



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

Lista de ilustrações

Figura 1 – Internet of Things (IoT)	7
Figura 2 – RSSF - Topologia Estrela	8

Lista de tabelas

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
abnTeX	ABsurdas Normas para TeX

Lista de símbolos

Γ	Letra grega Gama
Λ	Lambda
ζ	Letra grega minúscula zeta
\in	Pertence

Sumário

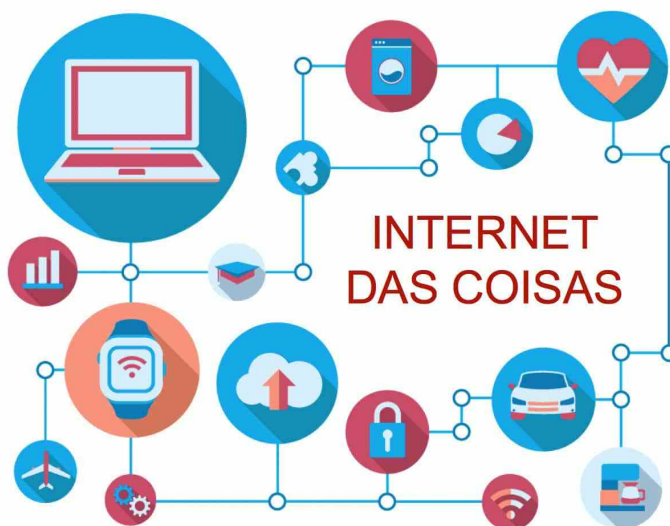
1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Justificativa e Relevância do Trabalho	9
1.2	Objetivos	10
1.2.1	Objetivo Geral	10
1.2.2	Objetivos Específicos	10
1.3	Metodologia	10
1.4	Organização do Documento	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1	Classificação de redes	11
2.1.1	Classificação de redes sem fio: escala de abrangência	11
2.2	Modelo de camadas OSI	13
2.2.1	Camada física	13
2.2.2	Camada de enlace	14
2.3	Problemas da comunicação sem fio	15
2.4	Padrões e tecnologias de comunicação para redes LPWAN	17
2.4.1	LoRa	17
2.4.2	NB-IoT	17
2.4.3	SigFox	18
2.4.4	IEEE 802.15.4	18
2.5	Parâmetros para avaliação da confiabilidade do enlace sem fio	20
2.6	Trabalhos relacionados	21
3	EXPERIMENTO	22
3.1	Materiais utilizados	22
3.2	Funcionamento da Rede	22
	REFERÊNCIAS	23

1 Introdução

IoT é um conceito que 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 de baterias e otimização do uso destas; definição de novos protocolos de rede; e aumento da robustez de protocolos de comunicação sem-fio.

A Internet das Coisas, representado na figura 1, 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 P&G, 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 internet onde 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].

Figura 1 – Internet of Things (IoT)



Retirado do site

<http://sentrybrasil.com.br/cursos/internet-das-coisas-vai-revolucionar-o-mercado/>

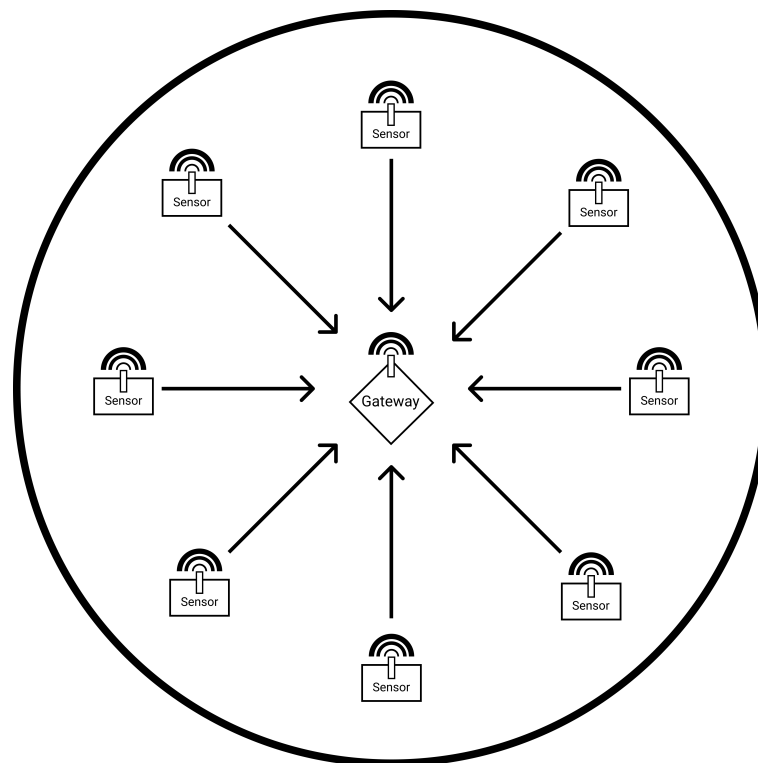
Atualmente há diversas aplicações de IoT, desde implementações em larga escala como cidades inteligentes conforme descrito em [3], onde em Santander na Espanha é implantado por toda a cidade nós com múltiplos sensores afim de disponibilizar uma plataforma de testes. Aplicações de smart campus como apresentada em [4] que mostra a aplicação de uma rede de sensores sem fio para verificar a qualidade do ar. Aplicações de saúde como em [5], onde é coletado e analisado em tempo real informações de pressão

