

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**TIAGO ANTÔNIO INGRÁCIO KRANZ**

**MONITORAMENTO E SINALIZAÇÃO  
DE EVENTOS BASEADO EM REDES  
DE SENSORES SEM FIO**

Porto Alegre  
2022

**TIAGO ANTÔNIO INGRÁCIO KRANZ**

**MONITORAMENTO E SINALIZAÇÃO  
DE EVENTOS BASEADO EM REDES  
DE SENSORES SEM FIO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Controle e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Edison Pignaton de Freitas

Porto Alegre  
2022

**TIAGO ANTÔNIO INGRÁCIO KRANZ**

**MONITORAMENTO E SINALIZAÇÃO  
DE EVENTOS BASEADO EM REDES  
DE SENSORES SEM FIO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS  
Doutor pela Technische Universitat Stuttgart, Alemanha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João Cesar Netto, UFRGS  
Doutor pela Universidade Católica de Louvain, Bélgica

Prof. Dr. Altamiro Amadeu Susin, UFRGS  
Doutor pelo Instituto Politécnico Nacional de Grenoble, França

Prof. Dr. Ivan Müller, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner

Porto Alegre, julho de 2022.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos e minha esposa.

Por fim, dedico este trabalho à Deus, por estar sempre ao meu lado me ouvindo e me protegendo nas horas mais difíceis.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de pesquisa nas minhas áreas de interesse.

Ao Prof. Carlos, agradeço a todo o tempo que dedicaste a me orientar no trabalho de dissertação.

Ao Prof. Edison, agradeço por me co-orientar e estar sempre disposto à ajudar durante meu percurso no PPGEE.

A todas as pessoas que se fizeram presentes nessa etapa da minha vida me apoiando para que a conclusão deste curso fosse possível.

## RESUMO

Avanços recentes em tecnologias sem fio e sistemas embarcados permitiram a popularização da internet das coisas (IoT) e redes de sensores sem fio (RSSF), em aplicações importantes como edifícios inteligentes, segurança, rastreamento, automação industrial etc. Em RSSF, algoritmos de comunicação eficientes são de suma importância para atender aplicações com resposta temporal adequada e que permitam estender a vida útil de nós sensores alimentados por bateria. Neste contexto, protocolos de camada MAC, são responsáveis por realizarem o controle do rádio do nó sensor, sendo de fundamental importância na eficiência energética e de comunicação. Neste trabalho é realizada uma análise dos protocolos de camada MAC, avaliando o atraso fim-a-fim da comunicação e o consumo de energia de um nó sensor sem fio através de simulação de software. Também foi realizado um experimento com a RSSF padronizada Zigbee. Tanto a simulação quanto o experimento foram realizados analisando a utilização da RSSF para uma aplicação de monitoramento e sinalização de eventos prediais, avaliando as características temporais das respostas, confrontando com a regulamentação existente de sistemas de detecção e alarme de incêndio (SDAI). Os resultados das simulações demonstraram que protocolos de camada MAC assíncronos consomem menos energia em comparação aos protocolos síncronos, possibilitando estender a duração da bateria e conseguindo atender os requisitos temporais de SDAI. Os experimentos com RSSF Zigbee demonstraram que é possível estabelecer uma arquitetura de RSSF em um prédio atendendo requisitos temporais regulamentados para eventos de alarme e falha.

**Palavras-chave:** Internet das Coisas, Rede de Sensores Sem Fio, Prédios Inteligentes, Monitoramento, Sinalização de Eventos, Protocolo de Camada MAC, ZigBee.

## **ABSTRACT**

Recent advances in wireless technologies and embedded systems have enabled a dissemination of the internet of things (IoT) and wireless sensor networks (WSN), in important applications such as smart buildings, security, tracking, industrial automation, etc. In WSN, efficient communication algorithms are of paramount importance to meet applications with adequate temporal response and that allow a long useful lifetime for battery-powered sensor nodes. In this context, MAC layer protocols, are responsible for controlling the sensor node radio, being of fundamental importance in energy and communication efficiency. In this work, an analysis of MAC layer protocols is performed, evaluating the end-to-end communication delay and energy consumption of a wireless sensor node through software simulation. An experiment was also carried out with the Zigbee standardized WSN. Both the simulation and the experiment were carried out evaluating the use of WSN for a monitoring and signaling application of building events, evaluating the temporal characteristics responses, comparing with the existing regulation of fire detection and alarm systems (SDAI). The simulation results showed that asynchronous MAC layer protocols consume less power compared to synchronous protocols, making it possible to extend battery life and managing to meet the regulatory temporal requirements of SDAI. The experiments with WSN Zigbee demonstrated that it is possible to establish a WSN architecture in a building meeting the regulated time requirements for alarm and fault events.

**Keywords: Internet of Things, Wireless Sensor Network, Smart Buildings, Monitoring, Event Signaling, MAC Layer Protocol, ZigBee..**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Atenuação com obstáculo. . . . .	21
Figura 2 – Estrutura típica de uma RSSF. . . . .	24
Figura 3 – Arquitetura de um nó sensor sem fio. . . . .	25
Figura 4 – Visão geral das aplicações das RSSF's. . . . .	26
Figura 5 – Comparação dos protocolos conforme modelo OSI. . . . .	27
Figura 6 – Topologia estrela e ponto a ponto. . . . .	29
Figura 7 – Modos de operação IEEE 802.15.4. . . . .	31
Figura 8 – Arquitetura de pilha ZigBee. . . . .	35
Figura 9 – Arquitetura física proposta por Pegatoquet. . . . .	43
Figura 10 – Nó sensor do experimento de Pegatoquet. . . . .	44
Figura 11 – Experimento realizado por Zeng. . . . .	47
Figura 12 – Protocolo L-MAC. . . . .	50
Figura 13 – Protocolo B-MAC. . . . .	51
Figura 14 – Protocolo X-MAC. . . . .	52
Figura 15 – RSSF simulações Omnet++. . . . .	53
Figura 16 – Setup implementado para realização de testes. . . . .	56
Figura 17 – Nó roteador Zigbee CC2531. . . . .	57
Figura 18 – CC Debugger. . . . .	58
Figura 19 – Nó sensor roteador Zigbee detector de gás. . . . .	59
Figura 20 – Nó roteador Zigbee sinalizador áudio visual. . . . .	59
Figura 21 – Nó sensor dispositivo final Zigbee detector de fumaça. . . . .	60
Figura 22 – Nó sensor dispositivo final Zigbee botão de pulso. . . . .	60
Figura 23 – Coordenador Zigbee, Gateway e Servidor da aplicação. . . . .	61
Figura 24 – SmartRF Flash programmer. . . . .	62
Figura 25 – Software SmartRF Packet Sniffer. . . . .	62
Figura 26 – Software SmartRF Studio 7. . . . .	63
Figura 27 – Software Zigbee2MQTT. . . . .	64
Figura 28 – Aplicação MSE dos testes. . . . .	65
Figura 29 – Endereçamento dos nós sensores Zigbee. . . . .	66
Figura 30 – Programa Node-Red ensaios. . . . .	66
Figura 31 – Lógica para acionamento das instâncias da sirene Zigbee. . . . .	66
Figura 32 – Simulação do consumo de energia com envio de mensagens a cada 3 segundos. . . . .	67
Figura 33 – Simulação do consumo de energia com envio de mensagens a cada 60 segundos. . . . .	68
Figura 34 – Simulação do consumo de energia com envio de mensagens a cada 150 segundos. . . . .	68

Figura 35 –Simulação da média do <i>end-to-end delay</i> com envio de mensagens a cada 3 segundos. . . . .	71
Figura 36 –Simulação da média do <i>end-to-end delay</i> com envio de mensagens a cada 60 segundos. . . . .	71
Figura 37 –Simulação da média do <i>end-to-end delay</i> com envio de mensagens a cada 150 segundos. . . . .	72
Figura 38 –Dispositivos utilizados nos testes iniciais. . . . .	74
Figura 39 –Análise com o packet sniffer da sinalização de evento. . . . .	75
Figura 40 –Dispositivos posicionados nos pavimentos. . . . .	75
Figura 41 –Mapa da RSSF dos nós posicionados nos pavimentos. . . . .	76
Figura 42 –Mapa da RSSF dos nós posicionados dentro do apartamento. . . . .	76
Figura 43 –Saltos da mensagem através dos roteadores CC2531 posicionados nos pavimentos. . . . .	78
Figura 44 –Mapa roteadores CC2531 posicionados nos pavimentos. . . . .	78
Figura 45 –Eventos sinalizados remotamente via Bot WhatsApp. . . . .	79
Figura 46 –Utilização dos canais 2,4GHz IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4. . . . .	80
Figura 47 –Análise de utilização dos canais 2,4GHz. . . . .	81
Figura 48 –Ruído causado na utilização do equipamento doméstico micro-ondas. . . . .	81
Figura 49 –Consumo de energia do roteador CC2531. . . . .	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atenuação de obstáculos para ondas 2,4 GHz. . . . .	20
Tabela 2 – Parâmetros do nó sensor CC2500 no Omnet++. . . . .	53
Tabela 3 – Parâmetros de consumo do nó sensor CC2500 no Omnet++. . . . .	54
Tabela 4 – Parâmetros bateria LS26500. . . . .	54
Tabela 5 – Dados estatísticos do <i>end-to-end delay</i> , com intervalo de confiança de 99% (envio de mensagens a cada 3 segundos). . . . .	70
Tabela 6 – Dados estatísticos do <i>end-to-end delay</i> , com intervalo de confiança de 99% (envio de mensagens a cada 60 segundos). . . . .	70
Tabela 7 – Dados estatísticos do <i>end-to-end delay</i> , com intervalo de confiança de 99% (envio de mensagens a cada 150 segundos). . . . .	70
Tabela 8 – Fator linear do consumo de energia aproximado (envio de mensagens a cada 3 segundos) . . . . .	72
Tabela 9 – Tempo de vida do nó sensor (envio de mensagens a cada 3 segundos) com a bateria LS 26500. . . . .	73
Tabela 10 – Fator linear do consumo de energia aproximado (envio de mensagens a cada 60 segundos) . . . . .	73
Tabela 11 – Tempo de vida do nó sensor (envio de mensagens a cada 60 segundos) com a bateria LS 26500 . . . . .	73
Tabela 12 – Fator linear do consumo de energia aproximado (envio de mensagens a cada 150 segundos) . . . . .	73
Tabela 13 – Tempo de vida do nó sensor (envio de mensagens a cada 150 segundos) com a bateria LS 26500. . . . .	73
Tabela 14 – Dados estatísticos do <i>end-to-end delay</i> , com intervalo de confiança de 99% (Experimento de sinalização de evento Zigbee com seis saltos). . . . .	79

## LISTA DE ABREVIATURAS

EN	<i>European Standards</i>
EB	Estação Base
FFD	Dispositivo de Função Completa
IOT	Internet das Coisas
JSON	Notação de Objeto JavaScript
MAC	Controle de acesso ao meio
MB	Megabyte
MSE	Monitoramento e Sinalização de Eventos
NFPA	Associação Nacional de Proteção contra Incêndios
PC	Computador Pessoal
PNE	Pessoa com necessidades especiais
RAM	Memória de acesso Randômico
RF	Rádio frequência
RFD	Dispositivo de Função Reduzida
RSSF	Rede de Sensores sem Fio
SDAI	Sistema de Detecção e Alarme de Incêndio
SRV	Servidor
TCP	Protocolo de Controle de Transmissão
TI	<i>Texas Instruments</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USB	Barramento serial universal

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	14
<b>1.1 Objetivos</b>	15
1.1.1 Análise dos protocolos MAC	15
1.1.2 Realização de experimento de RSSF para MSE	15
1.1.3 Delimitação do escopo	16
<b>1.2 Contribuições</b>	16
<b>1.3 Organização do texto</b>	16
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	18
<b>2.1 Propagação de Ondas eletromagnéticas</b>	18
2.1.1 Antenas	18
2.1.2 Características da propagação das ondas de RF	19
<b>2.2 Redes de comunicação sem fio</b>	22
2.2.1 Redes fixas	22
2.2.2 Redes de acesso móvel	23
2.2.3 Redes AD HOC	23
<b>2.3 Redes de sensores sem fio</b>	23
2.3.1 Nó sensor sem fio	25
2.3.2 Aplicações de RSSF	25
2.3.3 Protocolos de RSSF padronizados	25
<b>2.4 Padrão IEEE 802.15.4</b>	27
2.4.1 Descrição geral	27
2.4.2 Topologias de rede	28
2.4.3 Camada física IEEE 802.15.4	28
2.4.4 Controle de acesso ao meio do IEEE 802.15.4	30
2.4.5 Modos de operação do IEEE 802.15.4	30
2.4.6 Protocolo de acesso ao meio CSMA/CA	32
<b>2.5 RSSF Zigbee</b>	33
2.5.1 Roteadores	33
2.5.2 Coordenador	33
2.5.3 Dispositivos finais	34
2.5.4 Modelo OSI do Zigbee	34
<b>2.6 Requisitos normativos de RSSF para aplicação em SDAI</b>	38
2.6.1 EN54-25	39
2.6.2 NFPA-72	39

<b>3</b>	<b>ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE</b>	41
3.1	Análise dos protocolos de camada MAC	41
3.2	Análise de aplicações de RSSF para ambientes internos	45
<b>4</b>	<b>PROPOSTA DE TRABALHO</b>	48
4.1	Análise dos protocolos MAC para os requisitos de SDAI	49
4.2	Análise de aplicação MSE baseado em RSSF	55
4.2.1	Métodos e materiais	56
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	67
5.1	Simulações dos protocolos MAC	67
5.2	Resultados do experimento MSE	74
5.2.1	Ensaio iniciais de comunicação	74
5.2.2	Comunicação entre pisos	77
5.2.3	Interferências em ambientes prediais	80
5.2.4	Consumo de energia do Nó sensor	82
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	84
	<b>REFERÊNCIAS</b>	86

## 1 INTRODUÇÃO

A verticalização das construções prediais necessita do incremento em segurança contra desastres, pois a comunicação adequada entre todos ocupantes do prédio pode evitar consequências fatais. Observando um prédio residencial como exemplo, verifica-se diversas situações que podem pôr em risco a vida das pessoas que ali habitam. Por exemplo, um vazamento de gás ou um princípio de incêndio em algum dos apartamentos. Este tipo de evento deve ser detectado em seu início possibilitando a rápida comunicação e ação dos responsáveis, evitando a propagação da fumaça e do fogo ou a ocorrência de uma explosão. Outro aspecto importante é com a identificação de pessoas com necessidades especiais (PNE) em casos de desastres, pois necessitam de ajuda no processo de socorro ou de evacuação do prédio.

Em construções prediais verticais residenciais, existem situações onde os projetos de segurança não levaram em consideração o monitoramento e sinalização de eventos (MSE) de risco a segurança dos ocupantes, principalmente dentro dos apartamentos. Com isto, normalmente estas instalações não possuem infraestrutura para a implantação de equipamentos de segurança cabeados que possam ser interligados a um sistema central condominial de alarme. Estas situações se tornam ainda mais críticas no caso de construções antigas, pois muitas vezes estas não possuem infraestrutura de segurança nem nas áreas comuns do condomínio e este problema é encontrado em outros tipos de construções verticais, como museus, prédios comerciais etc (FOUNDATION, 2015).

Sistemas de alarme, que envolvem a detecção de incêndio são normatizados, normalmente cabeados e com restrições temporais para detecção de falha e alarme. Devem suportar alimentação por bateria caso falte a energia em caso de sinistro. Para maior robustez é aconselhável a instalação de sistema de alarme com comunicação redundante, laço classe A (NBR-17240, 2010). Com o avanço das redes de sensores sem fio (RSSF) algumas instituições globais como a americana NPFA e a europeia EN já possuem normas com os

requisitos mínimos para a utilização de rede de sensores sem fio (RSSF) para detecção e alarme de incêndio.

A norma europeia EN54-25 regulamenta as RSSF para aplicação em sistemas de detecção e alarme de incêndio. Esta norma diz que o tempo máximo para informação do evento de alarme deve ser de até 10 segundos, a sinalização de falha de um dispositivo em até 300 segundos e a vida útil da bateria do nó detector é no mínimo 3 anos em pleno funcionamento. A norma americana NFPA-72 que também regulamenta as RSSF, é mais rígida com o tempo de sinalização de falha, definindo um tempo máximo de 200 segundos. Para o nó alimentado por bateria, este deve ter um tempo mínimo de vida útil de 1 ano. Para o evento de alarme, a NFPA-72 também define um tempo de sinalização de no máximo 10 segundos assim como a EN54-25. Além destes requisitos temporais, as normas exigem que RSSF de multi-saltos tenham redundância de caminhos de comunicação, como por exemplo redes do tipo *mesh* (NFPA-72, 2016; EN54, 2012).

Um dos grandes desafios das RSSF onde existem nós sensores alimentados por bateria é de fato o prolongamento máximo da vida útil da mesma, logo, da vida útil do nó sensor. Este problema de duração de bateria, pode ser tratado através de diversas possíveis soluções, atuando em um ou mais pontos específicos dependendo dos tipos e restrições das aplicações. Outro desafio importante nas RSSF, são as restrições temporais das aplicações principalmente em redes multi-saltos devido as retransmissões dos nós intermediários.

## **1.1 Objetivos**

Perante o cenário motivacional apresentado, existem diversos problemas a serem solucionados. Com isto, o objetivo geral deste trabalho é a realização de uma análise de RSSF para MSE utilizando como referência os aspectos temporais de atendimento as normas de alarme de incêndio NFPA-72 e EN54-25. Onde os objetivos específicos podem ser divididos em:

### **1.1.1 Análise dos protocolos MAC**

Análise das restrições devido ao ciclo de trabalho dos protocolos de camada MAC, relacionando os tempos limites de comunicação de alarme e falha e a duração da bateria do nó sensor.

### **1.1.2 Realização de experimento de RSSF para MSE**

Implementar uma aplicação experimental de MSE utilizando uma RSSF padronizada. Realizar testes de comunicação multi-saltos em um prédio verti-

cal, analisando os tempos de resposta e identificando as restrições para uma aplicação real.

Realizar um experimento de comunicação de eventos através de mensagens enviadas pela internet.

### **1.1.3 Delimitação do escopo**

Os problemas descritos abaixo estão relacionados ao tema deste trabalho:

- Atenuações e interferências em 2,4GHz aplicado em ambientes internos;
- análise dos protocolos de camada MAC;
- avaliação do protocolo de RSSF Zigbee para a aplicação de MSE.

Deste escopo está excluído o estudo dos problemas de:

- Tipos de modulação de rádio;
- detalhes da eletrônica dos rádios;
- elementos sensores;
- reaproveitamento de energia ambiente;
- protocolos de roteamento e transporte.

## **1.2 Contribuições**

Como contribuições pode-se destacar a análise dos requisitos temporais dos protocolos de camada MAC conforme normas NFPA-72 e EN-54 onde verificou-se através de simulações que os protocolos assíncronos, podem atender estes requisitos com um consumo de energia menor em comparação com os protocolos síncronos.

Também, verifica-se após os experimentos que o protocolo de camada MAC padronizado IEEE 802.15.4, atendem os requisitos temporais de alarme, falha e consumo bateria quando utilizado em sua forma original e para multi-saltos com o suporte do protocolo de RSSF Zigbee.

## **1.3 Organização do texto**

Este trabalho é dividido da seguinte forma: no capítulo 2 é apresentada uma revisão teórica relativa as RSSF e sobre as restrições temporais da aplicação. No capítulo 3 é realizado uma análise do estado da arte dos protocolos de camada MAC e das aplicações de RSSF para ambientes internos. No capítulo 4,

é apresentado a proposta de trabalho e os métodos utilizados para as simulações e experimentos. O Capítulo 5 apresenta os resultados. E finalmente no capítulo 6 é concluído o trabalho com as argumentações finais e a apresentação das sugestões para trabalhos futuros.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo será revisado a teoria que auxilia no entendimento dos assuntos abordados neste trabalho.

Primeiramente são revisados alguns dos conceitos teóricos sobre propagação das ondas eletromagnéticas. Após é realizada uma breve passagem sobre redes de comunicação sem fio. Também são revisados os conceitos das redes de sensores sem fio, suas aplicações e padronizações.

Em seguida são verificados os conceitos sobre o padrão IEEE 802.15.4 e do protocolo de RSSF Zigbee.

Uma revisão sobre a regulamentação de SDAI para RSSF é realizada na última seção deste capítulo.

### **2.1 Propagação de Ondas eletromagnéticas**

O meio físico para comunicação de equipamentos sem fio é o ar, e esta comunicação ocorre através da propagação de ondas eletromagnéticas. Este meio físico, não possui características lineares e pode sofrer de diversos tipos alterações em seu comportamento, conforme o ambiente específico. Todas estas situações, podem causar perdas de pacotes e ou atrasos nas comunicações. Para compreender estes fenômenos, serão apresentados os conceitos básicos da criação da onda de radiofrequência e da propagação da mesma no ar.

