

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 de Telemática do IFPB - Campus Campina Grande, como requisito parcial para conclusão do curso de Tecnologia em Telemática.

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

Campina Grande

2021

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>3</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa e Relevância do Trabalho</b>	<b>5</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>6</b>
1.2.1	Objetivo Geral	6
1.2.2	Objetivos Específicos	6
<b>1.3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>Classificação de Redes</b>	<b>7</b>
2.1.1	Classificação de Redes Sem Fio: Escala de Abrangência	7
<b>2.2</b>	<b>Modelo de Camadas OSI</b>	<b>9</b>
2.2.1	Camada Física	9
2.2.2	Camada de Enlace	11
<b>2.3</b>	<b>Problemas da Comunicação Sem Fio</b>	<b>11</b>
<b>2.4</b>	<b>Padrões e tecnologias de comunicação para redes LPWAN</b>	<b>13</b>
2.4.1	LoRa	13
2.4.2	NB-IoT	14
2.4.3	SigFox	14
2.4.4	IEEE 802.15.4	14
<b>2.5</b>	<b>Parâmetros para Avaliação da Confiabilidade do Enlace Sem Fio</b>	<b>17</b>
<b>2.6</b>	<b>Trabalhos relacionados</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTO</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Visão Geral</b>	<b>18</b>
<b>3.2</b>	<b>Openmote B</b>	<b>19</b>
<b>3.3</b>	<b>Transmissão dos dados</b>	<b>19</b>
<b>3.4</b>	<b>Recepção e Persistência dos dados</b>	<b>21</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>23</b>

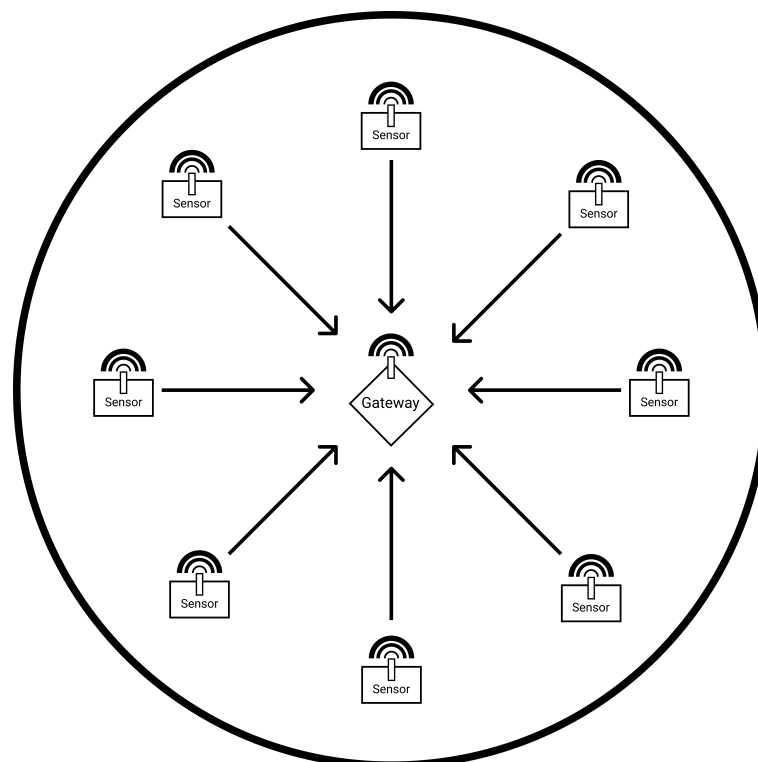


sanguínea e massa corporal do paciente, para verificar a probabilidade do paciente ter um evento de insuficiência cardíaca, utilizando técnicas de aprendizado de máquina.

A implementação de uma aplicação IoT necessita de uma rede de nós sensores distribuídas, geralmente conectadas 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 [6]. 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 [7].

As Redes de Sensores Sem Fio(RSSF), representado na figura 2, se destacam na implementação de aplicações IoT, há porém ainda 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 percurso no meio podem ocasionar altas taxas de perda de pacote e alta latência [6].