sanguínea e peso corporal do paciente, estes dados são utilizados então 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 nó 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 existem duas abordagens clássicas, conexões cabeadas entre os nós da rede e a utilização de redes sem fio [6]. Como vantagem em relação à redes sem fio, as conexões cabeadas apresentam maior confiabilidade na conexão. Em contrapartida, a utilização de redes sem fio se destaca, em relação a redes cabeadas, nos quesitos de flexibilidade, custo de implantação, facilidade e rapidez na implementação e na manutenção [7].

As vantagens que Redes de Sensores Sem Fio(RSSF), representado na figura 2 apresentam fazem estas se destacarem na implementação de aplicações IoT, porém há 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 multi 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 transferência com uma latência baixa. Em redes de curto alcance, o Bluetooth, baseado no padrão IEEE 802.15.1, se tornou trivial na vida das pessoas através do uso para conexão de fones de ouvido, teclados e mouses sem fio. Estes padrões, apesar de já 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 continua de energia.

Tendo em vista este problema energético, alguns padrões foram desenvolvidos para oferecer uma comunicação de qualidade e focando em eficiência energética para a utilização de baterias. Iniciativas de privadas desenvolveram, por exemplo, o SigFox e LoRa. O IEEE desenvolveu o padrão 802.15.4 e o aprimorou ao longo dos anos adicionando emendas, que foram responsáveis pelo desenvolvimento de aplicações como ZigBee e Wi-SUN. A 3rd Generation Partnership Project, 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 uma 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. Este experimento foi realizado em um cenário industrial, durando um total de 99 dias gerou um conjunto de dados que foi utilizado para averiguar a confiabilidade da rede. Os dados foram analisados e utilizados para propor mecanismos de diversidade de modulação que, como mostrado em [9], pode melhorar a taxa de entrega de pacotes.

O cenário industrial apresenta diversos problemas, principalmente relacionados à interferência e propagação multi-caminho. Diferentes ambientes possuem diferentes problemas em relação a comunicação via rádio. Então, pensando em analisar os efeitos da propagação de ondas de rádio em outro cenário, este trabalho então se propõe a 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 maior fonte de problemas para a comunicação a falta de linha de visada. Estudando o comportamento da RSSF a partir da verificação da taxa de entrega de pacotes. E portanto, analisando a viabilidade da rede a partir da tecnologia utilizada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Implantar uma RSSF e coletar as informações das transmissões realizadas através das modulações definidas pelo padrão IEEE 802.15.4g e analisar o comportamento destas no cenário de Smart Building.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Implementar uma rede sem fio utilizando transceptores das modulações do IEEE 802.15.4g;
- Coletar, armazenar e disponibilizar os dados relativos as transmissões realizadas;
- Analisar os dados e gerar informações a respeito da comunicação entre dispositivos neste cenário.

1.3 Metodologia

Para alcançar os objetivos acima, foram realizados os seguintes passos:

- [refatorar] Estudo e implementação dos dispositivos: Os dispositivos utilizados neste projeto possuem o código disponível em um repositório github [10]. Bem como algumas alterações no código fonte para esta aplicação;
- [refatorar] Persistência dos dados: Desenvolvimento de um script responsável por coletar e persistir os dados gerados em um banco de dados InfluxDB;
- [refatorar] Rodar o experimento: Distribuição dos nós transmissores pelo prédio e instalação dos softwares e scripts necessários para persistencia dos dados;
- [refatorar] Analise dos resultados: A partir dos dados coletados e salvos localmente, foram feitas análises e gerado informações as quais estarão na seção de resultados.