#### **2.1.1 Antenas**

As antenas são elementos básicos para comunicações sem fio, tendo como objetivo possibilitar a conversão de sinais elétricos em ondas eletromagnéticas no caso da transmissão (TX) e a transformação de ondas eletromagnéticas em sinais elétricos para recepção (RX). Ondas eletromagnéticas na aplicação de comunicação sem fio, também são chamadas de ondas de radiofrequência (RF).

A potência do sinal elétrico de um rádio para ambientes internos é medida

em miliwatts (mW), e o sinal de radiofrequência propagado tem a potência expressa em decibéis (dB). O valor de potência em dB é um número representado pela relação de 10 vezes o logaritmo da potência de entrada pela de saída. O sistema de amplificação possui um valor em dB positivo, pois a potência de entrada é inferior à de saída. Em um sistema que causa atenuação, o sinal possui um dB negativo, pois a potência de entrada será superior à de saída. Para apresentar a relação de referência entre a potência do sinal elétrico em mW e a potência de transmissão, utiliza-se a unidade de medida dBm (PERES, 2010).

O sinal é transmitido pela placa de rede até a antena através de um meio de transmissão que terá uma atenuação conforme o seu meio. Quando o sinal chega na antena, é adicionado o ganho da mesma com a potência do sinal. As antenas possuem ganho expresso em dBi, que é uma unidade relativa entre a antena utilizada e a antena teórica isotrópica. A antena isotrópica teórica é capaz de irradiar uniformemente para todas as direções, sendo utilizada como referência. Com a utilização das unidades dB, dBm e dBi, pode-se calcular a potência irradiada por um sistema RF (PERES, 2010).

As antenas possuem diferentes ganhos, sendo classificadas de acordo com seu ganho em dBi ou com o seu ângulo de irradiação. Com relação ao ângulo, têm-se antenas omnidirecionais, direcionais e setoriais. As antenas omnidirecionais irradiam ondas RF em todas as direções em seu entorno, obtendo uma área de abrangência de 360 graus. São normalmente utilizadas em ambientes internos ou em áreas que se deseja irradiar o sinal em torno da antena. Antenas direcionais, são utilizadas normalmente para enlaces ponto-a-ponto e possuem um ângulo estreito de irradiação do sinal RF. Como objetivo principal é concentrar a potência de irradiação aumentando a distância de transmissão do sinal RF. Antenas setoriais possuem ângulos de abrangência maior que as direcionais e menor que as omnidirecionais. Normalmente utilizadas para criar ligações ponto-multiponto, ou utilizadas em conjunto ampliando a área de abrangência (PERES, 2010).

### **2.1.2 Características da propagação das ondas de RF**

A propagação da onda de RF, pode ser afetada por diversos fatores capazes de causar alterações em seu comportamento. Estes fatores podem ser relacionados em atenuação, reflexão, refração, difração e dispersão do sinal propagado, além de ruídos causados pelo meio de transmissão. O nível de interferência e as características de propagação estão relacionados diretamente com a frequência utilizada pelo sinal propagado.

Tabela 1 – Atenuação de obstáculos para ondas 2,4 GHz.

Obstáculo	Atenuação
parede de madeira sólida	6 dB
divisória de escritório com janela de vidro	4 dB
porta corta-fogo 25"	19 dB
tijolo 3,5"	6 dB
parede de concreto 18"	18 dB
divisória de vidro 0,5"	12 dB
corpo humano	3 dB

Fonte:(PERES, 2010).

### 2.1.2.1 Atenuação

Os sinais enviados em um meio de comunicação sofrem atenuações, que é a perda de potência do sinal devido a transmissão. No caso de propagação de ondas de RF, dois fatores influenciam na perda desta potência: a distribuição deste sinal no espaço durante a transmissão e a capacidade da antena receptora de captar este sinal. Sempre que o sinal é propagado espalha-se pelo espaço conforme o ângulo de abertura da antena de transmissão e a potência do sinal é distribuída na área de propagação até atingir a antena de recepção (PERES, 2010).

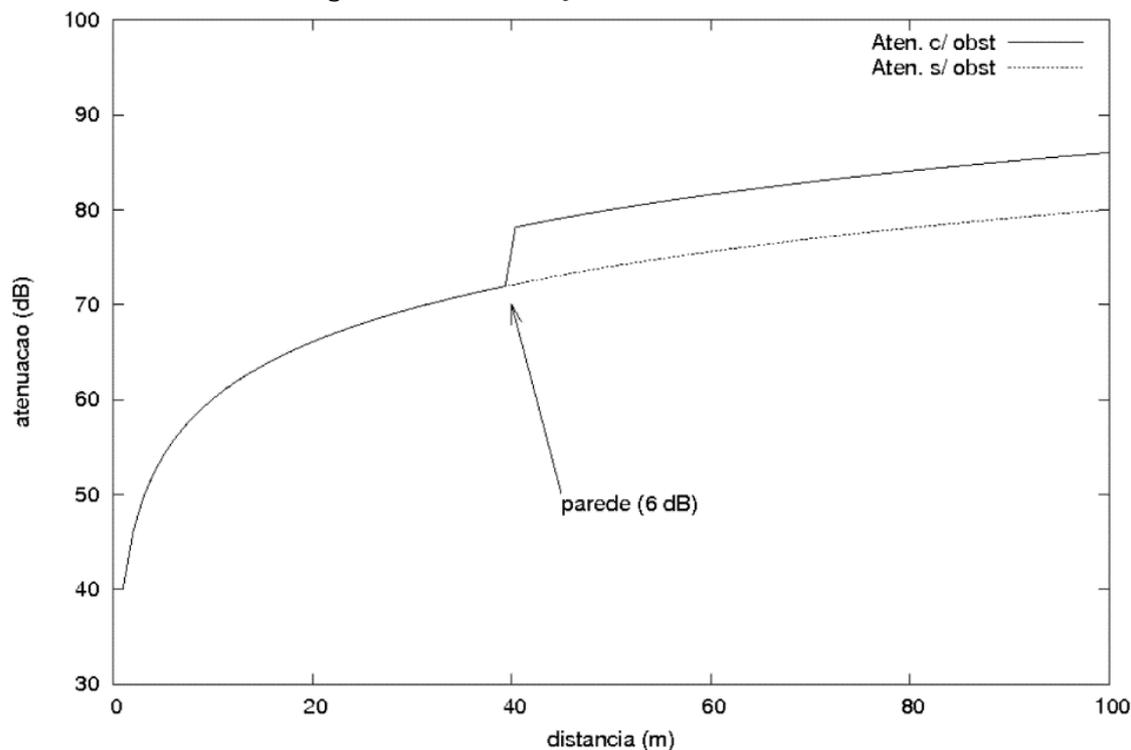
Em um ambiente real, deve-se adicionar uma margem de atenuação conforme o número e tipos de obstáculos existentes, além da atenuação do espaço aberto. Também, é aconselhável adicionar uma atenuação de “reserva técnica” para fenômenos não previstos ou esporádicos que podem causar a interrupção do enlace de comunicação. Na tabela 1 é possível verificar uma estimativa de atenuação por tipo de obstáculo. A figura 1 apresenta o comportamento de uma atenuação por absorção de sinal de 2,4GHz ao encontrar uma parede com índice de atenuação de 6 dB a 40 m do transmissor.

Outro fator importante é a diferença entre a potência de recepção e a potência do ruído no meio de comunicação, que define a relação sinal/ruído SNR (*signal noise rate*). O valor de SNR define a qualidade do sinal recebido para o enlace de comunicação (PERES, 2010).

### 2.1.2.2 Reflexão

Um sinal de RF quando encontra um obstáculo com uma superfície reflexiva, (por exemplo, metais e água), será refletido, não sendo capaz de atravessá-lo. O ângulo de reflexão depende do ângulo do sinal de incidência na superfície. A ocorrência de reflexões pode ocasionar múltiplos caminhos

Figura 1 – Atenuação com obstáculo.



Fonte:(PERES, 2010).

dos sinais ocorrendo que um rádio poderá receber o seu próprio sinal enviado, defasado devido a reflexão e ocasionando uma interferência em si mesmo (PERES, 2010).

### 2.1.2.3 Refração

Quando um sinal de RF passa por um meio físico com uma determinada densidade, diferente da qual o meio em que se encontra, sofre alteração na sua direção. Assim como na reflexão, podem existir interferências entre o sinal RF que sofreu refração e o sinal que não a sofreu. A alteração da direção depende do material existente no meio original do sinal e do material no novo meio de propagação (PERES, 2010).

### 2.1.2.4 Difração

A difração é um fenômeno de propagação que permite a comunicação de sinais de RF mesmo sem visada direta, ou seja, o sinal RF preenche os espaços entre os obstáculos em um ambiente interno. A difração ocorre quando ondas de RF encontram obstáculos de tamanho superior ao tamanho de sua onda. As ondas de RF irão contornar o obstáculo, alterando a direção de sua propagação original. A energia que possibilita que o sinal se propague para a área de sombra (atrás do obstáculo) é proveniente das ondas que não o atingiram.

O ângulo de propagação do sinal é alterado conforme o tamanho do obstáculo (PERES, 2010).

#### 2.1.2.5 *Dispersão*

Durante a propagação do sinal, caso a onda de RF encontre um obstáculo com uma superfície irregular a mesma pode sofrer reflexões em diversas direções, de acordo com esta superfície. Este efeito está relacionado com a profundidades das irregularidades na superfície (PERES, 2010).

#### 2.1.2.6 *Ruídos*

Nas transmissões de dados, entre o transmissor e receptor existe um nível de ruído. Este nível de ruído, depende de diversos fatores como a temperatura, meio de transmissão, qualidade de hardware, entre outros. Destacam-se dois tipos de ruídos: Ruídos brancos e os Impulsivos.

O ruído branco caracteriza-se pela alta frequência e baixa amplitude, e está sempre presente em qualquer comunicação e não pode ser eliminado do meio. Uma comunicação bem sucedida depende da relação entre a potência do sinal transmitido e do ruído existente no meio. O ruído impulsivo possui frequência e amplitude variadas oriundas de interferências externas não podendo ser previstas e normalmente acarretam a destruição do sinal transmitido. Normalmente o nível de interferência suportado, depende do tipo de espalhamento espectral e da modulação utilizada. Quanto menor for a diferença entre potência de sinal e ruído, menor será a capacidade de transmissão de dados do enlace de comunicação (PERES, 2010).

## **2.2 Redes de comunicação sem fio**

Quando diversos dispositivos com transceptores de rádio dividem uma determinada porção do espectro para troca de informações entre eles, é aplicado o conceito de rede de comunicação sem fio (WINTER, 2017). As aplicações de redes de comunicação sem fio, são divididas em três grupos principais: redes fixas, redes de acesso móvel e redes do tipo ad hoc.

### **2.2.1 Redes fixas**

As redes fixas, são redes de comunicação sem fio que possuem conexões com linhas de visada de ponto-a-ponto, normalmente para comunicações de longa distância. Utilizam-se antenas de alto ganho em alturas elevadas. Infraestruturas de redes fixas são uma alternativa para o alto custo de instalação de cabos e fibras ópticas entre diferentes estações (WINTER, 2017).

### 2.2.2 Redes de acesso móvel

Normalmente possuem múltiplos acessos em uma determinada área de cobertura. Geralmente, nestas redes existe apenas um salto entre o dispositivo até o ponto de acesso. Este tipo de rede é dividido em setores regionais, chamado de células. Para cada célula há uma Estação Base (EB), a qual é conectada a uma rede com cabos, por esta razão são redes com poucos saltos de conexão entre os usuários. Existem subdivisões nas redes de acesso móvel que são conhecidas por tecnologias como GSM (*Global System for Mobile*), CDMA (*Code Division Multiple Access*), WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) e IEEE 802.11 (WINTER, 2017).

### 2.2.3 Redes AD HOC

Uma rede do tipo ad hoc comporta diversos dispositivos arbitrariamente localizados em uma determinada área. Possui uma infraestrutura independente e deve ser capaz de se auto administrar. Cada equipamento possui um rádio transceptor sendo que usualmente todos os dispositivos dividem uma mesma banda de frequência. Uma das dificuldades é a comunicação entre os diversos dispositivos. Os dispositivos devem identificar e descobrir vizinhos com o objetivo de formar uma topologia. Caminhos com qualidade de conexão devem ser encontrados e métodos de agendamento ou de eliminação de colisões devem ser aplicados para garantir o envio dos pacotes entre os dispositivos da rede. Algumas redes podem requerer que os dispositivos sejam capazes de encaminhar pacotes de outros dispositivos, neste caso, métodos de multi saltos devem ser aplicados (WINTER, 2017).

Redes do tipo ad hoc são aplicadas para solução de problemas locais, onde não há disponibilidade de outra infraestrutura de comunicação ou tal infraestrutura não possa ser utilizada por razões de segurança, dificuldade de instalação, etc. Exemplos comuns de rede do tipo ad hoc são: redes de laptops e redes entre dispositivos móveis (WINTER, 2017).

## 2.3 Redes de sensores sem fio

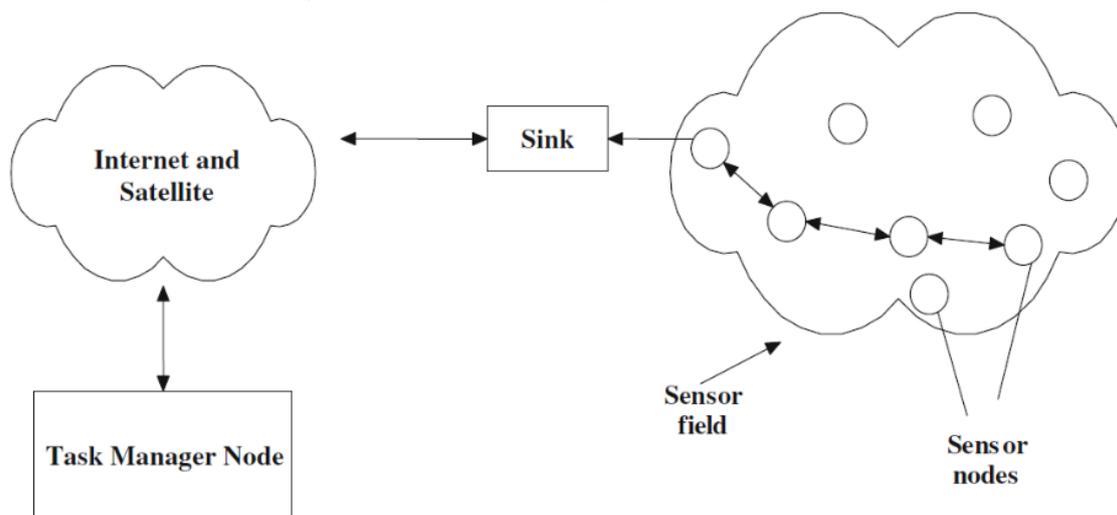
Redes de sensores sem fio (RSSF) ou *Wireless Sensor Networks* (WSN) é o termo que descreve uma rede de pequenos computadores cooperativos que são capazes de detectar algum fenômeno no ambiente e enviar seus resultados para uma entidade central, como um banco de dados ou um servidor. No entanto, pode ser visto também em contextos mais amplos (YANG, 2014). Estes pequenos computadores são chamados de nós sensores ou nodos.

As RSSF possuem aspectos de rede semelhantes ao conceito de redes do

tipo ad hoc, pois independem de uma infraestrutura de rede, mas diferem de redes de computadores tradicionais em vários aspectos. Normalmente as RSSF podem possuir um grande número de nodos distribuídos, possuem restrições de energia e devem possuir mecanismos para autoconfiguração e adaptação, devido a problemas como falhas de comunicação e perda de nodos. Uma RSSF tende a ser autônoma e requer um alto grau de cooperação para executar as tarefas definidas para a rede (YANG, 2014).

Um projeto de redes de sensores sem fio impõe diversos desafios, abrangendo uma grande diversidade de tópicos dentro do campo da engenharia elétrica. Além da necessidade de economia de energia outras características, tais como, segurança, taxa de dados de transmissão, confiabilidade na comunicação, capacidade de auto-organização, alcance da rede e latência da rede, são alguns dos aspectos de preocupação para o desenvolvimento de um nodo sensor (WINTER, 2017).

Figura 2 – Estrutura típica de uma RSSF.



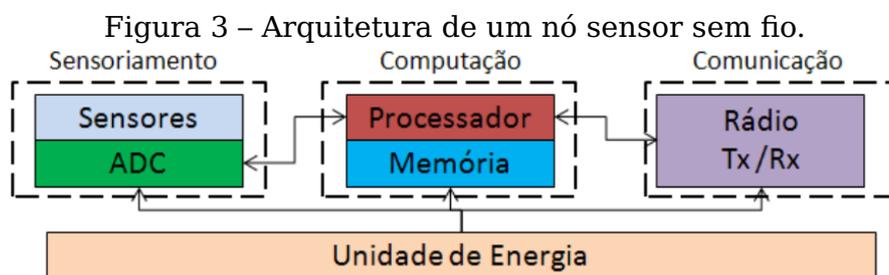
Fonte:(YANG, 2014).

Conforme apresentado na figura 2, uma estrutura típica de RSSF é composta por nós sensores (nodos ou sensor nodes), que estabelecem comunicação com seus vizinhos reportando ao receptor das mensagens (sink) as informações de interesse. Conforme Yang, o sink está apresentado como uma entidade unidirecional, mas pode ser composto por um gerenciador integrado para tomada de decisões e gerenciamento da rede atuando de forma bidirecional com a RSSF. As informações das mensagens recebidas podem ser retransmitidas através da internet para usuários ou banco de dados remoto. A conectividade da RSSF com a internet, está ligada ao conceito de internet das coisas (IoT) (YANG, 2014).

### 2.3.1 Nó sensor sem fio

Um nó sensor pode ser estacionário ou móvel. Normalmente, para economizar energia os dispositivos desligam os transmissores durante períodos de ociosidade. Entretanto devem manter a conectividade com a rede. Em um ambiente dinâmico é um grande desafio prover qualidade em conectividade ao mesmo tempo em que deve se economizar energia.

Um nodo ou nó sensor, é composto por quatro blocos principais: detecção (sensoriamento), processamento local (computação), comunicação sem fio e unidade de energia (normalmente bateria). Eventualmente um nó sensor poderá ter também uma função de atuação no ambiente (OLARTE, 2014).



Fonte:(OLARTE, 2014).

### 2.3.2 Aplicações de RSSF

As aplicações das RSSF são diversas, como por exemplo nas áreas militar, de agricultura, industrial, da construção civil, contra desastres, etc. E em cada área de aplicação as características das RSSF devem ser analisadas e ajustadas conforme sua demanda. No caso das RSSF industriais a necessidade do determinismo trará consigo um maior processamento e uso do rádio, causando um maior consumo de bateria limitando a vida útil do nó sensor.

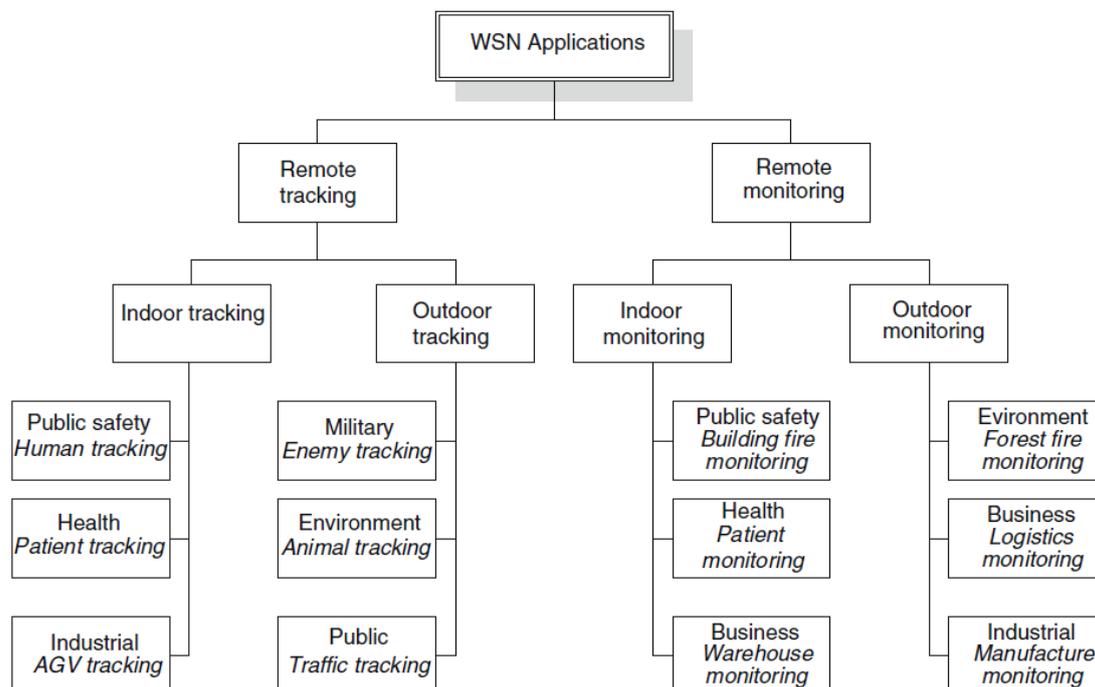
Conforme a figura 4, (YANG, 2014) apresenta uma visão geral de algumas aplicações das RSSF (WSN). O mesmo subdivide as aplicações em rastreamento (*tracking*) e monitoramento (*monitoring*), e também em interno (*in-door*) e externo (*outdoor*).