Figura 2 – RSSF - Topologia Estrela



Fonte autoral

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 SigFox<sup>1</sup> e LoRa<sup>2</sup>. 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 ZigBee<sup>3</sup> e Wi-SUN<sup>4</sup>. A *3rd Generation Partnership Project* (3GPP)<sup>5</sup> Projeto de Parceria de Terceira Geração em tradução livre, desenvolveu a tecnologia NB-IoT, uma versão simplificada do LTE que visa utilizar a mesma infraestrutura, porém com melhor eficiência energética. Estas tecnologias 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 [8] 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 [9], 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, neste trabalho é proposto para 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*, que possui como principal fonte de problemas para a comunicação a falta de linha de visada. Deve ser estudado as características da RSSF a partir da verificação da taxa de entrega de pacotes e verificar sua viabilidade de implementação com a tecnologia utilizada.

---

<sup>1</sup> <https://www.sigfox.com/en>

<sup>2</sup> <https://lora-alliance.org/>

<sup>3</sup> <https://zigbeealliance.org/>

<sup>4</sup> <https://wi-sun.org/>

<sup>5</sup> <https://www.3gpp.org/>

## 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 a performance 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 [10]. 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 deixar as transmissões acontecerem;
- Análise dos resultados: Uma vez que os dados foram gerados, realizar análises a partir deles. Estas análises serão apresentadas no capítulo X.

## 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

Segundo Tanenbaum, em [11], 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 3, mais relevantes para o escopo deste trabalho de acordo Rochol em [12].

Figura 3 – Tecnologias de Redes Sem Fio

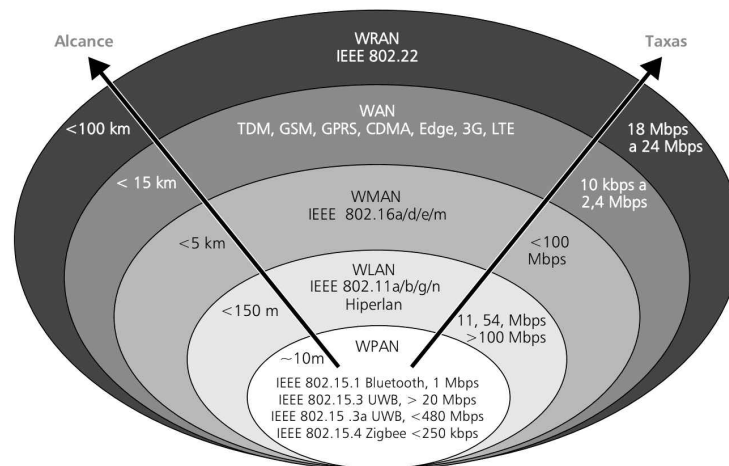


Imagem retirada do livro Sistemas de Comunicação Sem Fio [12].

#### 2.1.1 Classificação de Redes Sem Fio: Escala de Abrangência

##### 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 anticollisão e de condução automática em veículos, automação industrial, prédios inteligentes e monitoração de pacientes. Geralmente, estas redes utilizam a tecnologia ZigBee(IEEE 802.15.4) para a implementação da comunicação de rádio.

### Redes Sem Fio Locais - WLAN

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

Atualmente o padrão IEEE 802.11 utiliza de duas faixas de frequência não licenciada ISM, Industrial, Científica e Médica(Industrial, Scientific and Medic), as faixas em torno de 2,4GHz e 5GHz. Esta ultima 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.

### Redes Celulares de Telefonia e Dados

Estas 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, EDGE e LTE que fornecem a segunda, terceira e quarta geração(2G, 3G e 4G) de telefonia celular, respectivamente.

Como abordado na seção 2.4, há aplicações que utilizam infraestrutura GSM e LTE para aplicações de RSSF.

### 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 areas 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 alguns poucos quilômetros, com baterias que podem durar anos com uma única carga [13].