1.4 Organização do Documento

[todo] A ser feito quando o documento tiver pronto

2 Fundamentação Teórica

Nesta seção será abordados os conceitos fundamentais que foram utilizados como base teórica para o desenvolvimento do projeto apresentado na seção 3. Primeiramente será apresentado como são categorizados as redes de telecomunicações sem fio de acordo a sua área de abrangência destacando no final uma nova categoria desenvolvida para melhor atender as especificações de aplicações IoT. Em seguida será exposto as camadas física e de enlace, e suas sub-camadas, do modelo OSI. Logo após será mostrado alguns problemas enfrentados na implementação de redes sem fio. Posteriormente será evidenciado os principais padrões e tecnologias desenvolvidas para as redes de baixa potencia e de longo alcance. Em seguida será apresentado os parâmetros utilizados no experimento para medir a confiabilidade do enlace sem fio. Por fim, será então mostrado trabalhos relacionados ao apresentado neste documento

2.1 Classificação de redes

Segundo Tanembaum em [11], redes de telecomunicações são classificadas, comumente, de acordo com sua escala de abrangência. Esta classificação é importante pois diferentes tecnologias e padrões são criados para atacar problemas específicos destas redes. Abaixo serão apresentadas as classificações mais relevantes para o escopo deste trabalho de acordo Rochol em [12].

[todo] imagem das redes PAN, LAN, WAN etc

2.1.1 Classificação de redes sem fio: escala de abrangência

Redes sem fio pessoais - WPAN

Inicialmente estas redes foram definidas para possuir alcance limitado com a principal função de facilitar a conectividade de dispositivos periféricos ao computador ou telefone celular através de 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 WPANs é o Bluetooth, baseado no 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 de anticolisão e de condução automática em veículos, automação industrial, prédios inteligentes, monitoração de pacientes entre várias outras.

Então, basicamente temos redes WPAN para interconexão de dispositivos onde o Bluetooth é a tecnologia mais proeminente no mercado. E Redes de Sensores Sem Fio WPAN implementadas, principalmente, com a tecnologia ZigBee, que implementa a camada física padronizada pela IEEE 802.15.4.

Redes sem fio locais - WLAN

São redes com a finalidade de conectar computadores de casas, escritório ou prédio em uma rede privada. Neste tipo de rede, a tecnologia Wi-Fi se tornou extremamente popular sendo adotado praticamente em todo computador e dispositivos moveis como *smartphones* e *tablets*. O Wi-Fi é baseado no padrão IEEE 802.11.

Inicialmente, foi definido no padrão a utilização da faixa de frequência ISM de 2.4GHz. Com novas emendas do padrão IEEE 802.11 foi adicionado a faixa de frequência ISM 5GHz possibilitando maiores taxas de transferência para dispositivos próximos. Como utiliza uma faixa de frequência livre, é comum ter interferência com outras redes Wi-Fi e com redes formadas por outras tecnologias que atuam na mesma faixa de frequência, como é o caso do Bluetooth e ZigBee que atuam na faixa de frequência de 2.4GHz.

Redes celulares de telefonia e dados

Estas redes compreendem diversos sistemas de telefonia conectados e ganharam bastante popularidade nas ultimas décadas devido, principalmente pela redução de custos e aumento nas taxas de transferência 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.

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

Redes de longa distância com baixo consumo energético - LPWAN

Algumas aplicações IoT possuem 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 uma grande área de cobertura. Aplicações de telefonia celular apesar de conseguirem abranger uma grande área, possuem um consumo energético excessivo. Então, estas 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, cerca de até alguns quilômetros, com baterias que podem durar anos com uma única carga [13].

A utilização deste tipo de rede se tornou fundamental para a implementação de RSSFs, oferecendo confiabilidade e baixo custo de implantação e manutenção para redes sem fio. Na seção 2.4 serão apresentadas alguns dos principais padrões e tecnologias utilizadas nestas 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 importante passo para a padronização de redes de computadores definindo como um sistema aberto a conexão de outros sistemas deve funcionar. O modelo possui sete camadas e cada uma possui uma função bem definida. A comunicação entre camadas é abstraída e se dá através de interfaces, ou seja, uma camada é cega para o que acontece nas camadas subjacentes, desde que a informação que chegue até ela obedeça o padrão pré-definido.