### 2.3.3 Protocolos de RSSF padronizados

Com o avanço do desenvolvimento das RSSF's, a necessidade de padronização e as exigências da indústria colaboraram para o surgimento de alianças e homologações normativas de alguns dos principais protocolos de RSSF (WANG; JIANG, 2016; PEREIRA; NEUMANN, 2009) :

- O protocolo de RSSF Zigbee foi desenvolvido pela ZigBee Alliance em

Figura 4 – Visão geral das aplicações das RSSF's.



Fonte:(YANG, 2014).

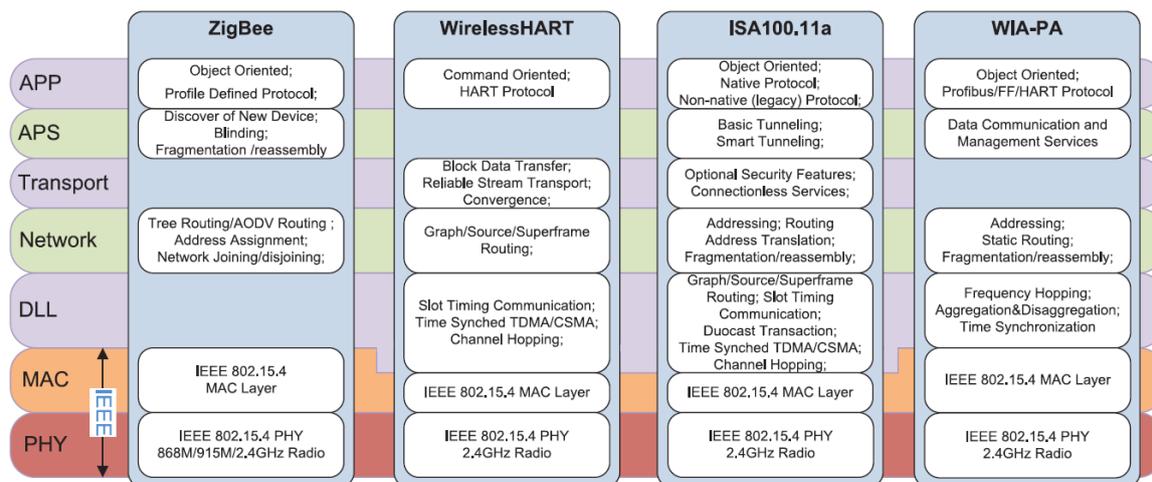
2004 e em 2007 lançou a versão do Zigbee PRO. Segue atualmente com novas revisões. É o protocolo mais popular de RSSF (ZIGBEE, 2017);

- em março 2010, a IEC aprovou o WirelessHART (WH) como padrão internacional (IEC 62591Ed.1.0). HART sem fio desenvolvido pela *HART Communication Foundation* como padrão internacional para sistemas sem fio industriais;
- em setembro de 2010, o padrão sem fio conhecido como WIAPA (Rede sem fio para Automação Industrial – Processo Automação), que é desenvolvido pela empresa chinesa Wireless Alliance, foi aprovado pela IEC como padrão internacional completo (IEC 62601Ed.1.0);
- em setembro 2014, a IEC concedeu o padrão ISA100.11a como IEC 62734. O padrão ISA100.11a, que também focava em aplicações industriais, foi especificado pelo comitê sem fio ISA.

Um fator em comum entre os protocolos de RSSF padronizados acima citados, que pode ser observado na figura 5 é que todos utilizam o padrão IEEE 802.15.4 como base de sua estrutura física do rádio.

Pode-se observar que o protocolo Zigbee obteve um alcance de maior amplitude no campo das aplicações, não restringindo a sua atuação na indústria. Esta popularidade do Zigbee se deve a sua simplicidade de implementação, baixo consumo de bateria, escalabilidade e baixo custo do hardware.

Figura 5 – Comparação dos protocolos conforme modelo OSI.



Fonte:(WANG; JIANG, 2016).

## 2.4 Pradrão IEEE 802.15.4

Com a primeira publicação estabelecida em 2003, este padrão conforme o modelo OSI, determina os requisitos de camada física e de controle de acesso ao meio (MAC) dos nodos. O objetivo da IEEE 802.15.4, como uma *Low-rate wireless personal area network* (LR-WPAN) é prover sistemas de comunicação de baixo custo e consumo de energia para aplicações de baixas taxas de comunicações para serem utilizados em equipamentos de sensoriamento e controle.

Esta seção descreve as características do padrão IEEE 802.15.4 (SEMPRE-BOM, 2012; IEEE, 2015).

### 2.4.1 Descrição geral

O protocolo IEEE 802.15.4 especifica dois tipos de dispositivos: Os do tipo FFDs (*full-function devices*) e os RFDs (*reduced-function devices*) (IEEE, 2015).

- Dispositivo de função completa (FFD): Pode suportar três modos de operação, onde:

1) Coordenador PAN: é o controlador principal da *Personal Area Network*(PAN), ele identifica a rede na qual outros dispositivos devem ser associados.

2) Coordenador: oferece serviços de sincronização através da transmissão de *beacons* e ele deve estar associado a um Coordenador PAN e o mesmo não cria sua própria rede.

3) Dispositivo simples: não implementa as funcionalidades acima descritas.

- Dispositivo de função reduzida (RFD): dispositivo que opera na implementação mínima do protocolo IEEE 802.15.4 e é destinado para aplicações simples que não necessitam a transmitir grande quantidade de dados e estão associados a um FFD.

Os dispositivos FFDs e RFDs possuem endereços únicos de 64 bits com possibilidade de endereços curtos de 16 bits fornecidos pelo FFD. Uma LR-WPAN deve incluir pelo menos um FFD como provedor global de serviços de sincronização, gerenciando os FFD's e RFD's.

Devido as tarefas do coordenador PAN, ele apresenta um consumo de energia maior se comparado aos demais nodos. Por isso o padrão IEEE 802.15.4 recomenda que o mesmo esteja conectado em alguma fonte de alimentação, enquanto os demais nodos RFD's podem ser alimentados por baterias (SEMPREBOM, 2012; IEEE, 2015).

#### **2.4.2 Topologias de rede**

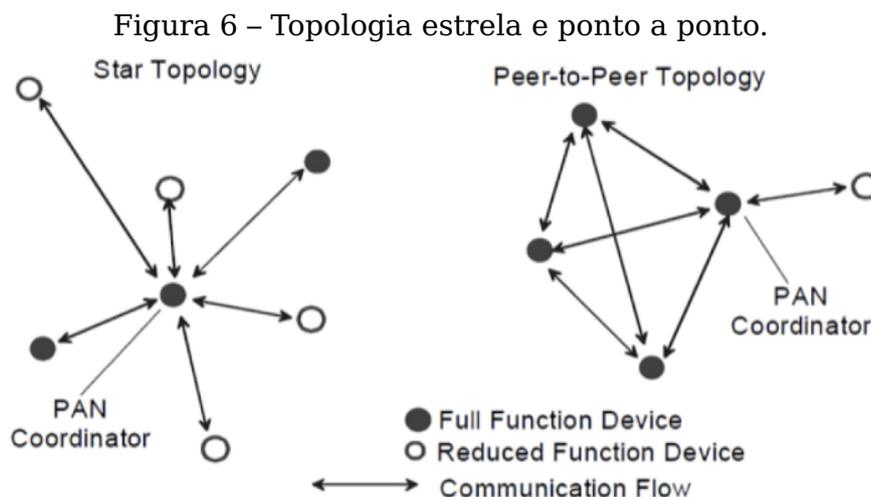
As topologias de rede definidas para o padrão IEEE 802.15.4 são a topologia estrela e a topologia ponto a ponto.

Topologia Estrela: nessa topologia, um único nó opera como Coordenador PAN. A Topologia Estrela funciona como uma comunicação centralizada. Dessa forma todas as transmissões são primeiramente destinadas ao Coordenador PAN que posteriormente encaminha os dados aos dispositivos finais.

Topologia ponto a ponto: nessa topologia, também inclui um coordenador PAN, e tem como característica ser descentralizada, onde cada dispositivo pode se comunicar diretamente com outro dispositivo que esteja dentro da sua área de cobertura. Esta funcionalidade possibilita flexibilidade, mas adiciona complexibilidade na rede devido aos nodos poderem se comunicar com múltiplos saltos entre dispositivos. Mas, cabe ressaltar que esta funcionalidade de múltiplos saltos devem ser definidas na camada de rede, e esta não contempla o escopo da IEEE.802.15.4 (SEMPREBOM, 2012; IEEE, 2015).

#### **2.4.3 Camada física IEEE 802.15.4**

A camada física é responsável pela transmissão e recepção de dados utilizando um determinado canal e técnica de modulação. O padrão IEEE 802.15.4 oferece três frequências de operação ISM (*Industrial, Scientific and Medical*): 2.4 GHz, 915 MHz e 868 MHz. Existe apenas um único canal entre 868 e 868.6 MHz, 10 canais entre 902 e 928 MHz, e 16 canais entre 2.4 e 2.4835 GHz. As taxas de dados nominais máximas alcançadas são de 250 kbps em 2.4 GHz, 40 kbps em 915 MHz e 20 kbps em 868 MHz. Baixas frequências são adequadas para transmissões de longas distâncias devido à menor perda por atenuação



Fonte:(SEMPREBOM, 2012).

do sinal. Baixas taxas de transmissão proporcionam melhor sensibilidade à área de cobertura. Altas taxas de transmissão significam alta vazão e baixa latência.

Na banda de 2,4 GHz a modulação utilizada é a *Direct Sequence Spread Spectrum DSSS*, facilitando o desenvolvimento de transceptores de baixo custo. A taxa máxima de dados para um único canal é de 250 kbit/s, mas a taxa efetiva do protocolo fica em torno dos 60 kbps devido à técnica de modulação e ao mecanismo MAC utilizado.

A camada física é definida pelo padrão IEEE 802.15.4 como responsável pelas seguintes tarefas (SEMPREBOM, 2012; IEEE, 2015):

- Ativação e desativação do transceptor (*transceiver*) de rádio: o transceptor pode operar em um dos três modos: transmitindo, recebendo ou adormecido. Dependendo da solicitação da camada MAC o rádio pode ser ligado ou desligado.
- Detecção de energia no canal (*Energy Detection (ED)*): este serviço é utilizado pela camada de rede como parte do mecanismo de seleção de canal ou pelo *Clear Channel Assessment (CCA)* para determinar se o canal está ocioso ou ocupado.
- *Link Quality Indication (LQI)*: o LQI caracteriza a qualidade de um sinal recebido em um enlace. Pode ser utilizado pelas camadas superiores (rede e aplicação) para implementação de suas políticas.
- *Clear Channel Assessment*: esta tarefa é essencial para implementação do *Carrier Sense Multiple Access (CSMA)* que é responsável por reportar

o estado do meio: ocioso ou ocupado. O CCA pode ser realizado em três modos de operação:

1) Modo de detecção de energia: o CCA reporta que o canal está ocupado quando detecta energia acima de um limiar de energia (ED) no canal.

2) Modo de detecção de portadora: o CCA reporta que o canal está ocupado apenas se ele detecta um sinal com as mesmas características de modulação e difusão do IEEE 802.15.4, e que possua um valor de energia (ED) acima ou abaixo do limiar.

3) Modo de detecção de portadora com modo de detecção: é a combinação das duas técnicas citadas anteriormente.

- Seleção de frequência do canal: o padrão IEEE 802.15.4 define até 27 canais diferentes. Assim, a camada física deve estar apta para configurar seus transceptores em um canal específico, escolhido pela camada superior (SEMPREBOM, 2012; IEEE, 2015).

#### **2.4.4 Controle de acesso ao meio do IEEE 802.15.4**

A Subcamada MAC do padrão IEEE 802.15.4 provém uma interface entre a camada Física e as camadas superiores das LR-WPANs. O protocolo MAC utilizado no padrão, possui duas formas de operação que devem ser selecionados pelo coordenador (SEMPREBOM, 2012; IEEE, 2015):

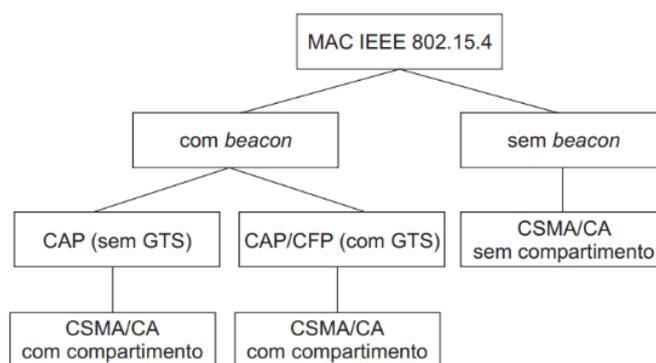
- Modo com *beacon*: os *beacons* são periodicamente gerados pelo coordenador com a finalidade de sincronizar dispositivos e identificar o PAN. Um quadro de *beacon* é a primeira parte de um superquadro, o qual embute todos os quadros trocados entre os nodos e o coordenador PAN. Trocas de dados entre nodos também são possíveis durante a duração do superquadro.
- Modo sem *beacon*: neste modo de operação os nodos podem simplesmente enviar seus dados usando CSMA/CA sem compartimentos. Neste modo não se utiliza a estrutura do superquadro.

#### **2.4.5 Modos de operação do IEEE 802.15.4**

Quando o coordenador habilita o modo com *beacon*, ele força a utilização da estrutura do superquadro para gerenciar a comunicação entre os dispositivos (que são associados com o PAN). O formato do superquadro é definido pelo coordenador PAN e transmitido para os outros dispositivos contido dentro de cada quadro de *beacon*, o qual é enviado periodicamente pelo coordenador

PAN. O superquadro é dividido em 16 compartimentos de mesmo tamanho, seguido por um período inativo previamente definido. O superquadro é contido em um intervalo de *beacons* (*Beacon Interval* - BI) e limitado por dois quadros de *beacon*. Internamente este pode conter o período de acesso com contenção (CAP) e o período de acesso sem contenção (CFP). Se o mecanismo de comunicação utiliza exclusivamente o CAP, um dispositivo que deseja se comunicar deve competir com outros dispositivos usando o CSMA/CA com compartimentos. Todas as transmissões devem ser finalizadas antes do fim do CAP, ou antes do início do período inativo (se houver) (SEMPREBOM, 2012; IEEE, 2015).

Figura 7 – Modos de operação IEEE 802.15.4.



Fonte:(SEMPREBOM, 2012).

Se existe a necessidade de provimento de alguma garantia com respeito a ausência de colisões, então o CFP é utilizado. O CFP consiste na alocação de compartimentos garantidos (GTS) pelo coordenador PAN para aplicações que necessitam de largura de banda definida. O CFP é uma parte do superquadro iniciada imediatamente após o término do período de acesso com contenção. O coordenador PAN pode alocar até sete compartimentos garantidos e cada GTS pode ocupar mais do que um compartimento. De acordo com a especificação IEEE 802.15.4, o GTS deve ser utilizado apenas para comunicação ponto a ponto envolvendo o coordenador PAN e um dispositivo da rede. Em ambas as configurações (com e sem CFP), o superquadro pode possuir um período inativo, durante o qual todos os dispositivos, inclusive o coordenador PAN, não interagem com a PAN, e devem entrar em um modo de economia de energia (*sleep mode*). Esta troca entre os modos de operação da rede é bastante apropriada para RSSF's, onde a economia de energia e prolongamento do tempo de vida da rede é de fundamental relevância. Esse modo de economia de energia é compatível com o modelo de funcionamento de aplicações de manufatura que trabalham baseadas em ciclo de trabalho (*duty cycles*). Um ciclo de trabalho é utilizado para descrever a fração de tempo em que um

sistema está em um estado ativo (SEMPREBOM, 2012; IEEE, 2015).

Quando o coordenador PAN seleciona o modo de operação sem *beacon*, não existe a estrutura do superquadro nem o envio de quadros de *beacon*. O acesso ao meio é realizado através do tradicional protocolo de acesso ao meio CSMA/CA sem compartimentos. Todas as mensagens a serem transmitidas, com exceção das mensagens de reconhecimento (ACK) e quadros que seguem imediatamente um ACK, devem ser transmitidos segundo este mecanismo, o qual não oferece nenhuma garantia temporal às aplicações (SEMPREBOM, 2012; IEEE, 2015).

#### 2.4.6 Protocolo de acesso ao meio CSMA/CA

O principal problema em enlaces com acesso múltiplo é a ocorrência de colisões. Isto, devido ao fato que vários nós podem transmitir quadros ao mesmo tempo, podendo haver colisões e perdas. Dessa maneira é necessária a implementação de um mecanismo para controle de acesso ao meio como o CSMA. Antes de transmitir, o CSMA escuta o meio e só realiza a transmissão caso o mesmo não esteja ocupado. Caso contrário, o protocolo volta a escutar o meio depois de um tempo aleatório (SEMPREBOM, 2012; IEEE, 2015).

Em redes sem fio não é possível acompanhar a transmissão no meio. Dessa maneira um protocolo MAC utilizado em redes sem fio é o CSMA/CA (Prevenção de Colisões). O CSMA/CA atua através de períodos aleatórios de *backoff* antes de verificar se o canal está ocupado, proporcionando economia de energia, uma vez que o meio não é inspecionado continuamente. De acordo com padrão IEEE 802.15.4, a versão do protocolo CSMA/CA com compartimentos é utilizada no modo com *beacon* habilitado e a sua versão sem compartimento é utilizando quando opera no *beacon* desabilitado (SEMPREBOM, 2012; IEEE, 2015).

O CSMA/CA utiliza três variáveis para gerenciar o acesso ao meio:

*Number of Backoff* (NB): é o número de vezes que o CSMA/CA teve que realizar *backoff* durante uma tentativa de acesso ao canal.

*Contention Window* (CW): é o tamanho da janela de contenção, essa variável define o número de vezes necessárias para verificar se é possível utilizar o canal antes de se iniciar a transmissão (Para o CSMA/CA com compartimento, seu valor inicial é 2 e a cada vez que o canal estiver ocupado seu valor é reiniciado para o valor inicial).

*Backoff Exponent* (BE): é o expoente de *backoff*, essa variável se relaciona com a quantidade de períodos de *backoff* que deve ser aguardada antes de verificar a atividade do canal. Se BE for igual a 0, não haverá *backoff* na primeira verificação se o canal estará ocupado ou livre (SEMPREBOM, 2012;

IEEE, 2015).

## **2.5 RSSF Zigbee**

Conforme (ZIGBEE, 2017) o Zigbee é um padrão de comunicação sem fio bidirecional de baixo custo e baixo consumo de energia. As soluções que adotam o padrão Zigbee estão incorporadas em eletrônicos de consumo, automação residencial e predial, controles industriais, periféricos de PC, aplicativos de sensores médicos, brinquedos e jogos.

O Zigbee, é um conjunto de protocolos de comunicação de alto nível desenvolvido pela Zigbee alliance e define o padrão IEEE 802.15.4 nas camadas física e MAC. Apresenta vantagens com relação a outros protocolos devido a padronização. As vantagens estão na interoperabilidade entre fabricantes e diversos transceptores disponíveis comercialmente. Graças a camada física do IEEE 802.15.4, os dispositivos Zigbee podem operar em ambientes de baixa relação sinal-ruído (SNR), estabelecendo enlaces de até 100m a uma taxa de em torno 60Kbps (MULLER, 2012).

Existem três tipos diferentes de dispositivos: dispositivo final, roteador e coordenador. Uma rede Zigbee possui apenas um coordenador e pode ter vários roteadores e dispositivos finais.

### **2.5.1 Roteadores**

No processo de comunicação, os roteadores são responsáveis por rotear o tráfego entre os diferentes nodos, sendo um dispositivo de função completa (FFD) conforme a IEEE 802.15.4. Os roteadores podem não dormir, dependendo da configuração da rede. Devido a isto, os roteadores não são uma escolha adequada para dispositivos operados por bateria. Os roteadores também são responsáveis por receber e armazenar mensagens destinadas a seus filhos (nodos vizinhos atribuídos). Além disso, os roteadores, asseguram as portas de entrada da rede, e também são responsáveis por permitir que novos nós entrem na rede (ZIGBEE, 2017).