A utilização desse tipo de rede se tornou fundamental para a implementação de RSSFs, 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 funções bem definidas. A comunicação entre camadas é abstraída e se dá através de interfaces, ou seja, uma camada não tem acesso direto às camadas subjacentes, informação chega até ela no padrão pré-definido.

Para este trabalho será mais relevante a apresentação apenas das camadas 1 e 2, figura 4, física e de enlace, respectivamente, e suas subcamadas do modelo OSI de forma generalizada de acordo o apresentado por Tanenbaum em [11] e por Rochol em [12].

Figura 4 – Camada Física e Camada de Enlace do Modelo OSI

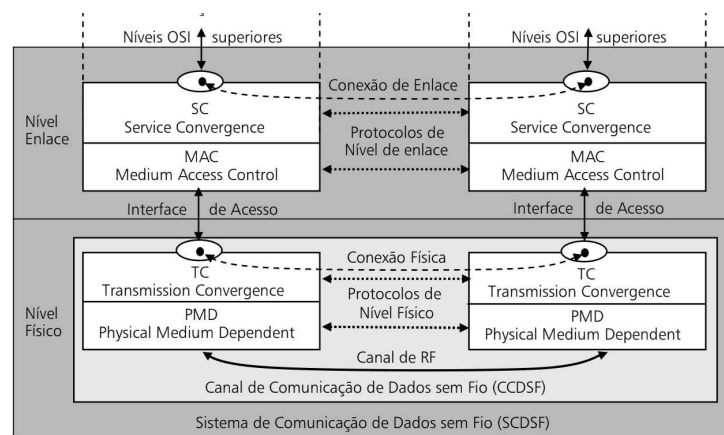


Imagem retirada do livro Sistemas de Comunicação Sem Fio [12].

### 2.2.1 Camada Física

A camada física 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. 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 é possível utilizá-los para detectar se algum bit da mensagem original foi modificado, podendo ser necessário uma retransmissão, ou talvez 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. E 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.

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 é aumentar a garantia de que os *bits* trafeguem na camada física livre de erros de transmissão. Esta camada faz com que o transmissor separe os dados e transmita cada parte de forma sequencial. Caso algum destas 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 Qualidade de Serviço, *Quality of Service*(QoS), 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 sensorar 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 uma 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 sensorar 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 as 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:

## Ruido

Em [12] é apresentado 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 2,4GHz. Este tipo de ruído gera sequências de erros na transmissão, mecanismos de controle de erro dificilmente irão corrigir devido a alta concentração de erros.

## Interferência

Interferência, segundo Rappaport em [14], 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 as mesmas faixas de frequência utilizados pelo sistema, por exemplo, na faixa ISM em torno das frequências 2,4GHz há uma sobrecarga pois as tecnologias como Bluetooth e Wi-Fi operam nesta faixa. Interferência co-canal, segundo [12], 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 [14]. A interferência de canal adjacente ocorre quando uma transmissão é realizada muito próxima de um receptor que está recebendo transmissões de um outro transmissor. A recepção é prejudicada podendo se tornar inviável durante a transmissão do transmissor próximo ao receptor [14].

## Propagação por Múltiplos Caminhos

Segundo Rochol em [12] ao ser irradiado 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, 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, este 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 intervalos diferentes. Causando que a recepção do sinal seja duplicada ou ocorra uma interferência destrutiva como no caso do desvanecimento.

No espalhamento de Doppler é observado uma diferença na frequência da portadora e é 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.

## Sombreamento

O efeito de sombreamento é definido como áreas onde sinal recebido apresenta baixa potência devida a 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 [11], sem coordenação e cooperação entre fabricantes de dispositivos, não seria possível a interoperabilidade de sistemas. Sistemas IoT, como demonstrado em [3], 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

LoRa, abreviação para Long Range, é uma tecnologia que utiliza o padrão LoRaWAN e um protocolo de acesso ao meio de mesmo nome. 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 sensoreando 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, America do Norte e Asia, 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* [13].