[todo] imagem das camadas osi

Para este trabalho será mais relevante a apresentação apenas das camadas 1 e 2, 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].

2.2.1 Camada física

A camada física é uma abstração do meio físico de comunicação por onde trafegado os bits e define nas duas pontas da comunicação, por exemplo, o que deve ser considerado um bit 1 ou um bit 0; quantos nanosegundos é a duração total de um bit; se a transmissão pode ser realizada pelos dois lados ao mesmo tempo ou cada lado pode transmitir apenas quando o outro lado não transmitir; entre outras definições para se manter a conexão desta camada. Possui duas sub-camadas: sub-camada de convergência de transmissão do nível físico e a sub-camada dependente do meio.

A sub-camada de convergência de transmissão é o responsável pela codificação do canal, para obter maior robustez e confiabilidade na transmissão dos dados em função mesmo considerando as características problemáticas do canal de rádio frequência. À está camada está incumbida algumas funções como:

- Embaralhamento do fluxo de bits:

Garante que os bits 1 e 0 tenham a mesma probabilidade antes de serem enviados para transmissão. Ao realizar esta tarefa, a utilização do canal será 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 original.

- Entrelaçamento de bits:

Uma técnica que utiliza algoritmos de distribuição temporal dos bits da mensagem para espalhar a concentração de erros ao longo de todo o fluxo de dados. Tornando mais fácil a utilização das técnicas de controle de erros. Estes algoritmos são pré-definidos na fonte e destino.

A segunda sub-camada presente na camada física é a camada dependente do meio e aqui é implementado as funcionalidades dos transceptores de dados. Os protocolos aplicados no nível físico podem ser um protocolo único, em dispositivos e aplicações mais simples, ou vários protocolos trabalhando em conjunto com várias sub-camadas internas no caso de aplicações mais complexas.

Há várias técnicas de transmissão e recepção de dados, porém, forma geral, é possível agrupá-las em três grandes classes. Abaixo elas estão apresentadas em ordem crescente de complexidade:

1. Técnicas de codificação por pulsos ou codificação de banda base;
2. Processos de modulação de um ou mais parâmetros de portadora eletromagnética única;
3. Processo de modulação e transmissão utilizando múltiplas portadoras. Estas portadoras podem ser caracterizadas no domínio da frequência, utilizando múltiplas portadoras do tipo OFDM, Multiplexação por divisão de Frequências Ortogonais. Ou podem ser caracterizadas no domínio do tempo como ocorre no CDMA, Acesso Múltiplo por Divisão de Código, onde diferentes códigos ortogonais são aplicados simultaneamente sobre uma portadora digital gerando vários espectros ao redor de uma única portadora analógica, esta técnica também é conhecido como espalhamento espectral.

2.2.2 Camada de enlace

A principal tarefa desta camada é transformar os bits brutos que trafegam na camada física em uma mensagem livre de erros de transmissão, para isso 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 esta parte

pode ser retransmitida. A camada de enlace possui duas sub-camadas: a sub-camada de convergência de serviço e a sub-camada de acesso ao meio.

A sub-camada de convergência de serviço é responsável por atender os requisitos de Qualidade de Serviço, *Quality of Service*(QoS), da aplicação, como taxa de transferência, atraso máximo de pacotes, taxa de perda de pacotes entre outras exigências da aplicação.

A sub-camada de controle de acesso ao meio, ou *Medium Access Control*(MAC), possui grande importância em comunicações sem fio. Esta sub-camada define como será dado o acesso ao meio de comunicação e, dependendo do protocolo utilizado, quem tem a vez de utilização do meio. Há, principalmente, duas famílias de protocolos MAC utilizados em comunicações sem fio, ALOHA e CSMA.

O protocolo ALOHA puro define que quem possuir dados a ser enviados deve enviar, mesmo que isto cause colisões de pacotes, porém, ao transmitir, deverá escutar 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 recebimento da mensagem. Uma variação deste 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. Para tal deveria ter uma sincronia entre todos os integrantes da rede para transmitir apenas nos intervalos de tempo certo.

O protocolo CSMA, Acesso Múltiplo com Detecção de Portadora(*Carrier Sense Multiple Access*), procura melhor utilizar o canal evitando a colisão de pacotes. Para tal o transmissor tem que escutar 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 o canal estiver livre para transmitir ou transmite após um intervalo aleatório de tempo.