### **2.5.2 Coordenador**

O coordenador é um roteador especial e conforme a IEEE 802.15.4, também é um FFD. Além de todos os recursos do roteador, o coordenador é responsável pela formação da rede. Para fazer isso, ele deve selecionar o canal apropriado, o PAN ID e o endereço de rede estendido. Também é responsável por selecionar o modo de segurança da rede (ZIGBEE, 2017).

### 2.5.3 Dispositivos finais

Os dispositivos finais não roteiam o tráfego, são dispositivos de função reduzida (RFD) conforme a IEEE 802.15.4. Eles também podem dormir, o que torna os dispositivos finais uma escolha adequada para dispositivos operados por bateria. Um dispositivo final tem apenas um FFD pai, que será ou um coordenador ou um roteador, geralmente será o dispositivo mais próximo de quando foi adicionado a rede. Todas as comunicações para o dispositivo final são feitas por meio de um FFD pai. Se um roteador pai ficar *offline*, todo o tráfego para seus filhos cessará até que os dispositivos finais atinjam o tempo limite e tentem encontrar um novo FFD pai que esteja mais próximo, ou seja, com melhores condições de LQI (ZIGBEE, 2017).

### 2.5.4 Modelo OSI do Zigbee

Esta seção é uma visão geral de como a pilha de protocolos Zigbee se divide conforme o modelo OSI. Pode-se dividir em três grupos principais: camadas físicas e MAC, camadas de rede e transporte, camada de aplicação.

A arquitetura da pilha do protocolo ZigBee é composta por um conjunto de blocos chamados camadas. Cada camada executa um conjunto específico de serviços para a camada acima. Uma entidade de dados fornece um serviço de transmissão de dados e uma entidade de gerenciamento fornece todos os outros serviços. Cada entidade de serviço expõe uma interface para a camada superior por meio de um ponto de acesso de serviço (SAP), e cada SAP suporta uma série de primitivas de serviço para obter a funcionalidade necessária.

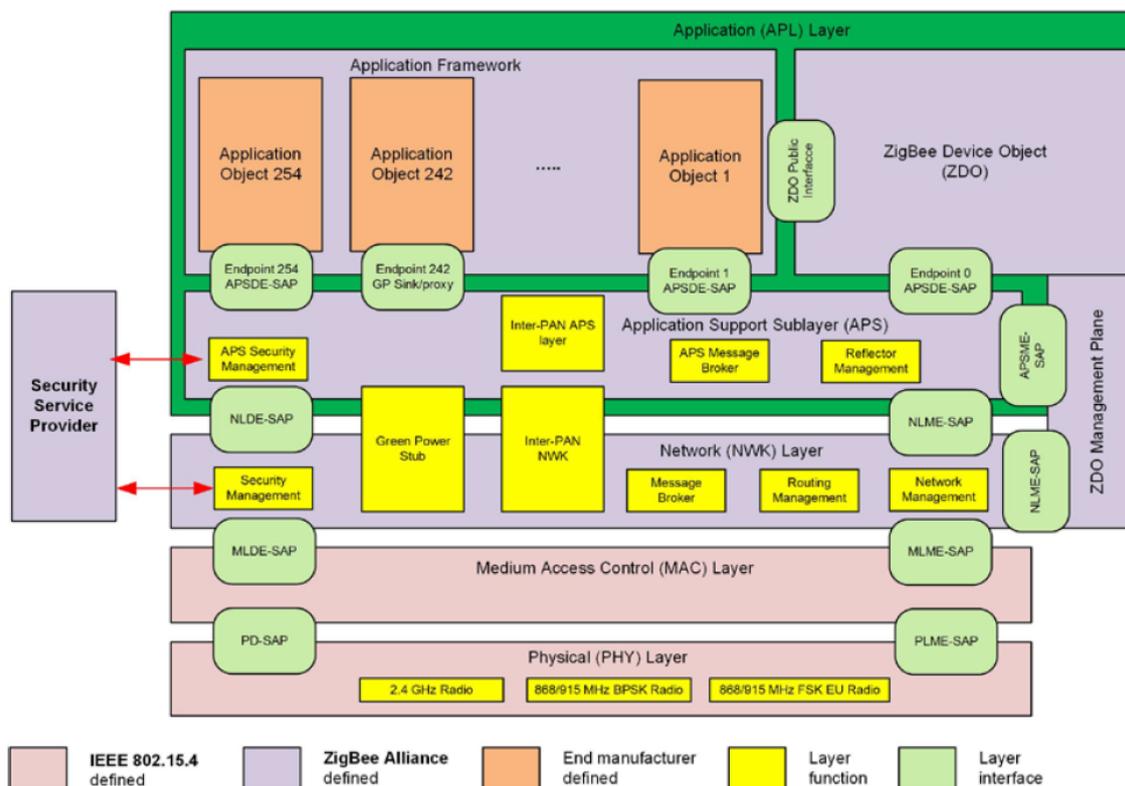
O padrão IEEE 802.15.4 define as duas camadas inferiores: a camada física (PHY) e a subcamada de controle de acesso ao meio (MAC). A ZigBee Alliance, com isto fornece a camada de rede (NWK) e a estrutura para a camada de aplicação. A estrutura da camada de aplicação consiste na subcamada de suporte de aplicação (APS) e nos objetos de dispositivo ZigBee (ZDO). Os objetos de aplicação definidos pelo fabricante usam a estrutura e compartilham APS e serviços de segurança com o ZDO (ZIGBEE, 2017). Conforme figura 8, apresenta o esboço da arquitetura da pilha de protocolos ZigBee.

#### 2.5.4.1 Camadas física e MAC

As camadas Física e MAC do protocolo Zigbee são definidas pelo IEEE 802.15.4 de 2015, e foram revisadas na sessão anterior. Conforme o manual do protocolo Zigbee, apenas pequenos ajustes foram realizados para adequar a camada MAC do padrão IEEE 802.15.4 a pilha Zigbee e os mesmos estão descritos no Anexo D do manual da especificação (ZIGBEE, 2017).

Os desenvolvedores de pilha MAC e ZigBee descobriram que a implementa-

Figura 8 – Arquitetura de pilha ZigBee.



Fonte:(ZIGBEE, 2017).

ção de um protocolo de camada MAC completo é um grande empreendimento e requer muito espaço de código. Mesmo com os recursos opcionais de segurança GTS e MAC eliminados, não é surpreendente descobrir que o MAC ocupa mais de 24 KB de espaço de código em um processador com 64 KB de espaço disponível. A ZigBee Alliance adotou uma política de compensação para declarar os recursos MAC que não são necessários para dar suporte a um perfil de pilha específico opcional em relação a esse perfil de pilha. Em particular, qualquer recurso MAC que não será explorado como resultado do teste de conformidade da plataforma para um perfil de pilha específico não precisa estar presente para que uma implementação seja declarada compatível com a plataforma.

Por exemplo, como o perfil de pilha do ZigBee-Pro depende de uma rede sem *beacon*, o teste de conformidade da plataforma para o perfil de pilha não emprega *beaconing*. O código para suportar balizamento regular, rastreamento de *beacon* e assim por diante, pode, portanto, estar ausente da base de código do dispositivo em teste sem o conhecimento dos testadores, sem apresentar um problema com relação à certificação de conformidade da plataforma. A lista exata de recursos MAC que devem ser suportados em uma plataforma é descrita no documento *protocol implementation conformance state-*

ment (PICS) usado para teste de conformidade MAC (ZIGBEE, 2017). As redes ZigBee-Pro, podem, conter dispositivos alimentados por bateria. Os roteadores ZigBee devem ter seus receptores habilitados sempre que não estiverem transmitindo, com isto a recomendação é que os roteadores e coordenadores não estejam alimentados por bateria.

Como mencionado acima, as redes ZigBee-Pro são redes sem *beacon* e, na ausência de um mecanismo explícito para sincronização e transmissão indireta, os dispositivos adormecidos devem definir seu próprio ciclo e usar *polling*, sob controle ZDO (*ZigBee device object*), caso eles esperam receber quadros que são direcionados a eles quando estão dormindo. O conjunto de recursos fornece que os dispositivos pai, ou seja, roteadores e coordenadores ZigBee, mantenham quadros de 7,68 segundos em 2,4 GHz em nome de dispositivos finais adormecidos e isso também é, a grosso modo, a taxa máxima de pesquisa prescrita. Os dispositivos podem implementar um intervalo de sondagem maior, no entanto, a aplicação terá que lidar com a perda potencial de mensagens durante ciclos de suspensão mais longos (ZIGBEE, 2014).

*CSMA Backoff Timing*: A especificação IEEE 802.15.4-2015 fornece um aumento no parâmetro *macMaxBE* de 5 para 8. Esse valor mais alto é permitido no ZigBee e é recomendado como padrão. O valor padrão de *macMinBE* deve ser 5 em vez de 3. Isso fornece melhor desempenho de junção em redes densas onde muitos dispositivos podem estar respondendo a uma solicitação de *beacon* (ZIGBEE, 2017).

#### 2.5.4.2 Camadas de rede e transporte

As camadas de rede e transporte definem o roteamento, a segurança e o transporte entre os vários nós de uma rede Zigbee. Isso inclui o modelo de criptografia de rede.

O Padrão Zigbee utiliza uma versão do protocolo de roteamento AODV (*ad hoc on-demand distance vector*) onde a rota de comunicação é formada quando uma requisição é gerada por um nó fonte. Com a troca de dados entre a fonte e o destino, a rota pode ser reservada por nós intermediários para garantir os registros do roteamento para que a comunicação seja garantida (MULLER, 2012).

A camada de rede ZigBee (NWK) suporta topologias em estrela, árvore e malha (*mesh*). Em uma topologia em estrela, a rede é controlada por um único dispositivo chamado coordenador ZigBee. O coordenador ZigBee é responsável por iniciar e manter os dispositivos na rede. Todos os outros dispositivos, conhecidos como dispositivos finais, se comunicam diretamente com o coordenador ZigBee. Em topologias de malha e árvore, o coordenador ZigBee

é responsável por iniciar a rede e por escolher certos parâmetros-chave de rede, mas a rede pode ser estendida através do uso de roteadores ZigBee. Em redes em árvore, os roteadores movem os dados e controlam as mensagens pela rede usando uma estratégia de roteamento hierárquico. As redes em árvore podem empregar comunicação orientada por *beacon* conforme descrito na especificação IEEE 802.15.4. As redes em malha permitem a comunicação completa ponto a ponto. Roteadores ZigBee em redes em malha atualmente não emitem *beacons* IEEE 802.15.4 regulares (ZIGBEE, 2017).

#### 2.5.4.3 Camada de aplicação

É a camada de topo da pilha de protocolo Zigbee. Nela contém aplicações que irão dar funcionalidade para o nó sensor. Cada nó sensor pode ter de 1 a 240 pontos de aplicações, que são chamados de *endpoint*. Para escrever ou ler em uma instância de um nó sensor, é necessário conhecer o seu endereço e o *endpoint* de interesse. Um exemplo de *endpoint* é a variável *smoke alarm* que pode estar na condição verdadeira ou falsa (ZIGBEE, 2017).

O protocolo Zigbee precisa de informações da rede para a sua operação, com isso, cada nó sensor deve ter três *descriptors* que são obrigatórios que são o: *descriptors simple*, *node* e *node power*. Resumidamente o *simple descriptor* traz informações sobre o tipo de aplicação do dispositivo e *endpoints* implementados, bem como os *clusters* implementados com a descrição das entradas e saídas dos mesmos. O *node descriptor* informa sobre o tipo (dispositivo final, roteador ou coordenador), a frequência utilizada, as funções IEEE 802.15.4 implementadas, código de fabricação, versão da pilha Zigbee utilizada e tamanho máximo do *buffer*. O *node power descriptor* contém informações sobre modo de operação de energia, autonomia da bateria (caso nó alimentado por bateria) e indica se é alimentado por bateria (ZIGBEE, 2017).

O perfil de aplicação do nó sensor, também é uma informação disponibilizada na camada de aplicação. Por exemplo: aplicação industrial, predial, residencial etc... Pois para cada aplicação o nó sensor pode possuir características dedicadas. Para garantir a interoperabilidade entre diferentes fabricantes a Zigbee Alliance definiu um conjunto de tipos de dispositivos padrão. Por exemplo, um dispositivo *Smoke detector* é uma entidade de software que define a funcionalidade de um dispositivo (ZIGBEE, 2017).

Uma entidade de dados chamada de *smoke alarm* que é tratada por um *endpoint* é chamada de atributo. Uma aplicação pode se comunicar através de um conjunto de atributos. As aplicações Zigbee utilizam o conceito de *clusters* para comunicar valores de atributos entre dispositivos. *Cluster* corresponde à uma parte da funcionalidade da aplicação (ZIGBEE, 2017).

Os objetos de dispositivos Zigbee (ZDO), representam uma classe base de funcionalidade que fornece uma interface entre os objetos de aplicativo, perfil do dispositivo e o suporte de aplicação de sub-camada (APS). O ZDO é responsável por inicializar os serviços APS, NWK e de segurança. Também é responsável por reunir informações de configuração dos *endpoints* e determinar e implementar descoberta, gerenciamento de segurança, gerenciamento de rede e gerenciamento de vinculação (*binding*). O ZDO apresenta interfaces públicas para os objetos de aplicação na camada de *framework* de aplicação para controle de dispositivos e funções de rede pelos objetos de aplicação. A interface pública fornece gerenciamento de endereço do dispositivo, descoberta, vinculação e funções de segurança dentro da camada de estrutura do aplicativo da pilha de protocolo ZigBee (ZIGBEE, 2017).

Uma das funções da APS é a *binding* que possibilita que dois dispositivos se comuniquem diretamente, por exemplo um detector de fumaça (dispositivo final) acionando uma sirene (roteador). Para esta funcionalidade possa ser aplicada, é necessário que os dispositivos envolvidos sejam compatíveis e que tenha pelo menos um roteador envolvido, que será o responsável de gerenciar esta comunicação (ZIGBEE, 2017).

## 2.6 Requisitos normativos de RSSF para aplicação em SDAI

Sistemas de detecção e alarme de incêndio (SDAI) são normatizados por instituições globais e possuem grande importância na segurança contra incêndios em construções prediais. Normalmente são sistemas cabeados, com comunicação redundante utilizando laço classe A e possuem alimentação de *backup* em caso de falta de energia (NBR-17240, 2010). Estes sistemas, possuem restrições temporais de alarme, falha e duração do sistema de *backup* de energia. A americana NFPA (*National fire protection association*) e a europeia EN (*European standards*) são algumas das instituições relevantes que regulamentam sobre SDAI.

As RSSF, possuem grande relevância, nos sistemas de segurança patrimonial e detecção e alarme de incêndio. Principalmente devido a sua praticidade de instalação, não necessitando infraestrutura e cabeamentos. E com o avanço das RSSF, surgiu a necessidade de atualizações nas regulamentações para atendimento a este tipo de tecnologia. Com isto, as instituições citadas, atualmente possuem a regulamentação para a aplicação de RSSF em SDAI. Importante ratificar neste capítulo que o sistema de monitoramento e sinalização de eventos (MSE) proposto no estudo deste trabalho, deve levar em consideração estas normas de SDAI, sendo requisitos temporais regulamen-

tados. Abaixo serão descritas as especificações temporais básicas de cada norma:

### **2.6.1 EN54-25**

Conforme EN54-25, de 2012 (EN54, 2012). Seguem abaixo as restrições temporais de interesse.

- Tempo de transmissão de alarme: o tempo máximo permitido entre a detecção do fogo e a sinalização no painel de controle é de 10 segundos.
- Monitoramento: dispositivo não encontrado ou com mau funcionamento deve ser sinalizado no painel de controle em até 300 segundos após a ocorrência do erro.
- Vida útil da bateria: baterias usadas com detectores sem fio devem durar pelo menos 3 anos em operação normal.

### **2.6.2 NFPA-72**

Conforme NFPA-72, de 2016 (NFPA-72, 2016), seguem abaixo as restrições temporais para RSSF.

- Alarme, 23.8.2.6.1 (4): O Sistema deve ser monitorado para garantir que os equipamentos críticos para a operação do sistema de alarme de incêndio reportem eventos aos dispositivos de interface e controle de emergência em até 10 segundos.
- Falha, 23.16.4.2: A ocorrência de qualquer falha que desabilite a comunicação entre qualquer transmissor/transceptor de rádio de baixa potência e a unidade de controle do sistema receptor/transceptor deve causar um sinal de falha de travamento dentro de 200 segundos na unidade de controle do sistema que identifica individualmente o dispositivo afetado.
- Bateria, 23.16.2 (2): As baterias devem ser capazes de operar o transmissor/transceptor de rádio de baixa potência e seus dispositivos por não menos de 1 ano antes do esgotamento da bateria onde o limite é atingido.

Pode-se observar nas normas que as regras de resposta temporal na comunicação dos sistemas sem fio, seguem as diretivas existentes dos sistemas cabeados.

Comparando a norma europeia EN54 e a americana NFPA72, existe uma pequena diferença em relação ao requisito de tempo para o reporte de falha de dispositivo, onde a NFPA 72 (200 segundos) é mais rígida em comparação

com a EN54. Na vida útil da bateria, a EN54 é mais rígida, exigindo pelo menos 3 anos de vida útil.

Um dos objetivos deste trabalho baseia-se no esforço em tentar atender os requisitos dessas normas, mas focando em estender a vida útil do nó sensor alimentado por bateria para além de três anos.

### 3 ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE

Conforme os objetivos gerais deste trabalho e a motivação, descritos no capítulo 1, a análise do estado da arte ocorreu em duas etapas:

- 1) Análise dos protocolos da camada MAC sem fio, especificamente sobre a eficiência energética destes protocolos e o impacto no tempo de vida útil das baterias;
- 2) análise de aplicações de RSSF para ambientes internos, como é o caso de sistemas de sinalização de eventos de emergência em prédios.

#### 3.1 Análise dos protocolos de camada MAC

Em RSSF, os protocolos de controle de acesso ao meio, camada MAC, conforme o modelo OSI, possuem fundamental importância nos problemas relacionados ao consumo de energia e no estabelecimento dos enlaces de comunicação entre os nós sensores vizinhos. Protocolos de camada MAC são responsáveis pela ativação e desativação do rádio, atuando diretamente no ciclo de trabalho (*duty cycle*) da comunicação de um nó sensor. Com base neste problema, diversos pesquisadores atuam buscando melhores técnicas para o controle de acesso ao meio.

Os trabalhos relacionados nesta seção, são voltados para o estado da arte em protocolos de camada MAC de RSSF. Estes trabalhos têm objetivos em comum, que são: buscar a eficiência energética, diminuir a latência e evitar perdas de pacotes para redes multi-saltos com baixa taxa de dados.

O trabalho de Kumar, faz uma análise sobre as propriedades essenciais da camada MAC dos protocolos de IoT e as causas comuns de consumo de energia em um nó sensor. Posteriormente, Kumar categorizou 47 protocolos de camada MAC, discutindo profundamente cada protocolo que foi categorizado, enfatizando os pontos fortes e fracos, fornecendo uma comparação detalhada (KUMAR *et al.*, 2018).

O trabalho de Kumar, categorizou os protocolos MAC em síncronos e assín-

cronos. Os protocolos síncronos são aqueles que possuem a dependência de um escalonamento temporal ou sincronização entre os nós. As mensagens de sincronização dos protocolos síncronos podem aumentar o consumo de energia dos nós sensores e o tráfego de dados da rede (KUMAR *et al.*, 2018).

