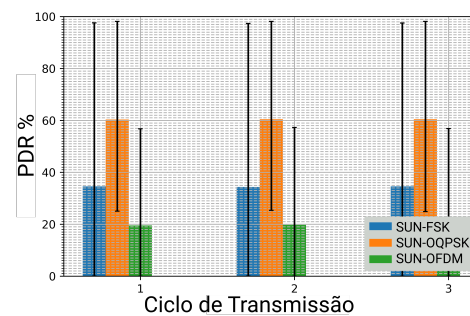
(b) Segundo Piso.



(c) Terceiro Piso.



(d) Quarto Piso.



5 Considerações Finais

A análise dos dados, apresentada no Capítulo 4, indica que a modulação SUN-OQPSK apresenta melhor desempenho em relação às outras modulações utilizadas. Porém, sem desempenho similar em todos os casos abordados, bem como as modulações SUN-FSK e SUN-OFDM chegam a apresentar valores de PDR próximos a 0% em algumas situações. Os resultados obtidos motivam novas abordagens para a implementação, como a utilização de diversidade de receptores. E como principal contribuição, este trabalho apresenta um conjunto de dados que podem ser utilizados para o avanço dos estudos de diversidade de modulação.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho é uma extensão daquele realizado em [9] e segue as mesmas diretrizes utilizadas neste, com diversos pontos a serem melhorados e novas abordagens podem ser feitas para o ambiente proposto neste trabalho. No total, é possível ter 33 configurações diferentes no transceptor de rádio utilizado, neste trabalho foram utilizados apenas 3 configurações (uma para cada tipo de modulação), sendo possível analisar como essas diversas configurações de taxa de transmissão, índice de modulação, canais de frequência, entre outras impacta a transmissão sem fio no ambiente estudado.

A principal linha de trabalhos futuros é a implementação de utilização de pacotes *acknowledgment* ou pacotes de reconhecimento. Em que, ao receber um pacote o receptor envia uma mensagem ao transmissor confirmando o recebimento. Isto permite ao transmissor analisar quais modulações estão sendo melhor recebidas e determinar quais as melhores modulações para aquele instante, possibilitando uma melhoria nos valores de PDR.

Outras sugestões, e que não foram objetivos desse trabalho, são: analisar o consumo energético dos dispositivos e verificar como pode ser otimizado de acordo com as diversas configurações. Este tópico é bastante importante devido ao tipo de problema que o padrão IEEE 802.15.4g SUN tenta resolver, que é a utilização destes dispositivos por longos intervalos utilizando como fonte energética baterias; Utilização de múltiplos receptores/*gateways*, que resultaria em melhor recepção de dados, mas com problemas como entradas duplicadas no banco de dados; Replicação deste experimento em outros tipos de cenários, por exemplo, cenários rurais que, teoricamente, são um ambiente mais favorável para a comunicação via rádio ou cenários urbanos onde efeitos de propagação por múltiplos caminhos são acentuados devido aos diversos prédios e ao carros que circulam pela cidade.

Referências

- 1 ELDER, J. *Como Kevin Ashton batizou a Internet das Coisas?* <<https://blog.avast.com/pt-br/kevin-ashton-named-the-internet-of-things>>. Acessado em: 27 fev. 2020. Citado na página 11.
- 2 LOPEZ RESEARCH LLC. *Uma introdução à Internet da Coisas (IoT)*. <https://www.cisco.com/c/dam/global/pt_br/assets/brand/iot/iot/pdfs/lopez_research_an_introduction_to_iot_102413_final_portuguese.pdf>. Acessado em: 27 fev. 2020. Citado na página 11.
- 3 VIANATEL. *Anatel quer flexibilizar regras para IoT*. Disponível em: <<https://www.vianatel.com.br/anatel-quer-flexibilizar-regras-para-iot/>>. Citado na página 11.
- 4 SOTRES, P. et al. Practical lessons from the deployment and management of a smart city internet-of-things infrastructure: The smartantander testbed case. *IEEE Access*, IEEE, v. 5, p. 14309–14322, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 21.
- 5 WANG, S.-Y. et al. Performance of lora-based IoT applications on campus. In: IEEE. *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. [S.l.], 2017. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 27.
- 6 ZHANG, L. et al. A remote medical monitoring system for heart failure prognosis. *Mobile Information Systems*, Hindawi, v. 2015, 2015. Citado na página 11.
- 7 GOMES, R. D. et al. Estimacão de qualidade de enlace e alocação dinâmica de canais em redes de sensores sem fio industriais. Universidade Federal de Campina Grande, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 23.
- 8 GUNGOR, V. C.; HANCKE, G. P. Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches. *IEEE Transactions on industrial electronics*, IEEE, v. 56, n. 10, p. 4258–4265, 2009. Citado na página 12.
- 9 TUSET-PEIRÓ, P. et al. A dataset to evaluate IEEE 802.15.4g SUN for dependable low-power wireless communications in industrial scenarios. *Data*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 5, n. 3, p. 64, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 13, 27, 28 e 37.
- 10 GOMES, R. D.; TUSET-PEIRÓ, P.; VILAJOSANA, X. Improving link reliability of IEEE 802.15. 4g SUN networks with adaptive modulation diversity. Preprints, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 26.
- 11 TUSET-PEIRÓ, P.; VILAJOSANA, X. *openmote/openmote-fw*. [S.l.]: GitHub, 2019. <<https://github.com/openmote/openmote-fw>>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 30.
- 12 TANEMBAUM, A.; WETHERALL, D. *Redes de Computadores*. [S.l.]: Pearson Education, 2011. Quarta Edição. ISBN 978-85-7605-924-0. Citado 4 vezes nas páginas 15, 17, 21 e 31.
- 13 ROCHOL, J. *Sistemas de comunicação sem fio: conceitos e aplicações*. [S.l.]: Bookman Editora, 2018. Citado 6 vezes nas páginas 15, 16, 17, 19, 20 e 21.