2.3 Problemas da comunicação sem fio

Como já apresentado, redes sem fios apresentam diversas vantagens em relação à redes cabeadas. 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 pode ser um problema para uma recepção clara do sinal.

Abaixo serão apresentados alguns dos principais problemas que dificultam a recepção de sinais de rádio de acordo apresentado pelos respectivos autores em [6], [14] e [12]:

Ruido

Ruído é caracterizado como uma interferência eletromagnética aleatória causada pela agitação térmica das moléculas dos condutores. Ou seja, a elevação da energia térmica dos componentes do equipamento transmissor gera interferência na própria transmissão. Este ruído, em sistemas de comunicação sem fio, é chamado de Ruido gaussiano aditivo branco ou AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) pois este ruído é adicionado ao sinal da portadora e ao canal de rádio.

Interferência

Interferência é caracterizada como a ação de sinais eletromagnéticos de fontes externas sobre um canal de radiofrequência. Normalmente dispositivos, principalmente os focados na criação de RSSFs, utilizam as faixas de frequência abertas para aplicações industriais, científicas e médicas, as chamadas faixas de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), portanto estes dispositivos disputam as mesmas faixas de frequência. Em especial, na faixa de frequência ISM de 2.4GHz há uma sobrecarga pois as tecnologias como Bluetooth e Wi-Fi operam nesta faixa, além de interferência de dispositivos que não são para comunicação como fornos micro-ondas que geram muito barulho nesta faixa.

Muitas vezes, como forma de regulamentar estas faixas de frequência, dispositivos são obrigados a operar com uma potência de transmissão menor ou devem operar sob um ciclo de trabalho reduzido.

Propagação por múltiplos caminhos

Ao ser irradiado pela antena, a onda eletromagnética do sinal pode sofrer inúmeras reflexões em obstáculos até chegar ao receptor. Este fenômeno denominado de propagação por multi-caminho, ou *multi-path*, causa três efeitos no sinal eletromagnético: desvanecimento, espalhamento de atraso e espalhamento de Doppler.

O desvanecimento é causado quando vários sinais chegam à antena receptora com diferenças de fase que fazem elas se somarem de forma destrutiva o que gera causa uma recepção de má qualidade do sinal original, este efeito pode também gerar áreas de sombras do sinal. Os diversos sinais refletidos podem também se somar de forma construtiva melhorando a recepção do sinal em alguns pontos do espaço.

Os múltiplos caminhos que o sinal percorre no ambiente devido às reflexões e espalhamentos fazem com que alguns sinais cheguem ao receptor em tempos diferentes realizando o efeito de espalhamento de atraso. O espalhamento de Doppler é análogo ao espalhamento de atraso de tempo porém no espectro da frequência e ocorre principalmente quando o receptor do sinal está em movimento.

Sombreamento

O efeito de sombreamento é definido como áreas onde sinal recebido possui uma baixa potência devido a obstruções entre o transmissor e o receptor. Onde a recepção dos sinais é dada principalmente por reflexões do sinal, sendo que os múltiplos caminhos que o sinal podem percorrer para chegar no local do receptor podem ter uma 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 as fabricantes de dispositivos haveria o caos completo onde não seria possível a interoperabilidade de sistemas. Sistemas IoT, como demonstrado em [3], podem ter apresentar sistemas diferentes com vários dispositivos. Portanto a padronização das telecomunicações são imprescindíveis atualmente. Permitindo 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. Modula sinais sub-GHz na faixa ISM utilizando uma técnica de modulação privada chamada Chirp Spread Spectrum. que espalha um sinal de banda curta por todo um canal de banda larga, esta técnica possibilita uma maior resistência a interferências e torna mais difícil detectar ou obstruir o canal de comunicação. A taxa de transferência pode variar de 300 bits/s a até 50 kbits/s, dependendo do fator de espalhamento utilizado na comunicação. O payload máximo de uma mensagem é 243 bytes [13].