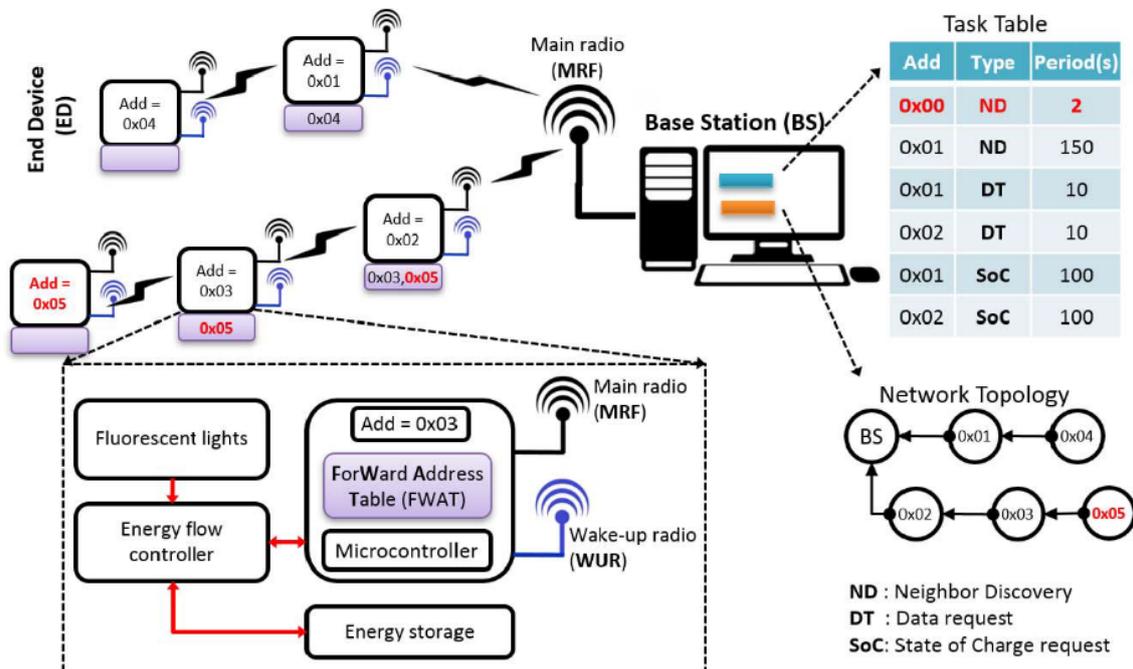
Os protocolos assíncronos não requerem agendamento ou sincronização entre os nodos. Um dos métodos é empregar escuta de baixa potência e amostragem da parte inicial da mensagem (preâmbulo), ou seja, para deixar o receptor dormir a maior parte do tempo e acordar rapidamente por um pequeno intervalo para escutar o canal. Quando um nó sensor deseja a comunicação, envia um preâmbulo e quando o receptor acorda e detecta o preâmbulo ele permanece acordado até que os dados sejam transmitidos. A vantagem dos protocolos assíncronos é que não há sincronização explícita entre emissor e receptor, portanto, não há sobrecarga de sincronização e a escuta ociosa do receptor é reduzida. Com isto, os protocolos assíncronos são flexíveis a mudanças na topologia. No entanto, um preâmbulo mais longo em escuta de baixa potência sofre de várias desvantagens como o consumo excessivo de energia devido à um longo preâmbulo, aumento da latência a cada salto, principalmente quando o receptor acorda no início do preâmbulo e também podem ocorrer colisões. Conforme o autor, existem diversas técnicas aplicadas para minimizar estes efeitos negativos dos protocolos assíncronos, como por exemplo o uso do preâmbulo encurtado, reconhecimento para parar o preambulo e endereçamento no preâmbulo (KUMAR *et al.*, 2018).

Kumar enfatiza, que no contexto atual a melhor opção é o protocolo IEEE 802.15.4, por ser padronizado e já ser utilizado em diversos protocolos de RSSF. Também por possuir melhor custo de implantação. Por fim, o trabalho finaliza com sugestões sobre futuras direções de pesquisa como por exemplo a exploração e o maior entendimento do comportamento das tecnologias implementadas no IEEE 802.15.4.e através de simulações, além dos testes de hardware (KUMAR *et al.*, 2018).

Alguns pesquisadores estudam o uso de formas adaptadas da camada física para possibilitar controles diferenciados da camada MAC. No caso do trabalho do Pegatoquet, (PEGATOQUET; LE; MAGNO, 2019) é proposto um nó sensor com dois rádios independentes. Um dos canais do nó sensor é utilizado para tarefas de despertar (*wake-up*) para a ativação dos nós vizinhos utilizando uma baixa taxa de dados e o outro canal é utilizado para a transmissão das mensagens com uma alta taxa de dados, na figura 9 é representada esta arquitetura.

O método de controle da camada MAC conhecido tradicionalmente como *wake-up* é um método assíncrono que permite uma eficiência energética im-

Figura 9 – Arquitetura física proposta por Pegatoquet.

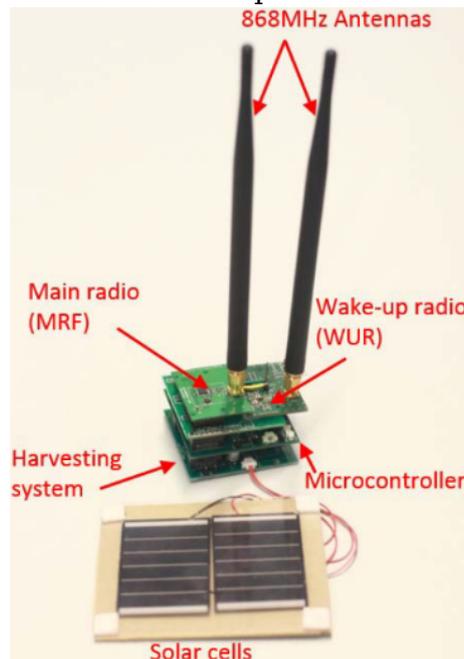


Fonte: (PEGATOQUET; LE; MAGNO, 2019).

portante, pois os nós sensores “dormem” por um período, ou seja, não utilizam o rádio. Mas este método tem efeitos indesejados em redes multi-saltos, como um aumento na latência e colisões de dados. No método proposto por Pegatoquet, possibilita-se uma eficiência energética importante para a aplicação de monitoramento e com baixo valor de atraso fim-a-fim (*end-to-end delay*). O método proposto permite uma diminuição da latência ao mesmo tempo que evitou perdas de pacotes que causam retransmissões. Estes resultados foram obtidos através de simulações em Omnet++ em comparação com outros protocolos MAC do tipo *wake-up*. E um experimento foi montado para a comprovação do método com dois rádios em um nó sensor, conforme figura 10 (PEGATOQUET; LE; MAGNO, 2019).

O trabalho de Moulik, (MOULIK; MISRA; DAS, 2017) propõe um mecanismo de ajuste de carga útil (*payload*) adaptativo do quadro MAC para redes de área corporal sem fio (*wireless body area networks* - WBANS) para maximizar a probabilidade de sucesso de entrega do pacote, incrementado a confiabilidade. Conforme o autor, o algoritmo proposto, "Adaptive Tuned MAC (AT-MAC)", é compatível com o protocolo IEEE 802.15.4. O AT-MAC prioriza os nós sensores com base na criticidade dos parâmetros de saúde que estão sendo medidos pelos respectivos nós sensores. Moulik considera uma abordagem analítica baseada em cadeia de Markov. Expressões para confiabilidade, consumo de energia e vazão de dados (*throughput*) foram definidas, para ava-

Figura 10 – Nó sensor do experimento de Pegatoquet.



Fonte: (PEGATOQUET; LE; MAGNO, 2019).

liar o desempenho da rede. Os resultados de Moulik indicaram que a baixa taxa de dados e a baixa potência do IEEE 802.15.4, faz com que o mesmo possa ser efetivamente usado em casos de WBANs se a carga útil estiver ajustada corretamente por meio do algoritmo proposto. Os autores concluíram que o protocolo AT-MAC proposto aumenta cerca de 70% a confiabilidade de um nó sensor crítico em uma WBAN (MOULIK; MISRA; DAS, 2017).

Em Gao (GAO *et al.*, 2015), foi proposto um preâmbulo codificado, "*coded preamble* (COPE)", que explora o potencial de entrega de dados de preâmbulos através de rede em redes assíncronas. COPE tem duas características importantes. Primeiro, um receptor passivo define um esquema de seleção permitindo que os nós decidam se devem receber os pacotes de preâmbulos ouvidos, sem introduzir comunicação extra. Em segundo lugar, o COPE suporta múltiplas primitivas de roteamento, como *unicast* e *broadcast*, realizando um link entre a camada MAC e a camada de rede. COPE foi analisado por um novo modelo analítico. Os resultados mostram que o COPE é capaz de melhorar significativamente a eficiência energética de *unicast* e *broadcast*. Eles também implementaram o COPE na plataforma TinyOS/TelosB e avaliaram sua eficiência energética. Os autores afirmam que os resultados mostram que o COPE reduz significativamente o tempo de rádio ligado em configurações de rede práticas.

Chen, (CHEN *et al.*, 2017) propõem um novo protocolo de concorrência de acesso ao meio (NoPSM), com o objetivo de atender as RSSF com uso in-

tenso de dados. O NoPSM é caracterizado por determinar a simultaneidade de transmissão. A base do NoPSM não são modelos de interferência PRR-SINR construídos proativamente para cada nó na rede. Em vez disso, ele constrói relações de interferência de forma reativa analisando passivamente as relações sobrepostas entre os registros de tempo das transmissões de dados em bloco e o status de recepção correspondente de cada pacote em blocos. Com base nas relações de interferência construídas, os nós tomam decisões sobre a concorrência de transmissão com um critério abrangente, que não apenas estima o PRR de quaisquer links ativos após iniciar um novo, mas também estima a melhoria de rendimento obtida com transmissões simultâneas. O desempenho do NoPSM foi avaliado no simulador TOSSIM, e comparado com o CSMA e com o protocolo de acesso ao meio cognitivo (CMAP+). Os autores afirmam que os resultados experimentais mostraram que o NoPSM supera o CSMA e o CMAP+ em termos de taxa de entrega, taxa de transferência, latência de entrega e consumo de energia.

### **3.2 Análise de aplicações de RSSF para ambientes internos**

Adicionalmente, realizou-se uma pesquisa do estado da arte das aplicações de RSSF, que estão relacionadas com ambientes internos, monitoramento e sinalização de eventos. Estes trabalhos estão resumidamente explanados nesta sessão e serão analisados em comparação com o trabalho desta dissertação.

O trabalho de Weitao Xu, (XU *et al.*, 2019) apresenta o projeto, desenvolvimento e implantação de um sistema de monitoramento inteligente de iluminação de emergência para prédios inteligentes (*smart buildings*). Sistemas de iluminação de emergência, são obrigatórios por lei em construções prediais. O trabalho busca estabelecer uma RSSF onde os nós sensores que serão os repetidores da rede estão conectados na iluminação de emergência com o objetivo inicial de monitoramento e teste de funcionamento do sistema de iluminação de emergência. O projeto expandiu para possibilitar o provimento de conectividade para outros nós sensores que podem vir a ingressar nesta RSSF. Para definição de tecnologia a ser utilizada, Weitao Xu realizou um estudo e testes comparativos de comunicação ponto a ponto com LoRa e IEEE 802.15.4. Os testes comprovaram que a camada física do LoRa possui maior penetração dentro da construção, conseguindo um alcance de até cinco lajes de pavimentos com mais de 90 % de confiabilidade na taxa de recepção dos pacotes (PRR). Já o IEEE 802.15.4 apresentou uma PRR menor de 10 % com duas lajes de piso. Segundo o autor os testes foram realizados com 5 dBm de

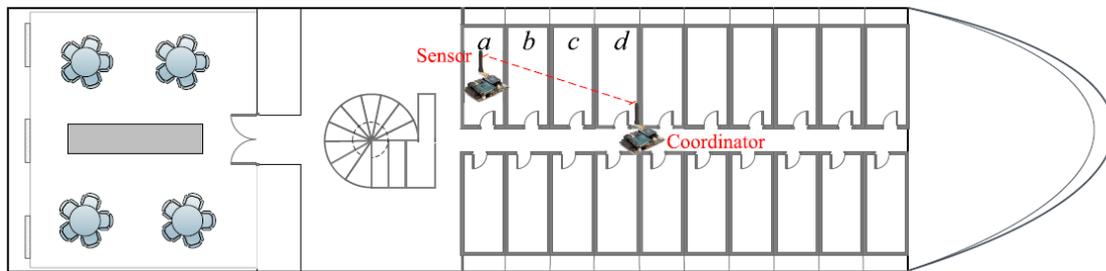
potência de transmissão para as duas tecnologias. O autor não deixa claro se o IEEE.802.15.4 foi utilizado em 2,4 GHz ou em Sub-GHz, pois o LoRa é utilizado em Sub-GHz. Este aspecto de frequência de utilização é relevante pois em Sub-GHz tende a ter maior penetração em ambientes internos comparado ao 2,4GHz. Outro aspecto é que os pacotes de comunicação do Lora, são relativamente menores que o IEEE 802.15.4 e isto também impacta no alcance da comunicação. A tecnologia do rádio LoRa, por possuir a técnica de modulação CSS (*Chirp Spread Spectrum*), também proporciona um maior alcance na transmissão comparado ao rádio IEEE 802.15.4. O autor, não diz qual foi a taxa utilizada para transmissão dos pacotes para o IEEE 802.15.4, mas cita que no LoRa testou a taxa máxima de 31,8Kbp/s. Caso o IEEE 802.15.4 tenha sido testado em 2,4 GHz, a carga útil é de 60Kbp/s podendo no total chegar a 250Kbp/s.

Os testes realizados pelo autor deixam questões em aberto conforme argumentado acima. Outra questão tratada pelo autor, é a constatação do mesmo que a utilização da tecnologia LoRa no modo tradicional, utilizando a rede em estrela (LoRaWan) apresenta atraso nas transmissões e dificuldades para lidar com vários nós, além de limitar o alcance da rede. O Autor, sugere o uso do LoRa no modo *Mesh* e realiza esta implementação. Ele não trata sobre o atraso fim-a-fim e sobre o consumo de energia de um nó alimentado por bateria. Em comparação ao trabalho de Weitao Xu, o trabalho desta dissertação levou em consideração a utilização do protocolo ZigBee para os experimentos, reconhecendo as limitações da camada física do IEEE 802.15.4 em 2,4 GHz e a utilização da camada MAC em modo assíncrono. Pois diversas vantagens existem, como por exemplo: facilidade de compra de equipamento e custos relativamente baixos, facilidade de montagem da RSSF, padronização do protocolo, robustez da rede *mesh* multi-salto e facilidade de integração. Os dois pontos negativos principais do Zigbee em 2,4 GHz para esta aplicação são o alcance do sinal e o risco de interferência por sobreposição de canal.

Já o trabalho de Zeng (ZENG *et al.*, 2021), tem o foco em análise de confiabilidade e compensação de atraso de RSSF IEEE 802.15.4 *unslotted* para ambiente de bordo em navios. Apesar deste trabalho não ser baseado em ambientes prediais, traz uma importante análise, pois ambientes de bordo de navios são caracterizados por uma construção que utiliza muitos elementos de aço causando diversos problemas de atenuações e interferências de outros dispositivos de bordo, já que os ensaios são em 2,4GHz. As contribuições do trabalho de Zeng mostram que ao analisar a distribuição da taxa de perda de pacotes da camada física de redes IEEE 802.15.4 *unslotted* em ambiente interno de navios, verificou-se que esta perda é exponencial com a distância.

Zeng também apresentou um modelo de cadeia de Markov tridimensional modificado para analisar o algoritmo CSMA/CA *unslotted* sem *beacon* do protocolo IEEE 802.15.4 para ambiente de bordo. Utilizando o simulador Omnet++ e o *framework* INET 4 realizou a análise cruzada entre atraso e confiabilidade usando a variável de *macMaxFrameRetries* para diferentes requisitos de QoS (*Quality of service*).

Figura 11 – Experimento realizado por Zeng.



Fonte: (ZENG *et al.*, 2021).

Os resultados do estudo de Zeng, mostraram que a configuração *unslotted* do IEEE 802.15.4, apresenta melhor desempenho em RSSF de ambientes com atenuações abruptas e interferências. E que ajustando os parâmetros de *Backoff* e retransmissão é possível adequar a confiabilidade da rede conforme as restrições temporais da aplicação em redes que não estão saturadas. Zeng não apresenta o comportamento da rede em configuração multi-saltos (*mesh*), apesar de que em seu experimento, estar utilizando o Zigbee. Em contrapartida ele chega na conclusão que o protocolo assíncrono, que no caso o *unslotted* IEEE 802.15.4, possui vantagens para redes que não estão saturadas, e isto se alinha com o estudo desta dissertação. Uma análise energética da RSSF não é realizada por Zeng, pois não é o seu foco.

## 4 PROPOSTA DE TRABALHO

Conforme já mencionado, este trabalho originou-se na análise dos protocolos de camada MAC de RSSF, buscando atender os requisitos temporais de alarme, falha e duração de bateria das normas de SDAI.

Com isto, foi realizado a pesquisa sobre a regulamentação brasileira e internacional de SDAI verificando a existência de normas para utilização com RSSF. Foi verificado que o Brasil possui a regulamentação padrão para SDAI cabeados, NBR-17240 (NBR-17240, 2010) e na falta de uma norma local para SDAI com RSSF, a ABNT utiliza a norma internacional ISO 7240-25 (ISO7240-25, 2016). Na regulamentação internacional, além da ISO 7240-25 foram encontrados nas normas NFPA-72 e EN54-25 as restrições para aplicação de RSSF em SDAI. Verificou-se que a ISO 7240-25 foi baseada na norma EN54-25.

As restrições temporais verificadas nas normas serviram como base para as análises realizadas neste trabalho. Os detalhes de interesse nestas normas estão descritos na seção 2.6.

Após as primeiras pesquisas sobre protocolos de camada MAC, verificou-se que existem diversos estudos que buscam a eficiência energética através de técnicas de controle de acesso ao meio. Apesar de existirem diversas variações de protocolos MAC, conforme visto na revisão de Kumar (KUMAR *et al.*, 2018), pode-se dividir em dois tipos principais: síncronos e assíncronos. Com base nisso, foi realizado uma análise de desempenho para a aplicação em SDAI. Para possibilitar esta análise, optou-se na utilização de um simulador. Então na primeira etapa deste trabalho, a proposta foi a realização de simulações em protocolos de camada MAC síncronos e assíncronos, avaliando os mesmos nos requisitos temporais de SDAI. Os detalhes da implementação das simulações estão descritos na seção 4.1 e os resultados estão apresentados na seção 5.1.

Complementando os objetivos deste trabalho, é realizado uma análise de um experimento de MSE com uma RSSF em um prédio, verificando as restrições da aplicação e também confrontando com os requisitos normativos de

SDAI. Para possibilitar a implementação deste experimento, foi realizada uma pesquisa sobre os protocolos de RSSF padronizados existentes e a sua respectiva viabilidade de aplicação. Após a análise dos protocolos padronizados, levando em consideração o uso do protocolo de camada física e MAC IEEE 802.15.4, optou-se em utilizar o protocolo de RSSF Zigbee. A escolha de utilizar o protocolo Zigbee passa por duas questões: a primeira, é que o Zigbee, utiliza o IEEE 802.15.4 no modo sem *beacon*, alinhando a funcionalidade da camada MAC para um protocolo do tipo assíncrono. Isto converge com os resultados obtidos nas simulações, que apresentaram algumas vantagens dos protocolos assíncronos. O segundo fator determinante foi o acesso aos produtos Zigbee, que são encontrados com maior facilidade e com um custo acessível, viabilizando o experimento. A implementação da RSSF está descrita na seção 4.2 os resultados na seção 5.2.

#### **4.1 Análise dos protocolos MAC para os requisitos de SDAI**

As RSSF, devido às suas características intrínsecas, possuem diversos parâmetros de interdependência e conforme Kumar (KUMAR *et al.*, 2018), as RSSF são dependentes da aplicação, ou seja, no contexto tecnológico atual deve-se avaliar a aplicação e ajustar a RSSF.

Tratando-se de RSSF para SDAI, pode-se afirmar que o comportamento da rede será baseado nos eventos de comunicação de alarme e falha, que irão refletir no consumo de energia dos nós sensores. Cabe ressaltar que os eventos normais da rede são os de *feedback* de que não existe falha, juntamente com a informação de qualidade do link (LQI) e o valor atual da carga da bateria do dispositivo em valor percentual. Sobre os eventos de alarme, pode-se considerar que não devem ocorrer com frequência pois são eventos de fogo ou de alarme indevido. Eventos de alarmes de fogo, podem não ocorrer durante meses, sendo acionados apenas nos testes periódicos exigidos por norma.

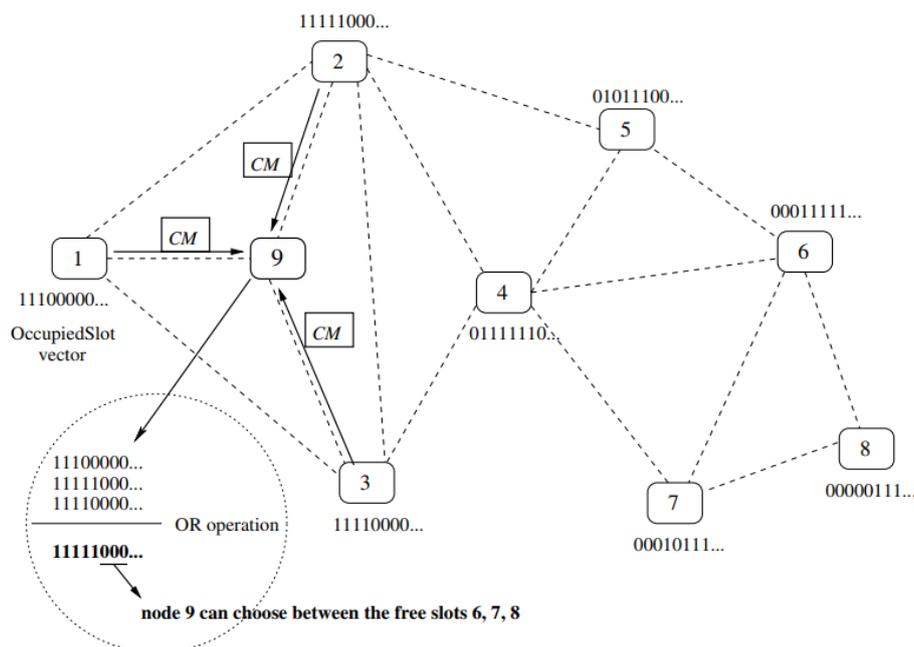
Um protocolo de camada MAC de RSSF adequado às necessidades de SDAI deve primeiramente atender os regulamentos de segurança e confiabilidade estabelecidos nas normas. Com isto, foram estudados alguns dos protocolos MAC existentes. Conforme a revisão de Kumar, os protocolos da camada MAC se dividem basicamente em síncronos e assíncronos, obviamente podendo existir versões híbridas.