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. 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). Utiliza faixas de frequência não ocupadas no LTE. Seu protocolo é uma versão simplificada do protocolo LTE, com menos funcionalidades que o LTE, para melhor se adequar sua utilização para IoT, por exemplo, funções como monitoramento da qualidade do sinal ou conectividade dupla não são utilizadas, visando diminuir o uso de energia e aumentar a vida útil da bateria. Apresenta taxa 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 radio base mensagens utilizando a modulação BPSK, Binary Phase Shift Keying(Modulação por Deslocamento de Fase Binaria) utilizando bandas de frequência ultra-estreitas, 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 apresenta oferecer 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 payload máximo 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 1GHz 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 payload de 127 bytes [15] [6]. Este padrão é utilizado como base do ZigBee.

## Emenda 'g'

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 troca de faixa de comunicação, ocupação da largura de banda, taxa de transmissão de dados e confiabilidade da comunicação para melhor se adequar aos requisitos da aplicação. Assim, foi definido o padrão IEEE 802.15.4g que inclui as modulações SUN, *Smart Utility Network*(Redes de Utilidades Inteligentes) [16].

A seguir é apresentada uma visão geral das modulações:

### 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 [17].

Foi incluída no padrão por a 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 50 kbit/s.

### SUN-OQPSK

Originalmente, no 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, 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 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 [18].

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.

## 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 podendo o uso da 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, porém cada delas é ortogonal às suas subjacentes, garantindo que não haja interferência entre elas [14][18].

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.

## Diversidade de Modulação

Segundo Rappaport em [14], 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, sofreram das mesmas complicações, aumentando a probabilidade de receber um sinal com menor quantidade de erros [18]. Normalmente, são utilizadas técnicas de diversidade aumentando o número de antenas receptoras ou utilizando múltiplos canais de comunicação.

Como demonstrado pelos autores em [9] 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 a camada de aplicação como o PDR, *Packet Delivery Ratio*, Taxa de Entrega de Pacotes. Estas métricas são detalhadas a seguir.

### 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 [19]. O valor de RSSI é apresentado -100dB até 0dB, os maiores valores, próximos a 0dB, significam uma boa qualidade do sinal recebido e valores menores, próximos a 100dB, significa sinais de baixa qualidade.

### 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, por exemplo, aplicações industriais de alta capacidade necessitam de um PDR superior a 99,9%.

### 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

[refatorar] Em [8] os autores do artigo realizaram um experimento para analisar o comportamento das modulações SUN do padrão IEEE 802.15.4g em um cenário industrial. Em [15] os autores realizaram um estudo aprofundado sobre a modulação SUN-OFDM no ambiente predial, demonstrando, entre outras coisas, que a modulação SUN-OFDM nas faixas de frequência sub-GHz se é mais vantajosa de utilizar que a modulação OQPSK do padrão IEEE 802.15.4.

### 3 Experimento

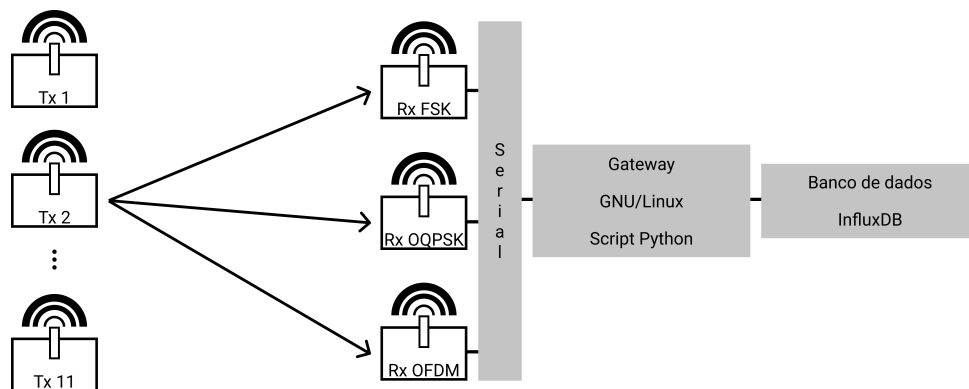
Nesta seção será apresentada como foi realizado o experimento de implementação de uma RSSF em um ambiente de Smart Building, utilizando a implementação do padrão IEEE 802.15.4g SUN dos dispositivos OpenMote-B. A finalidade deste experimento é avaliar as performance da rede analisando valores de RSSI e PDR obtidos.