A tecnologia LoRa é desenvolvida pela empresa estadunidense SemTech e o padrão LoRaWAN é mantido pelo consorcio 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. Utiliza faixas de frequência não ocupadas da faixa de frequência LTE. Seu protocolo é baseado em uma versão simplificada do protocolo LTE, que reduz as funcionalidades do 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. Possui taxa transferência máxima de 200 kbits/s e seu payload máximo 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 utilizando bandas de frequência ultra-estreitas, até 100 Hz, na faixa de frequência ISM. Como utiliza uma faixa de frequência ultra estreita é bastante eficiente energeticamente e bastante resistente à interferência. Porém, não pode oferecer taxas de transferência acima de 100 bits/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

O padrão IEEE 802.15.4 define em seu texto, camadas físicas e de acesso ao meio utilizando a faixa ISM sub-GHz e 2.4 GHz, utilizando, respectivamente, as modulações BPSK e O-QPSK. Possuindo uma taxa de transferência máxima de 250 kbits/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 para a utilização do ZigBee.

Emenda 'g'

Em 2015 foi proposto uma revisão que incorpora uma novo esquema de modulações para permitir uma melhor volatilidade entre a faixa de comunicação, ocupação da largura de banda, taxa de transferência de dados e confiabilidade da comunicação para melhor se adequar com a aplicação. O padrão então foi adotado como uma emenda ao padrão de 2003, definindo assim o padrão IEEE 802.15.4g que incluía as modulações SUN (Redes de Utilidades Inteligentes, Smart Utility Network) [16].

A seguir uma visão geral das modulações SUN de acordo apresentado em [16]:

SUN-FSK

A técnica de modulação digital FSK ou Chaveamento de Mudança de Frequência, *Frequency Shift Keying*, altera a frequência, mantendo a amplitude constante, da portadora de acordo com um sinal digital e os dígitos de informação são transmitidos através do chaveamento de diferentes frequências [17].

Foi incluída no padrão devido a sua eficiência e compatibilidade com sistemas legado. Possui 3 modos de operação para cada uma das faixas de frequência definidas no padrão e possui parâmetros de canal e de modulação, nos quais é possível definir o tipo de

modulação, o espaçamento do canal e o índice de modulação. Estes parâmetros definem uma faixa de taxa de transferência de 50 kbits/s a até 50 kbits/s.

SUN-OQPSK

Originalmente no padrão IEEE 802.15.4 foi adicionado a técnica de modulação DSSS-OQPSK, Direct Sequence Spread Spectrum Offset Quadrature Phase Shift Keying, que se trata de uma técnica de modulação que utiliza do 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. Estas técnicas visam aumentar a taxa de transferência e aumentar a robustez da transmissão, principalmente tornando o sinal imune a interferência de faixa estreita, ruídos e diminuindo os efeitos de desvanecimento por múltiplos caminhos [18].

Esta 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 transferência entre 6.25 kbits/s a até 500 kbits/s.

SUN-OFDM

O esquema de modulação de OFDM ou Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, divide os dados a serem transmitidos em sub-canais ortogonais centrados em sub-portadoras com frequências diferentes. Estas sub-portadoras são comprimidas em uma faixa de frequência podendo assim melhor utilizar a largura de banda disponível e como é possível enviar dados por cada uma das sub-portadoras é possível também ter uma elevada taxa de transferência. As frequências de cada sub-portadora se sobrepõem, porém cada uma destas estão ortogonais as suas subjacentes garantindo que não haja interferência entre si [14][18].

Esta modulação consegue prover altas taxas de transferência e maiores faixas de comunicação, enquanto consegue lidar com interferência e propagação por multi-caminho. Utiliza diferentes Esquemas de Modulação e Codificação para alternar em modulações, como BPSK, QPSK e 16-QAM, e esquemas de repetição de frequência para prover uma faixa de taxa de transferência 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 no canal de atenuação. Melhorando a qualidade do enlace de comunicações sem fio sem alterar a interface de ar comum, sem aumentar a potência ou a largura de banda transmitida.

A ideia por trás de diversidade é que diferentes sinais serão enviados por diferentes caminhos e portanto, dificilmente, sofreram das mesmas complicações, aumentando assim 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 para mensagens podendo utilizar modulações específicas de acordo com as variações do ambiente ou enviar repetições da mensagem em mais de uma modulação, então, podendo aumentar 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 a camada física, como RSSI, e outras estão mais relacionadas a camada de aplicação como PDR. Estas serão melhor detalhadas abaixo.

RSSI

Received Signal Strength Indicator, Indicador da Força do Sinal Recebido em tradução livre, é uma medida da energia total presente em um sinal de rádio recebido. RSSI é um valor relativo e pode variar de acordo com a fabricante do transceptor de rádio [19]. Geralmente o valor de RSSI é apresentado em números negativos que vão de -100 até 0, onde valores próximos de -100 são sinais de baixa qualidade e sinais com valores próximos a 0 são de ótima qualidade.