Com base no estudo dos protocolos MAC e da análise de conformidade normativa, três tipos de protocolos de camada MAC foram avaliados. Uma breve descrição do funcionamento destes protocolos é apresentada a seguir.

- L-MAC: O "*Lightweight Medium Access Control (L-MAC)*" é um proto-

colo de acesso ao meio com eficiência energética projetado para redes de sensores sem fio. Ele usa um canal de frequência única e o meio sem fio é compartilhado entre os nós com uma abordagem de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA). O princípio de funcionamento do protocolo L-MAC é que, no início de cada *slot* de tempo, os nós que possuem esse *slot*, transmitam uma Mensagem de Controle "*control message*(CM)"contendo informações como sua identidade, endereço de destino e detalhes de sincronização. Durante esta operação, todos os nós devem estar ligados e escutando o início de cada intervalo de tempo para receber a CM. Depois disso, os nós de origem podem enviar os dados reais e os nós de destino pretendidos permanecem com o canal aberto para receber os dados, enquanto todos os outros nós podem desligar seu transceptor pelo resto do *slot* para economizar energia (TADDIA *et al.*, 2007).

Figura 12 – Protocolo L-MAC.

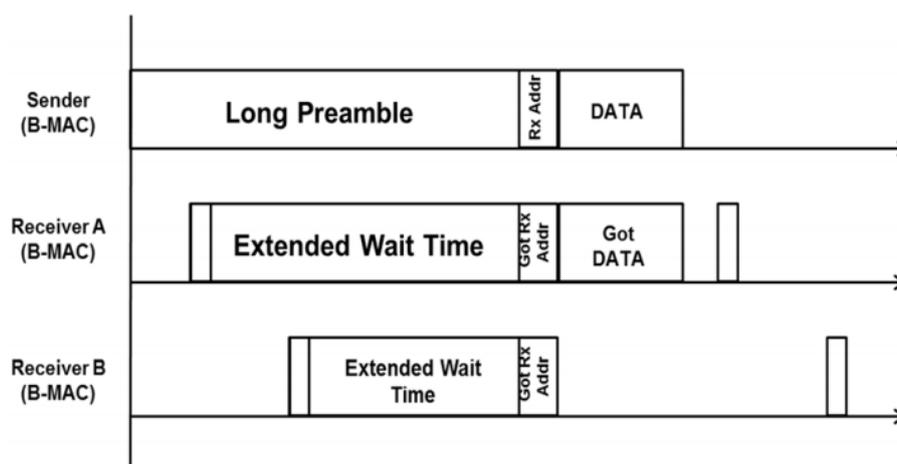


Fonte: (TADDIA *et al.*, 2007).

- "*Berkeley-MAC* (B-MAC)": Este protocolo de camada MAC usa a escuta de baixa potência, (LPL) e técnicas de amostragem de preâmbulo estendido para alcançar a comunicação de baixa potência. No modo de escuta de baixa potência, um nó receptor acorda periodicamente por um curto período para verificar qualquer atividade no canal usando a avaliação de canal "*Clear Channel Assessment* (CCA)". Se o receptor detecta um

preâmbulo, permanece acordado até o final do preâmbulo, que é imediatamente seguido pelos dados. Um nó receptor sabe se os dados são destinados a ele a partir do cabeçalho de dados. Ele continuará recebendo os dados se os dados forem para ele, ou simplesmente irá descartar os dados e dormirá se os dados não forem para ele. O comprimento do preâmbulo é definido pelo menos o intervalo do despertar do receptor para receber os dados de forma confiável (CANO *et al.*, 2009; KUMAR *et al.*, 2018).

Figura 13 – Protocolo B-MAC.

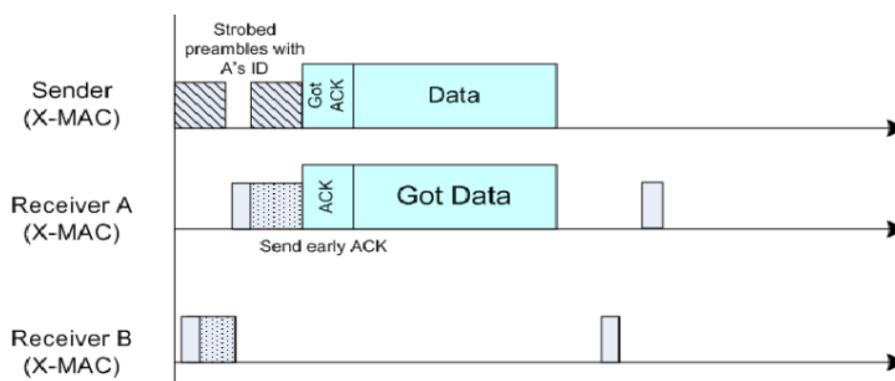


Fonte: (KUMAR *et al.*, 2018).

- X-MAC: este protocolo também usa técnicas de amostragem de preâmbulo para comunicação de baixa potência, a exemplo do B-MAC. Seu objetivo, é resolver os problemas de preâmbulos excessivos e falta de adaptação automatizada à carga para tráfego variável. Vários pacotes de preâmbulos curtos carregando endereços de receptores são transmitidos quando o remetente tem dados para enviar, em contraste com o uso de um preâmbulo longo em B-MAC. Se um nó acordar e receber um pacote de preâmbulo curto, ele examinará o endereço do nó receptor dentro do pacote. Se o nó sensor não for o receptor pretendido, ele retorna ao modo de suspensão e seu ciclo de trabalho continua normalmente, evitando assim o problema de o receptor ficar com o canal aberto por muito tempo sem necessidade. Se o nó for o receptor pretendido, ele imediatamente transmite um "ACK" para o remetente e permanece acordado para o pacote de dados subsequente. Do lado do emissor, entre os breves preâmbulos, o emissor aguarda uma confirmação do nó de destino (BEAUDAUX *et al.*, 2014). Quando uma confirmação antecipada é enviada de volta ao remetente, ele para de enviar os preâmbulos

e começa a transmitir o pacote de dados. Esses preâmbulos curtos são chamados de preâmbulos estroboscópicos, ou seja, o remetente alterna rapidamente entre o pacote de preâmbulo curto e um tempo de espera curto. A Figura 14 mostra como o X-MAC funciona com seus preâmbulos estroboscópicos. O receptor A envia o ACK para o remetente, pois é o receptor pretendido do pacote, enquanto o receptor B entra no modo de suspensão após ouvir o preâmbulo curto, pois não é o destinatário pretendido do pacote de dados. O receptor A recebe o pacote de dados enquanto o receptor B retorna ao seu ciclo de trabalho (BEAUDAUX *et al.*, 2014; KUMAR *et al.*, 2018).

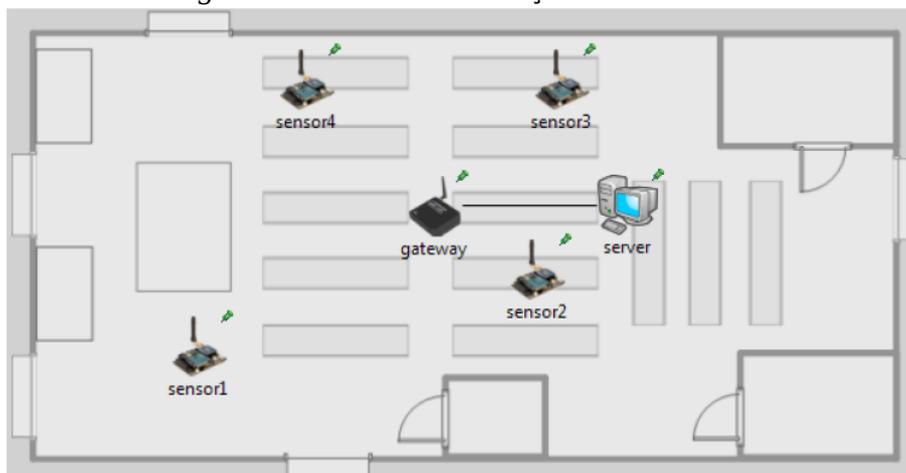
Figura 14 – Protocolo X-MAC.



Fonte: (KUMAR *et al.*, 2018).

A avaliação das respostas temporais dos protocolos MAC descritos nesta seção foram realizadas com base nos dados gerados por simulação de Software. O OMNet++ 5.5.1 foi o software de simulação escolhido, pois verificou-se que o mesmo é um dos softwares mais utilizados para estudos de RSSF. Para implementar os modelos dos protocolos, foi escolhido o *framework* INET 4 que possui uma biblioteca de aplicações de RSSF para OMNet++ (OMNET++, 2019). O INET 4 fornece os protocolos MAC estudados, ou seja, B-MAC, X-MAC e L-MAC, possibilitando a análise do comportamento destas RSSF no software Omnet++. As simulações foram realizadas e os dados de *log* foram armazenados para análise. O OMNet++ possui ferramentas para análise e processamento de dados. Com estas ferramentas, os dados de consumo de energia em cada modo do rádio foram integrados e gerados para possibilitar o entendimento do consumo geral de energia de cada protocolo. A arquitetura de RSSF da simulação realizada é composta por quatro nós sensores sem fio, conforme a Figura 15. A aplicação é configurada para que os nós sensores se comuniquem entre si e com o *gateway*. Para todas as execuções da simulação, o nó sensor 1 foi escolhido para ser avaliado.

Figura 15 – RSSF simulações Omnet++.



Fonte: (OMNET++, 2019).

Tabela 2 – Parâmetros do nó sensor CC2500 no Omnet++.

Radio parameter	Data
Carrier Frequency	2.45 GHz
Band width	2.8 MHz
Trasmmitter bit rate	19200 bps
Transmitter header Length	8 b
Transmitter preamble Duration	0.0001 s
Sensor message Length	10 Bytes

Fonte:(OMNET++, 2019).

O atraso fim-a-fim (*end-to-end delay*) foi avaliado e aplicado para estudar o atraso médio. O atraso médio fim-a-fim é o tempo médio que um pacote leva para viajar do nó fonte ao nó sorvedouro (*sink*). As simulações foram armazenadas e com a ferramenta do Omnet++ foi realizada a média dos dados. A simulação foi realizada com diferentes tempos de parâmetro de envio de mensagens, objetivando verificar o comportamento da rede em cada situação.

Para habilitar a simulação da camada MAC de uma RSSF, é necessária a simulação das demais camadas OSI. Assim, os mesmos parâmetros foram utilizados para as demais camadas OSI para cada protocolo MAC simulado. Para a camada de transporte, o protocolo é o UDP e para a camada de rede, o IPV4. Para os parâmetros de rádio e consumo de energia, as Tabelas 2 e 3, resumem os parâmetros. O modelo de consumo de energia do rádio, conforme parâmetros da Tabela 3, é baseado na folha de dados do transceptor de RF CC2500.

Visando estender a vida útil de um nó sensor, foi realizado um levantamento das baterias de alto desempenho disponíveis no mercado. Uma bateria de lítio

Tabela 3 – Parâmetros de consumo do nó sensor CC2500 no Omnet++.

Modo do rádio	Consumo de energia
Off	0 mW
Sleep	0.001 mW
Switching	25 mW
Receiver Idle	0.005 mW
Receiver Receiving	50 mW
Transmitter Idle	5 mW
Transmitter Transmitting	75 mW

Fonte:(OMNET++, 2019).

foi escolhida para a avaliação. Para estimar a vida útil de um nó sensor, foi fornecida uma bateria modelo LS 26500 (SAFT, 2005). Os parâmetros de energia podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros bateria LS26500.

Características elétricas	Valores
Capacidade Nominal	7,7 Ah
Tensão Nominal	3,6 V
Energia Nominal	27,72 Wh

Fonte: (SAFT, 2005).

Usando a equação 1 é possível encontrar a energia inicial da bateria.

$$BIE(J) = C(Ah) * V(V) * t(s) \quad (1)$$

Onde:

BIE = Energia inicial da bateria (J) ou (Ws)

C = Capacidade (Ah)

V = Tensão (v)

t = Tempo (s)

BIE = 7,7\*3,6\*60\*60 = 99.792 Ws

Para verificar o comportamento do consumo de energia de cada protocolo MAC sob diferentes condições de tráfego de dados, foram atribuídos períodos de envio de dados nos parâmetros de entrada do simulador. Os períodos definidos foram 3, 60 e 150 segundos. Esses períodos definidos de envio de

dados para simulações estão relacionados aos requisitos das normas de SDAI NFPA-72 e EN54-25. Espera-se que eventos de alarme cheguem ao destino em no máximo 10 segundos e eventos de falha em até 200 segundos.

Os resultados de *end-to-end delay* e consumo de energia das simulações estão descritos na seção 5.1.

## 4.2 Análise de aplicação MSE baseado em RSSF

O monitoramento e a sinalização de eventos (MSE) prediais, utilizando redes de sensores sem fio (RSSF), está ligado diretamente a motivação deste trabalho. Através do estudo e das simulações da seção 4.1 e dos resultados obtidos seção 5.1, verificou-se que os protocolos de camada MAC assíncronos, apesar de probabilísticos, dependendo da aplicação podem ter vantagens importantes comparando com os protocolos MAC síncronos determinísticos utilizados em aplicações industriais.

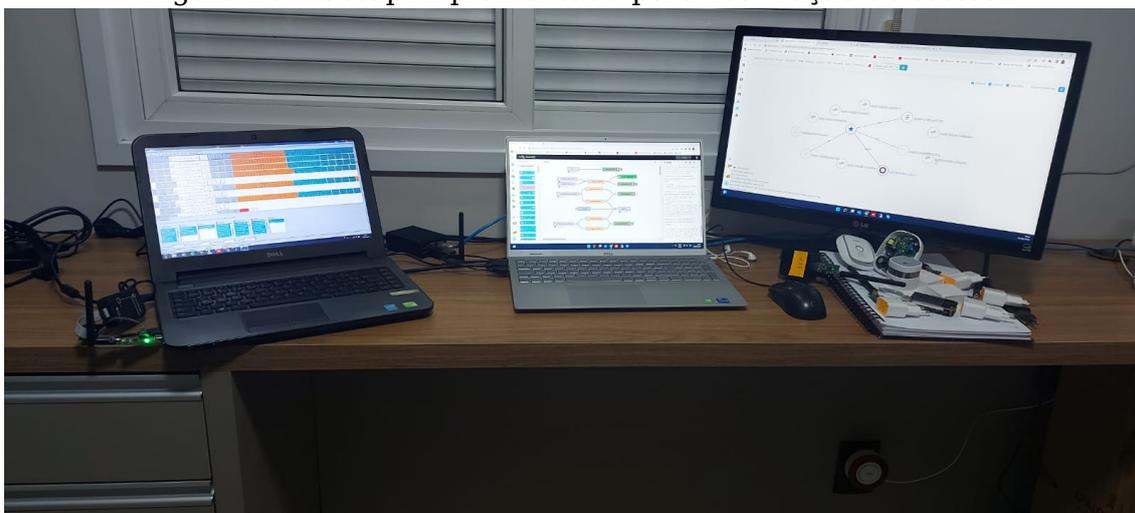
Em aplicações prediais, diversos desafios exigem que as RSSF sejam flexíveis a modificações de topologia, capazes de coexistir com eventuais interferências e atenuações de sinal. Também, outro fator importante é que o custo financeiro do nó sensor deve ser factível com aplicações prediais, tendo vantagem financeira em comparação aos sistemas cabeados. Para a RSSF ser atrativa, outro aspecto importante é a padronização da pilha de protocolos. A padronização permite que seja possível a utilização de nós sensores de diversos fabricantes na mesma RSSF. Obviamente, como qualquer sistema de MSE, onde sistemas de detecção e alarme de incêndio (SDAI) estão presentes, é obrigatório por lei a realização de manutenções e testes periódicos dos sistemas (NBR-17240, 2010). Com isto, a aplicação de sistemas de MSE baseados em RSSF, necessitam de um acompanhamento periódico de manutenção. Em redes cabeadas de SDAI, são realizados testes periódicos dos equipamentos, já em RSSF de SDAI, os testes devem ir além dos nós sensores, pois deve-se avaliar periodicamente os status de baterias, qualidade de link e se existe interferências no canal utilizado.

As RSSF, conforme verificado nos capítulos anteriores, devem ser orientadas de acordo com a aplicação. No estudo de RSSF padronizadas, verificou-se que o protocolo Zigbee possui maior aderência para aplicações prediais devido ao custo e facilidade conexão dos enlaces de comunicação. Também, verificou-se que protocolos assíncronos possuem vantagens em relação aos síncronos, como por exemplo, consumo de energia, facilidade na formação da rede e podendo manter os requisitos temporais normativos em redes não saturadas. E conforme visto no estudo de Zeng (ZENG *et al.*, 2021), o *unslotted IEEE*

802.15.4, que é a versão utilizada pelo Zigbee em sua origem, possui uma menor latência em ambientes com atenuações e interferências para redes não saturadas.

Com isto, uma aplicação de RSSF Zigbee foi planejada e implementada para possibilitar os testes de interesse. Neste trabalho, a rede Zigbee foi implementada em um prédio residencial com o objetivo de analisar o comportamento multi-salto e as restrições desta aplicação em um ambiente real.

Figura 16 – Setup implementado para realização de testes.



Fonte: do autor.

#### 4.2.1 Métodos e materiais

Para o desenvolvimento do experimento, foi necessário implementar uma aplicação de RSSF Zigbee. Para isto, foi utilizado um conjunto de Hardwares e softwares que foram escolhidos de forma a atender as demandas dos testes necessários (KANTERS, 2020). Estes elementos, serão apresentados durante esta seção.

##### 4.2.1.1 CC2531

É uma solução de sistema em chip (SoC) da Texas Instruments (TI) habilitado para USB desenvolvido para aplicações IEEE 802.15.4 e ZigBee. Permite que *Dongles* USB ou nodos com USB sejam fabricados com baixo custo. Possui um processador de 32MHz, memória flash programável no sistema de até 256KB, 8KB de memória RAM, transceptor de RF compatível com IEEE 802.15.4 de 2,4 GHz, potência de saída programável até 4,5 dBm e consumo do rádio menor que 30mA em operação (TX/RX). Nesta aplicação, utiliza uma antena monopólo de 3 dBi (TI, 2009).

Apesar de ser uma solução madura, tendo sua utilização desde o ano de

2009 possui as diversas atualizações de firmwares das versões atuais do ZigBee 3.0.

Figura 17 – Nó roteador Zigbee CC2531.



Fonte: do autor.

O CC2531 pode ser configurado via atualização de firmware em duas funções na rede Zigbee: Roteador ou Coordenador, através do software SmartRF Flash Programmer da TI. Além destas duas funcionalidades o CC2531 também pode ter seu firmware atualizado para funcionamento como *Sniffer* auxiliando como ferramenta de comissionamento e detecção de problemas na rede. O CC2531, possui capacidade de gerenciar até 20 conexões IEEE 802.15.4 simultâneas diretas, isto devido à sua capacidade de hardware. Como a rede ZigBee é uma RSSF multi-saltos, esta limitação de 20 conexões não é um limitador do tamanho máximo da rede. O software para desenvolvimento e compilação do CC2531 é o IAR embedded workbenk for 8051, da IAR Systems, que possui licenciamento (TI, 2009).

Cabe ressaltar que existem hardwares mais modernos, como por exemplo o CC2652 da TI de lançamento em 2018, que possui avanços em várias características comparado ao hardware do CC2531. Pode-se citar o novo processador de 48 MHz, 352KB de memória flash de sistema programável, 256 KB de memória ROM para bibliotecas de protocolos e funções, 8KB de SRAM e 80KB SRAM *ultra-low leakage*. Um menor consumo de energia do Rádio, em média 10mA em operação devido as evoluções do sistema do transceptor. Entre outras melhorias e avanços como a possibilidade de programação e compilação no Code Composer Studio (CCS) que é livre de licenciamento, facilitando a implementação de novos desenvolvimentos (TI, 2018). Apesar do CC2652 apresentar diversas vantagens, para este trabalho, para o experimento optou-se em utilizar o CC2531. Ele possui um custo mais acessível possibilitando a aquisição de um maior número de nodos. Já que um dos objetivos em usar o CC2531 seria estender a rede com a função roteador Zigbee verificando o

comportamento multi-saltos.