O experimento foi realizado em um dos prédios do campus Campina Grande do IFPB, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. Sendo este constituído principalmente de salas de escritório e de alguns laboratórios, possuindo 4 andares separados por pisos de concreto. Este cenário é particularmente desafiador para um enlace sem fio pois não é possível ter uma linha de visada entre o transmissor e o receptor além de apresentar muito ocorrência de propagação por múltiplos caminhos e pode apresentar facilmente áreas de sombreamentos de sinais.

#### 3.1 Visão Geral

A rede foi composta por 11 dispositivos transmissores, denominado pelo restante do texto como Tx, que enviavam três replicas de mensagens, uma replica para cada modulação do padrão IEEE 802.15.4g SUN. Três receptores, denominado pelo restante do texto como Rx, foram configurados para receber mensagens em apenas uma das modulações do padrão. Os dispositivos Rx, conectados a um computador, enviavam as mensagens recebidas pelo rádio para a porta serial. O computador utiliza um sistema operacional baseado em GNU/Linux e executa um script Python que lê as mensagens seriais enviadas pelos dispositivos Rx, estruturava os dados no formato JSON e os persistia no banco de dados InfluxDB. A figura 5 representa uma visão geral do funcionamento da rede.

Figura 5 – Visão Geral da Rede.



Fonte autoral.

Os dispositivos Tx foram espalhados pelos quatro andares do prédio, posicionados em canaletas, como demonstrado na figura 6, e no interior de uma sala. Enquanto que os dispositivos Rx foram colocados no interior do laboratório GComPI, presente no primeiro piso do prédio.

Figura 6 – Exemplo de Local 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. Neste processador também vem embarcado um transceptor com suporte ao padrão IEEE 802.15.4 que utiliza a modulação DSSS-OQPSK na faixa ISM de 2,4GHz. Possui também o transceptor AT86RF215 da ATMEL que implementa as três configurações do padrão IEEE 802.15.4g nas faixas ISM abaixo das faixas 1GHz e na faixa ISM 2,4GHz [20].

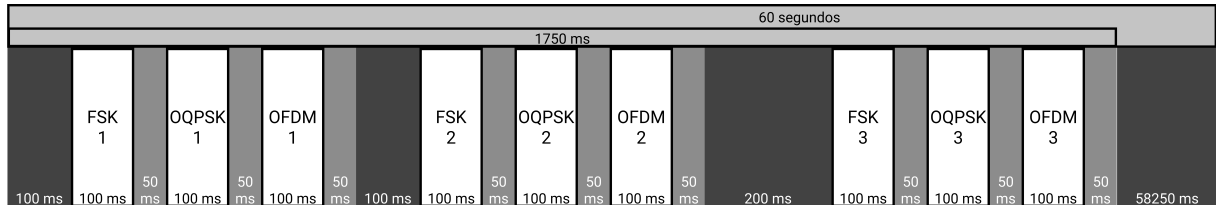
Para a realização do experimento, o código base do firmware dos dispositivos está presente no repositório [10]. Foram realizadas alterações ao código base e estão disponíveis no repositório [21].

## 3.3 Transmissão dos dados

Os dispositivos foram configurados para realizar, a cada minuto, três ciclos de envio de mensagens, como representado na figura 7, em cada ciclo é transmitido três mensagens,

uma para cada modulação do padrão. A cada envio de mensagem o dispositivo espera 50 ms e a cada ciclo de envio o dispositivo espera 100 ms, do primeiro para o segundo ciclo, ou 200 ms, do segundo para o terceiro ciclo. Ao realizar os três ciclos de transmissão, o dispositivo entra em modo *sleep* por 58250 ms totalizando assim 60 segundos para o envio de nove mensagens, cada transmissão (com uma carga útil de 32 *bytes*) leva um total de 100 ms, para a taxa de transmissão de 50 *kbit/s*.