PDR

Packed Delivery Ratio, Taxa de Entrega de Pacotes, é um indicador de camada de aplicação que relaciona a quantidade de pacotes recebidos pelo receptor pela quantidade de pacotes enviados pelo transmissor. O PDR pode ser um valor importante para medir um enlace de dados, pois dependendo da aplicação há uma taxa mínima de entrega de pacotes, por exemplo, algumas aplicações industriais necessitam de um PDR superior a 99.9%

CCA

Clear Channel Assessment, Avaliação do Canal Limpo, é uma forma de verificar o canal antes da transmissão, afim de detectar se ele está em uso. Obtido através da

verificação da energia presente no canal e é medido em dBm. Caso o valor medido esteja acima de um limiar pré-determinado o transmissor não pode transmitir e esperará 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

Neste trabalho, foi realizado um experimento em um ambiente de Smart Building, utilizando o padrão IEEE 802.15.4g SUN. A finalidade deste experimento é avaliar as performance da RSSF analisando valores de RSSI e PDR obtidos considerando uma rede formada por 11 dispositivos transmissores, denominados neste texto como Tx, e 3 dispositivos receptores, denominados neste texto como Rx.

O experimento foi realizado em um dos prédios do campus Campina Grande do Instituto Federal da Paraíba(IFPB). Sendo este constituído principalmente de salas de escritório e de alguns laboratórios, possuindo 4 andares separados por grossos 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 multi-caminho e pode apresentar facilmente áreas de sombreamentos de sinais.

Os dispositivos Tx foram espalhados pelos quatro andares do prédio, posicionados em canaletas e no interior de uma sala. Enquanto que os dispositivos Rx foram colocados no interior do laboratório GComPI, presente no primeiro piso do prédio. Os Tx enviavam mensagens nas três modulações SUN e cada Rx foi programado para receber mensagens de apenas uma modulação SUN. Sendo assim os 11 dispositivos Tx enviavam mensagens para cada um dos Rx que encaminhavam as mensagens e as informações de RSSI da mensagem para a porta serial que estavam conectados. Um script python rodando em um sistema operacional Linux captava as mensagens seriais, formatava e persistia estes dados em um banco de dados. Na seção 3.2 será detalhada melhor o funcionamento de cada componente do experimento.

Abaixo esta descrito os materiais(hardware e software) utilizados neste projeto bem como o detalhamento do experimento.

3.1 Materiais utilizados

Openmote-B

InfluxDB

3.2 Funcionamento da Rede

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 7.
- 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_iiot_102413_final_portuguese.pdf>. Acessado em: 27 fev. 2020. Citado na página 7.
- 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 7 e 17.
- 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 7.
- 5 ZHANG, L. et al. A remote medical monitoring system for heart failure prognosis. *Mobile Information Systems*, Hindawi, v. 2015, 2015. Citado na página 7.
- 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 3 vezes nas páginas 8, 15 e 18.
- 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 8.
- 8 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 2 vezes nas páginas 9 e 21.
- 9 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 9 e 20.
- 10 TUSET, X. V. P. *openmote-fw*. [S.l.]: GitHub, 2019. <<https://github.com/openmote/openmote-fw>>. Citado na página 10.
- 11 TANEMBAUM, A.; WETHERALL, D. *Redes de Computadores*. [S.l.]: Pearson Education, 2011. Quarta Edi o. ISBN 978-85-7605-924-0. Citado 3 vezes nas páginas 11, 13 e 17.
- 12 ROCHOL, J. *Sistemas de comunica o sem fio: conceitos e aplica es*. [S.l.]: Bookman Editora, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 11, 13 e 15.
- 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 13 e 17.

- 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 15 e 19.
- 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 18 e 21.
- 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 18.
- 17 LATHI B. P; DING, Z. *Sistemas de Comunicações Analógicos e Digitais Modernos*. [S.l.]: LTD Editora Ltda., 2012. Quarta Edição. Citado na página 18.
- 18 GOLDSMITH, A. *Wireless communications*. [S.l.]: Cambridge university press, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- 19 METAGEEEK. *Understanding RSSI*. <<https://www.metageek.com/training/resources/understanding-rssi.html>>. Acessado em: 27 fev. 2020. Citado na página 20.