#### 4.2.1.2 CC Debugger

É um programador e depurador para *Low Power RF System-on-chips* da TI. Ele é utilizado para a atualização de Firmware das linhas da TI, que inclui o CC2531. Também pode ser utilizado, juntamente com o CC2531 como *Sniffer* auxiliando no comissionamento e detecção de problemas na rede ZigBee (TI, 2014a).

Figura 18 – CC Debugger.



Fonte: do autor.

#### 4.2.1.3 Detector de gás HS1CG-E

Com o objetivo de verificar nodos Zigbee comerciais que possam atender demandas de MSE, foram adquiridos alguns exemplares para os testes. Um caso particular e importante de MSE é o de detecção de vazamento de gás em apartamentos. O detector de gás modelo HS1CG-E do fabricante Heiman, é um roteador na rede Zigbee, alimentado por tensão AC 110-240V. Possui uma sirene de 75dB/m e um alcance de sinal de rádio de até 100m em ambiente interno aberto (HEIMANTECH, 2020a).

#### 4.2.1.4 Sinalizador áudio visual HS2WD-E

Dependendo da aplicação, a sinalização dos eventos prediais de alarme devem ser realizadas no ambiente próximo do evento ou em todo o prédio, com o objetivo de evacuação dos ocupantes e da rápida ação dos responsáveis. Com isto, objetivando os testes de um sinalizador áudio visual Zigbee, foi adquirido

Figura 19 – Nó sensor roteador Zigbee detector de gás.



Fonte: do autor.

o exemplar da figura 20 .

O sinalizador áudio visual modelo HS2WD-E do fabricante Heiman, é um roteador na rede Zigbee, alimentado por tensão AC 110-240V, possui uma bateria de Backup de 3.8V, 700mA, que durante comunicação na rede Zigbee pode suportar até 4 horas e durante o alarme até 5 minutos de autonomia sem energia AC. A sirene possui 95 dB/m e o alcance do rádio é de até 80m em ambiente interior aberto (HEIMANTECH, 2020b).

Figura 20 – Nó roteador Zigbee sinalizador áudio visual.



Fonte: do autor.

Como sua função é de sinalizador, ele espera um comando para o seu acionamento. Este comando, não vem diretamente do detector de fumaça. Para realizar o acionamento do sinalizador é necessário o gateway/coordenador Zigbee da Heiman. Ou como opção, pode ser utilizado o método deste trabalho, onde o comando do acionamento vem do SRV, que possui o coordenador Zigbee, gateway ZigBee para MQTT e o Node Red. A Lógica de acionamento neste caso é realizada dentro do Node Red (KANTERS, 2020).

#### 4.2.1.5 *Detector de fumaça HS1SA*

A detecção de fumaça é uma das principais aplicações MSE de SDAI, pois como o estudo de caso desta dissertação, eventos de incêndios prediais que podem iniciar dentro de apartamentos podem ser identificados em sua origem. Com isto, foi adquirido um exemplar de detector de fumaça zigbee para

a realização dos testes. O detector de fumaça modelo HS1SA do fabricante Heiman, é um *end-device* Zigbee, alimentado por bateria CR123A com duração de 3 anos em condições normais de comunicação Zigbee. Possui sirene integrada de 80dB/m e um botão de teste com led de sinalização que anuncia falhas e seu status, sendo que o status de *stand-by* é informado a cada 53 segundos. O alcance do sinal é de até 70 metros em ambiente interno aberto. O consumo estático é de 10 microA e a corrente em alarme é de 60mA. O consumo durante a utilização do rádio não foi informado no manual do detector (HEIMANTECH, 2020c).

Figura 21 – Nó sensor dispositivo final Zigbee detector de fumaça.



Fonte: do autor.

#### 4.2.1.6 Botão de pulso SNZB-01

Botão de pulso modelo SNZB-01 do fabricante Sonoff, é um *end-device* Zigbee, alimentado por bateria CR2450 com duração de mais de 1 ano em condições normais de comunicação Zigbee conforme manual. O alcance de sinal e o consumo de energia não são informados em seu manual. O SoC utilizado é o CC2530 da TI. Este botão, foi utilizado para simulação de botão de pânico no experimento (SONOFFTECH, 2020).

Figura 22 – Nó sensor dispositivo final Zigbee botão de pulso.



Fonte: do autor.

#### 4.2.1.7 *Coordenador Zigbee, Gateway e Servidor da aplicação*

É um Hardware com sistema operacional Linux, um servidor (SRV), utilizado para hospedar os softwares necessários para o desenvolvimento da aplicação que será testada. O Hardware escolhido foi um Raspberry pi 4 model B, que possui um processador Quad core Cortex A-72 64 bits 1,5GHz, memória RAM de 8GB, portas USB, HDMI e de rede Ethernet Gigabit. Possui também 40 pin GPIO entre outras características. Nesta aplicação optou-se na instalação de uma case de alumínio para auxiliar na dissipação do calor gerado pelo processador (RASPBerryPI, 2020).

Este Hardware SRV irá realizar a função de Gateway ZigBee para MQTT, realizando a integração do coordenador ZigBee CC2531 conectado em uma das suas portas USB. Também, terá um servidor Broker MQTT hospedado e o software Node Red (KANTERS, 2020).

Figura 23 – Coordenador Zigbee, Gateway e Servidor da aplicação.



Fonte: do autor.

#### 4.2.1.8 *SmartRF Flash Programmer*

Software programador da TI utilizado para programar a memória Flash em MCU's RF de baixa potência como o CC2531, utilizado em conjunto com o CC Debugger (TI, 2014b).

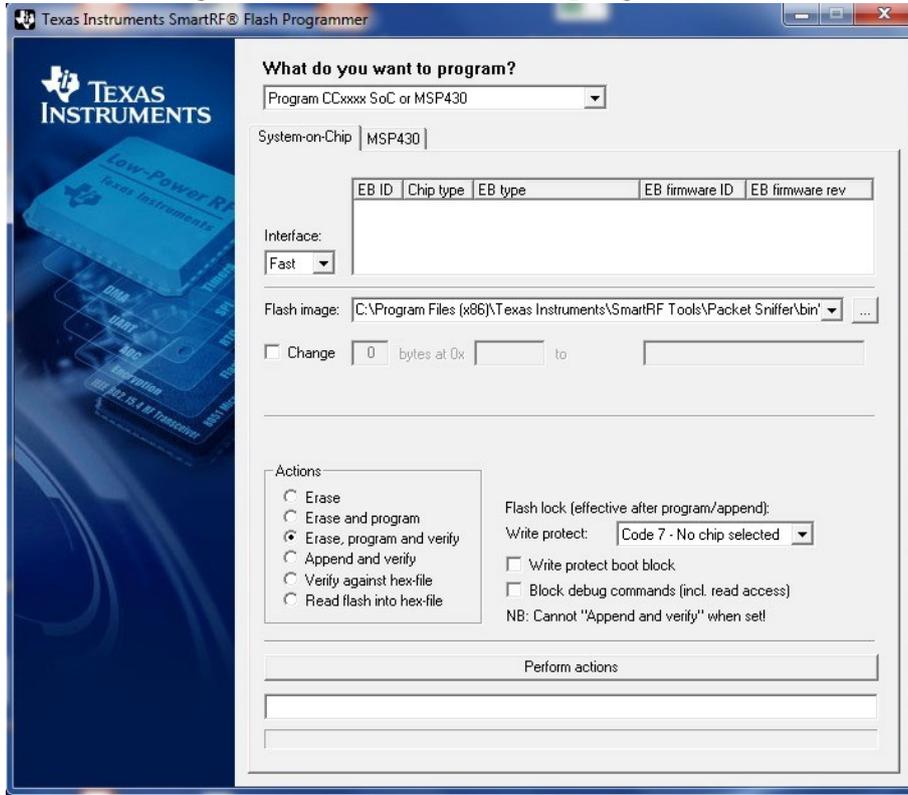
#### 4.2.1.9 *SmartRF Packet Sniffer*

O SmartRF Packet Sniffer é um aplicativo de software para PC usado para exibir e armazenar pacotes de RF capturados com um Hardware RF receptor, no caso, um conjunto CC2531 com um CC Debugger na função Sniffer. Vários protocolos de RF são suportados dentre eles o ZigBee. Com ele é possível realizar a análise dos protocolos e diagnósticos de problemas (TI, 2014c).

#### 4.2.1.10 *SmartRF Studio 7*

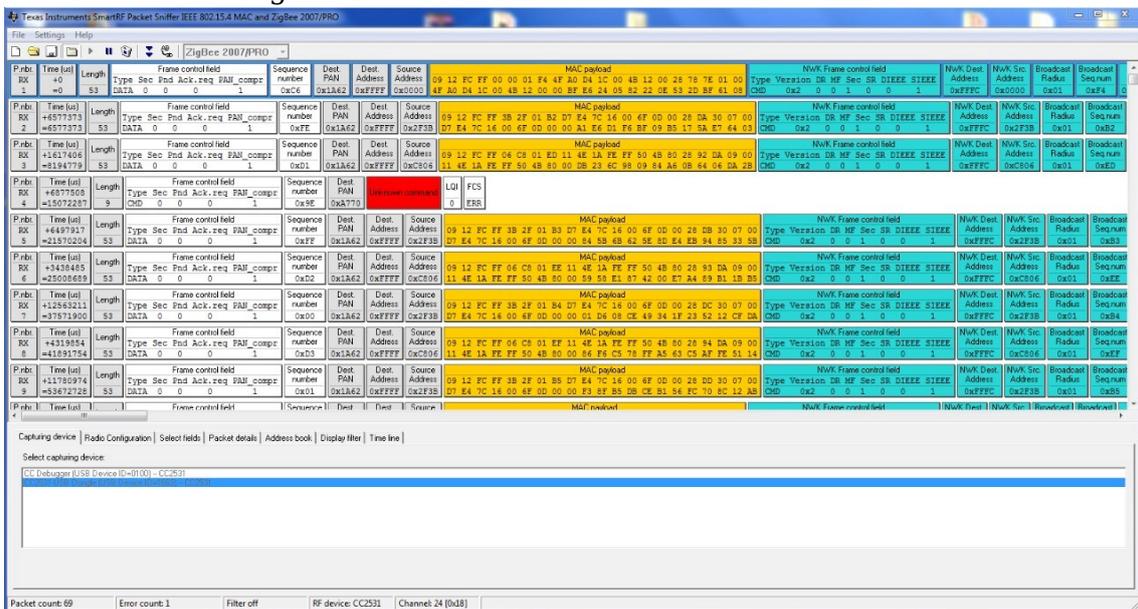
O SmartRF Studio 7 é um aplicativo para PC que pode ser usado em combinação com vários kits de desenvolvimento de SoC RF da Texas Instruments.

Figura 24 – SmartRF Flash programmer.



Fonte: do autor.

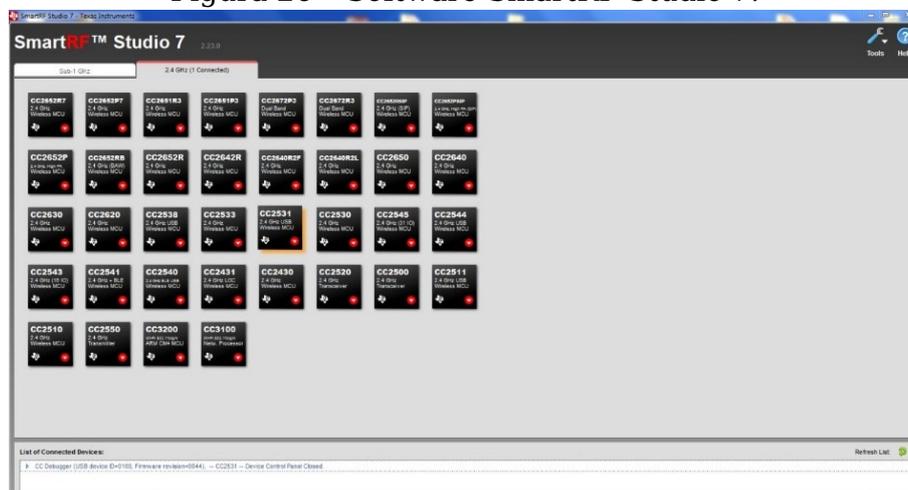
Figura 25 – Software SmartRF Packet Sniffer.



Fonte: do autor.

O SmartRF Studio 7 ajuda os projetistas de sistemas de rádio a avaliar os Nodos numa fase inicial do processo de design. O programa fornece uma interface de PC que possibilita operar os registros de configuração de rádio do chip, e é útil para testes funcionais e para encontrar as configurações de rádio apropriadas. O SmartRF Studio 7 também pode ser usado sem nenhum hardware, mas apenas para gerar, editar e exportar valores de registro de rádio (TI, 2010). Também, pode ser utilizado com o Sniffer (CC2531 ligado ao CC Debugger) para analisar os canais IEEE 802.15.4 obtendo informações de sinal, registradores e perda de pacotes. Como ele possibilita o acesso direto aos comandos do rádio, pode-se utilizar o modo RX ou TX para simulações e testes (TI, 2010).

Figura 26 – Software SmartRF Studio 7.

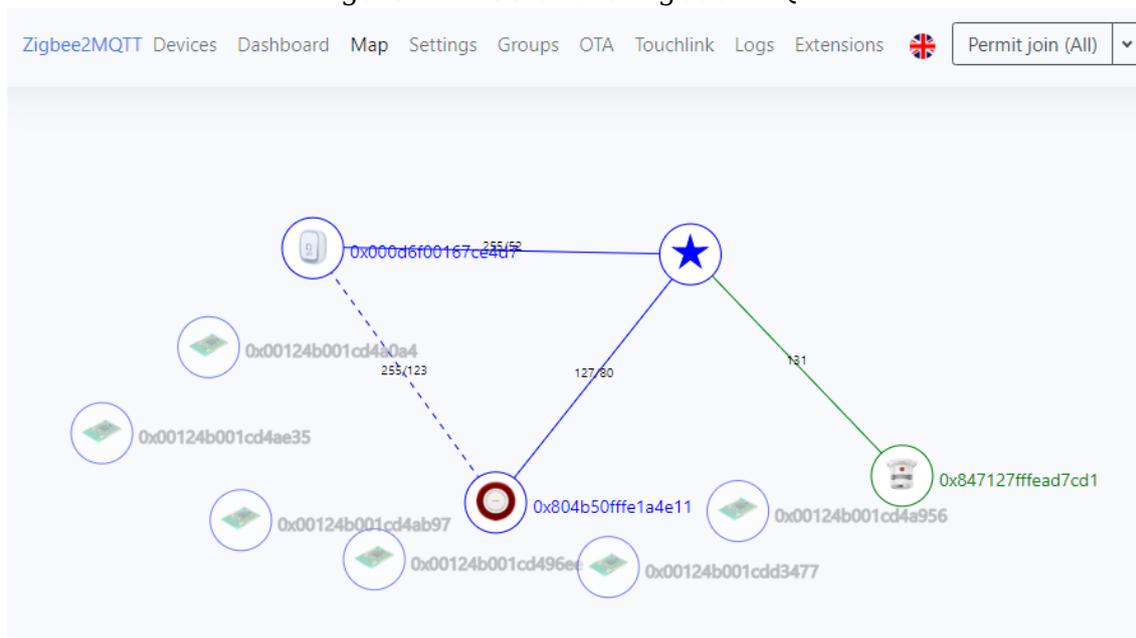


Fonte: do autor.

#### 4.2.1.11 Zigbee2MQTT

É um software que é a interface entre o servidor SRV e o nodo coordenador ZigBee, fazendo com que torne o SRV um Gateway da rede ZigBee para o protocolo MQTT. Este software possui homologado em seu *Framework* 2149 nodos ZigBee de 295 fabricantes diferentes. Também, possui um *frontend* integrado que pode ser operado através do *browser* acessando o IP e porta do SRV. Este *frontend* permite verificar o mapa da rede ZigBee, dispositivos conectados e seus status, além de configurações e aceitação/exclusão de nodos na rede. O símbolo de uma estrela representa o coordenador da RSSF Zigbee. A conexão em verde, significa a conexão com um *end-device* (dispositivo final). A conexão em azul é a realizada entre o roteador (FFD) e o coordenador. A conexão pontilhada em azul é referente ao enlace entre roteadores (KANTERS, 2020).

Figura 27 – Software Zigbee2MQTT.



Fonte: do autor.

#### 4.2.1.12 Eclipse Mosquitto MQTT Broker

O Eclipse Mosquitto é um agente de mensagens *open-source* que implementa o protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). O Mosquitto é um software leve e adequado para uso em todos os dispositivos, desde nodos IP de baixa potência até servidores completos (FOUNDATION, 2020a).

O protocolo MQTT fornece um método leve de execução de mensagens usando um modelo de *publish/subscribe*. Isso o torna adequado para mensagens da Internet das Coisas (IoT), como sensores de baixa potência ou dispositivos móveis, como telefones, computadores incorporados ou microcontroladores. No caso da aplicação deste trabalho, o MQTT Broker é instalado no SRV e é necessário para fornecer serviço para o Zigbee2MQTT e de conexão entre o Zigbee2MQTT e o Node-Red (KANTERS, 2020).

#### 4.2.1.13 Node-RED

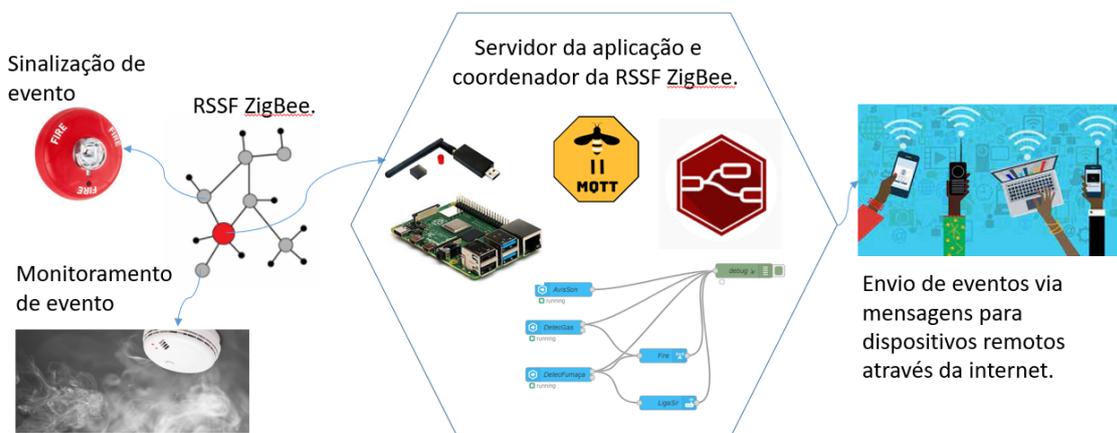
O Node-RED é uma ferramenta de programação baseada em fluxo e *low-code* para aplicações orientadas a eventos, originalmente desenvolvida pela IBM e desde o ano de 2019 faz parte da OpenJS Foundation sendo uma plataforma *open-source*. Começou no início de 2013 como um projeto paralelo do grupo de Serviços de Tecnologia Emergentes da IBM como uma prova de conceito para visualizar e manipular mapeamentos entre tópicos MQTT, logo se tornou uma ferramenta que pode ser estendida para diversas aplicações (FOUNDATION, 2020b).

A programação baseada em fluxo é uma maneira de descrever o comportamento de um aplicativo como uma rede de caixas pretas, ou “nós”, como são chamados no Node-RED. Com o Node-RED é possível conectar dispositivos de hardware, APIs e serviços online, e utilizar todas estas informações para executar lógicas de intertravamentos, controles ou sinalizações de eventos, por exemplo (FOUNDATION, 2020b).

#### 4.2.1.14 Visão macro da aplicação do experimento

Com base nos materiais explanados, a figura 28 apresenta com uma visão macro de como foi implementado o sistema de MSE do experimento.

Figura 28 – Aplicação MSE dos testes.



Fonte: do autor.

No Raspberry Pi, foram instalados os softwares Mosquitto MQTT, Zigbee2MQTT e NodeRed. Após, foi realizada a configuração do coordenador Zigbee CC2531 na porta USB do Raspberry. Os nós sensores Zigbee, podem ser conectados na rede através do processo de conexão que consiste em:

- 1) No software zigbee2MQTT deve-se habilitar a conexão de um novo nó;
- 2) pressionar o botão do nó sensor de solicitação de inserção na rede.

De forma rápida, o nó sensor é reconhecido e ingressa na rede.