- 14 MEKKI, K. et al. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT express*, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 1–7, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 22.
- 15 RAPPAPORT, T. S. *Comunicações Sem Fio: Princípios e práticas*. [S.l.]: Pearson Education, 2009. Segunda Edição. ISBN 978-85-7605-198-5. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 25.
- 16 MEREDITH, J. M. Evolved universal terrestrial radio access (e-utra); nb-iot; technical report for bs and ue radio transmission and reception. In: 3GPP. *Release 13, Especificação número: 36.802*. [S.l.], 2017. Citado na página 22.
- 17 MUÑOZ, J. et al. Overview of IEEE802.15.4g OFDM and its applicability to smart building applications. In: IEEE. *2018 Wireless Days (WD)*. [S.l.], 2018. p. 123–130. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.
- 18 TUSET-PEIRÓ, P. et al. Reliability through modulation diversity: can combining multiple IEEE 802.15. 4-2015 SUN modulations improve PDR? In: IEEE. *2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. [S.l.], 2020. p. 1–6. Citado na página 23.
- 19 LATHI B. P; DING, Z. *Sistemas de Comunicações Analógicos e Digitais Modernos*. [S.l.]: LTD Editora Ltda., 2012. Quarta Edição. Citado na página 23.
- 20 WIKIPEDIA. *Frequency-shift keying*. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency-shift_keying>. Citado na página 24.
- 21 GOLDSMITH, A. *Wireless communications*. [S.l.]: Cambridge university press, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- 22 SEMENTE, R. *Transmissão de Dados Digitais*. Disponível em: <http://www.uern.br/professor/arquivo_baixar.asp?arq_id=5905>. Citado na página 24.
- 23 HONG, J. L. G. *OFDM Subcarriers*. Disponível em: <<https://figshare.com/articles/figure/ofdm-subcarriers/3470288/1>>. Citado na página 25.
- 24 METAGEEEK. *Understanding RSSI*. <<https://www.metageek.com/training/resources/understanding-rssi.html>>. Acessado em: 27 fev. 2020. Citado na página 26.
- 25 MUÑOZ, J. et al. Evaluation of IEEE802. 15.4 g for environmental observations. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 10, p. 3468, 2018. Citado na página 27.
- 26 IFPB. *IFPB entrega obra inédita na Rede Federal*. Disponível em: <https://www.ifpb.edu.br/noticias/2018/01/copy_of_ifpb-entrega-obra-inedita-na-rede-federal>. Citado na página 28.
- 27 INDUSTRIAL SHIELDS. *OpenMote B User Guide*. [S.l.], 2019. Rev. 3. Citado na página 30.
- 28 FERREIRA, F.; TUSET-PEIRÓ, P.; VILAJOSANA, X. *gcompifpb/openmote-fw*. [S.l.]: GitHub, 2021. <<https://github.com/GComPI-IFPB/openmote-fw>>. Citado na página 30.

-
- 29 DIX, P. *Why Time Series Matters for Metrics, Real-Time Analytics and Sensor Data*. 2020. Disponível em: <<http://get.influxdata.com/rs/972-GDU-533/images/why%20time%20series.pdf>>. Citado na página 32.
- 30 FERREIRA, F.; TUSET-PEIRÓ, P. *felipefbs/serialReader*. [S.l.]: GitHub, 2021. <<https://github.com/felipefbs/serialReader>>. Citado na página 32.
- 31 FERREIRA, F.; TUSET-PEIRÓ, P. *gcompi-ifpb/wisun-traces-smartbuilding*. [S.l.]: GitHub, 2021. <https://github.com/GComPI-IFPB/wisun_traces_smartbuilding>. Citado na página 33.