Figura 7 – 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 uma letra 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 senseou o canal de radiofrequência antes de realizar a transmissão, o valor pode ir de 1 até 3, caso chegue na terceira tentativa o dispositivo não realiza a transmissão;
- Valor de RSSI do transmissor: 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 ms, 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 descritos as configurações de operação 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)	902,2	904	902,8
Largura de banda do canal (MHz)	0,2	2000	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

Tabela 1 – Configurações utilizadas de cada modulação.

### 3.4 Recepção e Persistência dos dados

Os dispositivos Rx foram configurados para, a cada sinal recebido, verificar o valor de RSSI da transmissão e concatenar este valor na sequência de bytes recebidas. 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 [11]. Então, essa sequência é transmitida pela porta serial para o computador no qual os dispositivos Rx estão conectados.

No computador conectado, as mensagens serial recebidas são capturadas por 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 chamada dicionário. Cada chave é um dos campo citado na seção 3.3 e o RSSI adicionado pelo dispositivo Rx. Nesta mesma 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 no qual 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. No qual, utiliza-se uma função para enviar os dados estruturados para o banco de dados. O banco de dados utilizado foi o InfluxDB, um banco de dados não-relacional de series temporais otimizado para armazenar dados com marcas temporais, ou seja, os dados armazenados estão relacionados a um intervalo específico [22].

# 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 3.
- 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](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 3.
- 3 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 3 e 13.
- 4 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 na página 3.
- 5 ZHANG, L. et al. A remote medical monitoring system for heart failure prognosis. *Mobile Information Systems*, Hindawi, v. 2015, 2015. Citado na página 3.
- 6 GOMES, R. D. et al. Estimacão de qualidade de enlace e alocao dinâmica de canais em redes de sensores sem fio industriais. Universidade Federal de Campina Grande, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 15.
- 7 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 4.
- 8 TUSET-PEIRÓ, P. et al. A dataset to evaluate iee 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 2 vezes nas páginas 5 e 17.
- 9 GOMES, R. D.; TUSET-PEIRÓ, P.; VILAJOSANA, X. Improving link reliability of iee 802.15. 4g sun networks with adaptive modulation diversity. Preprints, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 16.
- 10 TUSET-PEIRÓ, P.; VILAJOSANA, X. *openmote/openmote-fw*. [S.l.]: GitHub, 2019. <<https://github.com/openmote/openmote-fw>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 19.
- 11 TANEMBAUM, A.; WETHERALL, D. *Redes de Computadores*. [S.l.]: Pearson Education, 2011. Quarta Edio. ISBN 978-85-7605-924-0. Citado 4 vezes nas páginas 7, 9, 13 e 21.
- 12 ROCHOL, J. *Sistemas de comunicao sem fio: conceitos e aplicaes*. [S.l.]: Bookman Editora, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 7, 9 e 12.
- 13 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 9 e 14.



- 14 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 12 e 16.
- 15 MUÑOZ, J. et al. Overview of ieee802. 15.4 g 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 15 e 17.
- 16 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 15.
- 17 LATHI B. P; DING, Z. *Sistemas de Comunicações Analógicos e Digitais Modernos*. [S.l.]: LTD Editora Ltda., 2012. Quarta Edição. Citado na página 15.
- 18 GOLDSMITH, A. *Wireless communications*. [S.l.]: Cambridge university press, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- 19 METAGEEEK. *Understanding RSSI*. <<https://www.metageek.com/training/resources/understanding-rssi.html>>. Acessado em: 27 fev. 2020. Citado na página 17.
- 20 INDUSTRIAL SHIELDS. *OpenMote B User Guide*. [S.l.], 2019. Rev. 3. Citado na página 19.
- 21 FERREIRA FELIPE; TUSET-PEIRÓ, P.; VILAJOSANA, X. *gcompi-ifpb/openmote-fw*. [S.l.]: GitHub, 2021. <<https://github.com/GComPI-IFPB/openmote-fw>>. Citado na página 19.
- 22 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 22.