Após o nó sensor ingressar na rede, é possível realizar a programação no Node-Red utilizando o endereço estendido do nó sensor, figura 29.

No Node-Red, é possível verificar na função *debug*, as instâncias do nó sensor inserido cada vez que é simulado um evento. Descobrendo as instâncias é possível realizar uma lógica de programação. Com isto, foram realizadas algumas lógicas para simular os eventos e a sinalização dos mesmos. Para a simulação de evento para sinalização local, foi realizada uma lógica onde é conectada a instância "smoke" do nó sensor detector de fumaça com as instâncias necessárias para acionar a sirene do nó sensor sinalizador áudio visual, figu-

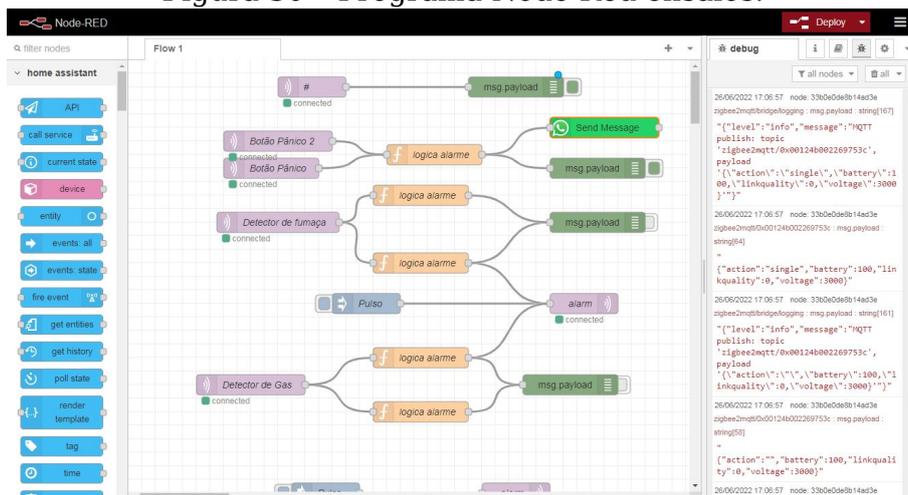
Figura 29 – Endereçamento dos nós sensores Zigbee.

ID	Nome	Endereço MAC IEEE 802.15.4	Endereço estendido (Zigbee)	Modelo	Localização
8		0x00124b002269753c	0x00124b002269753c (0x3C72)	SONOFF	SNZB-01
9		0x000d6f00167ce4d7	0x000d6f00167ce4d7 (0x943F)	HEIMAN	HS1CG-E
10		0x847127ffead7cd1	0x847127ffead7cd1 (0xB822)	HEIMAN	HS1SA
11		0x804b50fffe1a4e11	0x804b50fffe1a4e11 (0x2C56)	HEIMAN	HS2WD-E

Fonte: do autor.

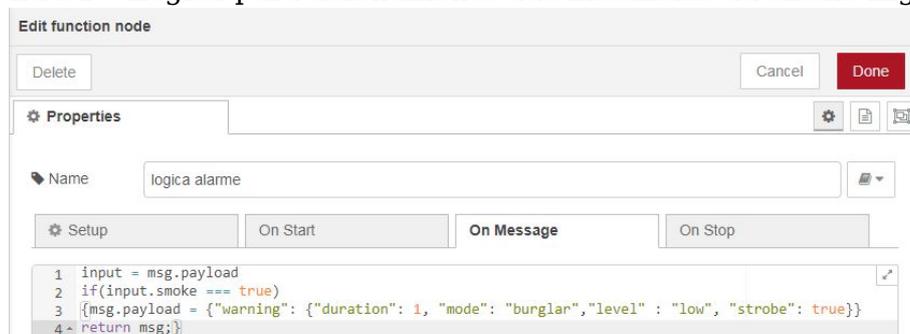
ras 30 e 31. E para simular a sinalização remota de um evento, foi conectada a instância do botão de pulso com o bloco de *bot WhatsApp* (FOUNDATION, 2020b). As instruções para inserção e utilização do bloco *Bot Whatsapp* no Node-Red podem ser encontradas em (FOUNDATION, 2020c)

Figura 30 – Programa Node-Red ensaios.



Fonte: do autor.

Figura 31 – Lógica para acionamento das instâncias da sirene Zigbee.



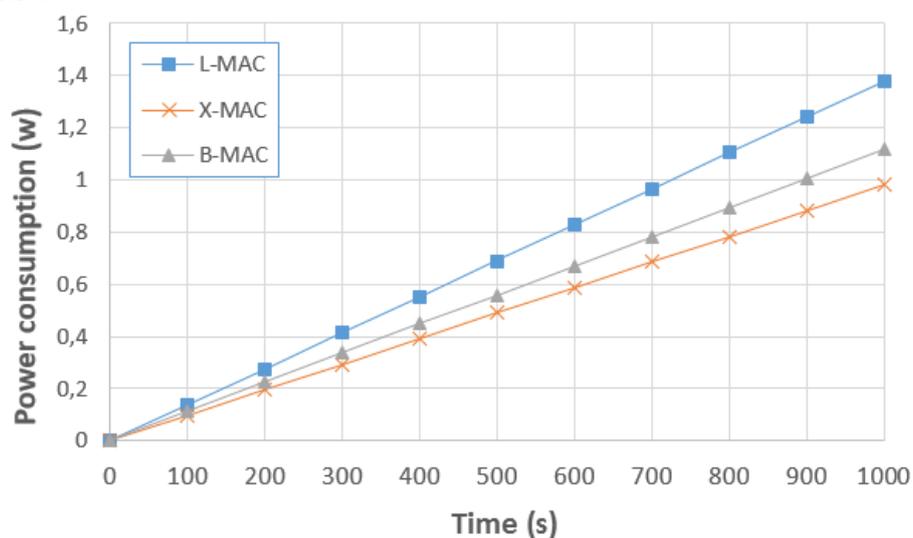
Fonte: do autor.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Simulações dos protocolos MAC

Conforme as simulações descritas no capítulo 4.1, observa-se que quando há um alto tráfego de dados, como esperado, os nós sensores consomem mais energia (*Power consumption*), figura 32. Na prática, em uma RSSF de SDAI isso ocorrerá a cada momento em que houver um evento de alarme. Observando os resultados de consumo de energia de um nó sensor, pode-se verificar que os protocolos MAC assíncronos possuem uma vantagem significativa sobre os protocolos síncronos MAC TDMA, quando o envio de mensagens é com menor frequência, Figuras 33 e 34.

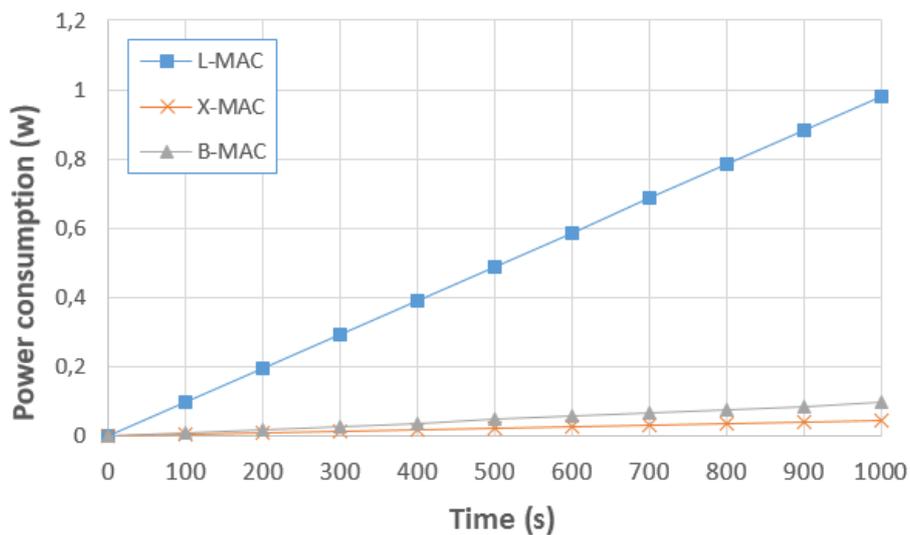
Figura 32 – Simulação do consumo de energia com envio de mensagens a cada 3 segundos.



Fonte: do autor.

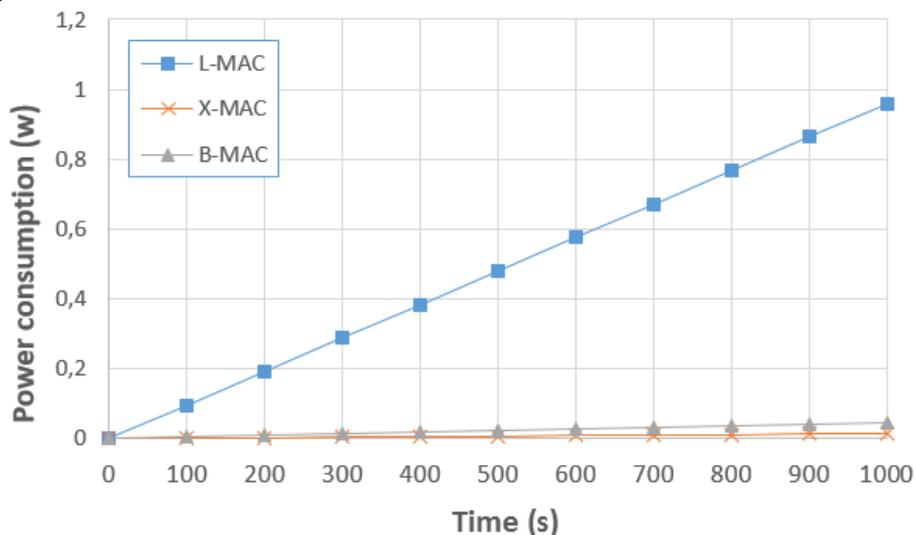
A eficiência energética dos protocolos assíncronos é justificada pela característica de utilizar técnicas de amostragem de preâmbulo e escuta de baixa potência (LPL). O protocolo B-MAC utiliza a técnica de preâmbulo longo e escuta de baixa potência (LPL) na forma original, o que faz com que tenha um

Figura 33 – Simulação do consumo de energia com envio de mensagens a cada 60 segundos.



Fonte: do autor.

Figura 34 – Simulação do consumo de energia com envio de mensagens a cada 150 segundos.



Fonte: do autor.

maior consumo de energia comparado com o X-MAC. O protocolo X-MAC usa LPL, mas em sua forma otimizada.

O protocolo L-MAC síncrono, utiliza a abordagem TDMA. Ele é o maior consumidor de energia dos três protocolos MAC avaliados. Isso pode ser explicado pois o TDMA divide o canal em intervalos de tempo, fazendo com que o transmissor use o canal mesmo sem transmitir dados úteis para manter o sincronismo do enlace e com isso também ocorre um maior uso do receptor. Em contraste, nos gráficos de atraso fim-a-fim (*end-to-end delay*), é possível

observar uma resposta determinística do protocolo TDMA.

Também é possível observar nos gráficos de consumo de energia de um nó sensor que estando em condições normais de tráfego de dados, a curva de consumo tende a ser linear. Assim, é possível estimar o tempo de vida de um nó sensor, considerando sua condição normal de operação. Usando as equações 2 e 3, é possível encontrar uma estimativa de duração da bateria.

$$EC = X * t(s) \quad (2)$$

$$BL(\text{anos}) = BIE(Ws)/EC(Ws) \quad (3)$$

Onde:

EC = Consumo de energia em um ano (Ws).

X = Valor constante encontrado na equação linear do consumo de energia.

BL = Vida útil da bateria (anos).

BIE = Energia inicial da bateria (Ws) ou (J).

t = 1 ano = 31536000 segundos.

Observou-se que o protocolo MAC TDMA apresenta vantagens de tempo de resposta em relação aos protocolos assíncronos quando a rede está com maior tráfego de dados. Este caso é observado no gráfico onde os dados foram enviados a cada 3 segundos, Figura 35. O protocolo L-MAC TDMA possui uma resposta determinística, mesmo com tráfego de dados maior, pois o time slot já está reservado para cada nó sensor.

Os protocolos MAC assíncronos foram executados regularmente nos testes de *end-to-end delay* de 60 e 150 segundos, Figuras 36 e 37. O protocolo X-MAC teve uma vantagem em relação ao B-MAC. O Protocolo B-MAC, na simulação *end-to-end delay* de 3 segundos, Figura 35, apresentou uma resposta desastrosa em relação aos seus concorrentes. Apesar disto, este é um resultado esperado, pois a literatura menciona que o B-MAC é adequado para redes de baixa potência e baixa taxa de dados. A análise dos dados mostra que o protocolo X-MAC tem a melhor resposta em consumo de energia versus *end-to-end delay*.

Os dados estatísticos dos resultados das simulações podem ser observados nas tabelas 5, 6 e 7. Os dados de tempo mínimo, máximo, médio, desvio padrão e o número de pacotes foram coletados diretamente dos dados das simulações do software Omnet++. Com isto, a margem de erro foi calculada a partir destes dados considerando um intervalo de confiança de 99%.

Tabela 5 – Dados estatísticos do *end-to-end delay*, com intervalo de confiança de 99% (envio de mensagens a cada 3 segundos).

Dados	L-MAC	X-MAC	B-MAC
Número de pacotes	353	372	528
Tempo mínimo (s)	0,06	0,34	1,21
Tempo máximo (s)	2,26	0,45	244,41
Tempo médio (s)	0,23	0,42	122,86
Desvio padrão (s)	0,13	0,037	40,24
Margem de erro (s)	0,018	0,005	4,51

Fonte: do autor.

Tabela 6 – Dados estatísticos do *end-to-end delay*, com intervalo de confiança de 99% (envio de mensagens a cada 60 segundos).

Dados	L-MAC	X-MAC	B-MAC
Número de pacotes	158	175	190
Tempo mínimo (s)	0,18	0,19	0,52
Tempo máximo (s)	2,26	0,78	6,4
Tempo médio (s)	0,28	0,36	1,91
Desvio padrão (s)	0,13	0,12	1,49
Margem de erro (s)	0,025	0,023	0,27

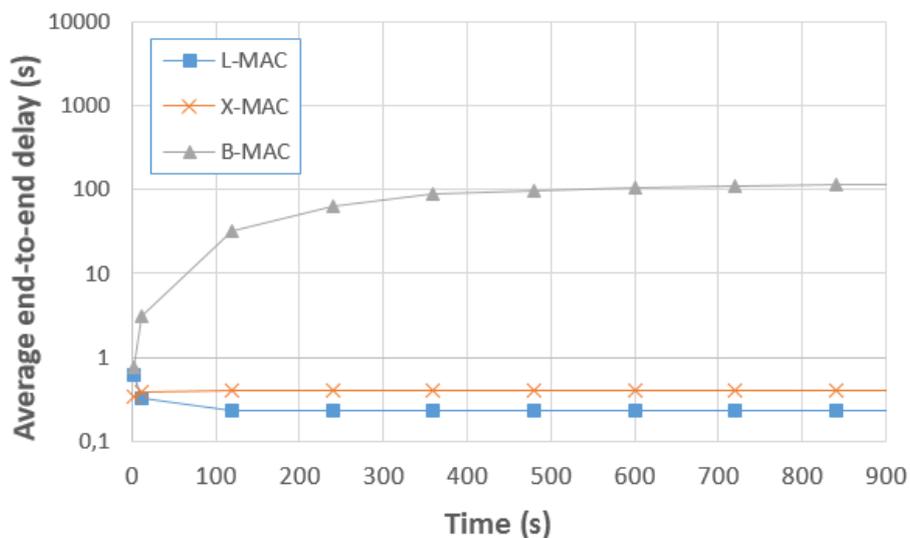
Fonte: do autor.

Tabela 7 – Dados estatísticos do *end-to-end delay*, com intervalo de confiança de 99% (envio de mensagens a cada 150 segundos).

Dados	L-MAC	X-MAC	B-MAC
Número de pacotes	62	65	64
Tempo mínimo (s)	0,18	0,34	0,51
Tempo máximo (s)	2,26	0,45	5,41
Tempo médio (s)	0,29	0,39	1,89
Desvio padrão (s)	0,19	0,038	1,48
Margem de erro (s)	0,062	0,012	0,47

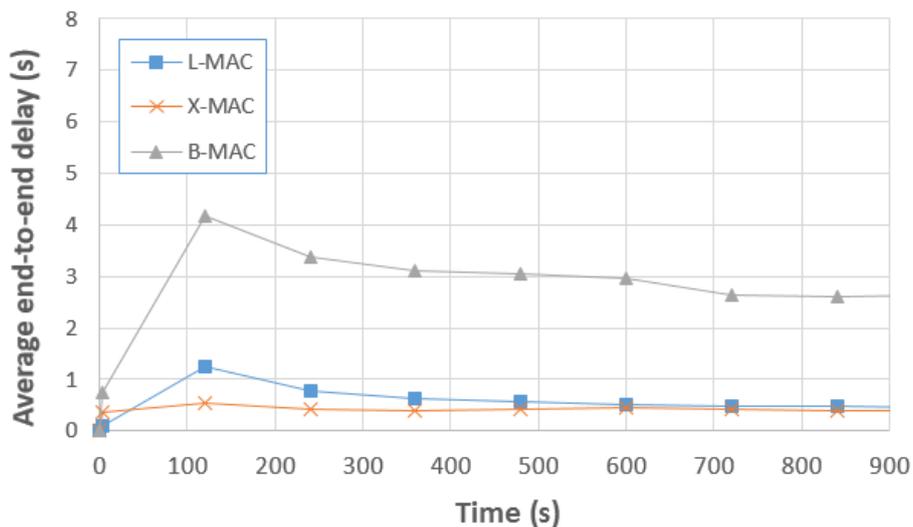
Fonte: do autor.

Figura 35 – Simulação da média do *end-to-end delay* com envio de mensagens a cada 3 segundos.



Fonte: do autor.

Figura 36 – Simulação da média do *end-to-end delay* com envio de mensagens a cada 60 segundos.

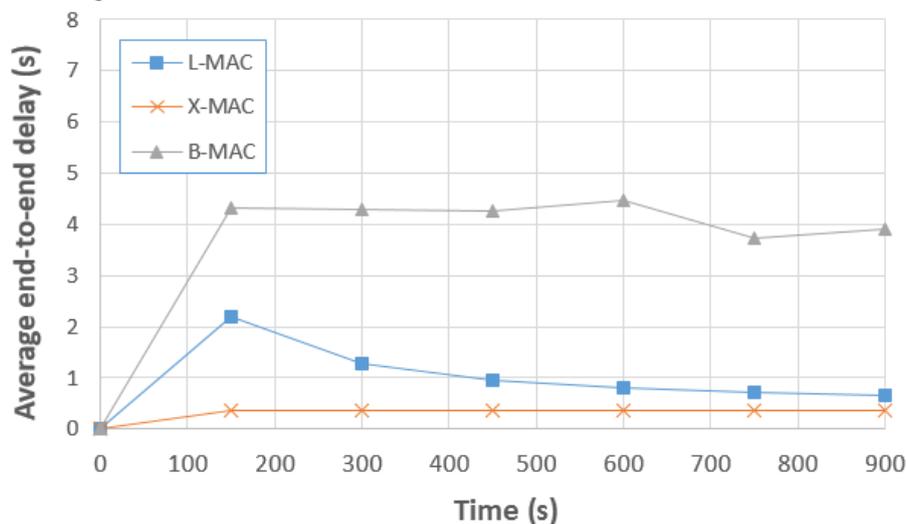


Fonte: do autor.

Utilizando as equações 1, 2 e 3, é possível estimar o tempo de vida de um nó sensor. Essa estimativa foi realizada aplicando a expressão da reta do consumo de energia de acordo com os tempos de envio da simulação. De acordo com as Tabelas 11 e 13, é possível verificar que os protocolos assíncronos podem ter uma vida útil superior a 10 anos usando uma bateria de alto desempenho. Neste caso, a validade da bateria poderá ser um fator limitante.

É importante ratificar que nos cálculos de consumo de energia não está sendo levado em consideração o consumo de energia do elemento sensor, pois

Figura 37 – Simulação da média do *end-to-end delay* com envio de mensagens a cada 150 segundos.



Fonte: do autor.

Tabela 8 – Fator linear do consumo de energia aproximado (envio de mensagens a cada 3 segundos)

Protocolo MAC	Consumo de energia (W*s)
L-MAC	$0,00138*t(s)$
X-MAC	$0,00098*t(s)$
B-MAC	$0,00112*t(s)$

Fonte: do autor.

trata-se de uma estimativa de consumo de comunicação. Outras variáveis como eventos de falsos alarmes, erros e testes podem causar um aumento no consumo de energia. Outros fatores afetarão o consumo de energia e o *end-to-end delay*: como a tecnologia de roteamento utilizada, transporte e aplicação, número de saltos, tecnologia de rádio, perdas de pacotes que causam retransmissões e entre outros.

Outro aspecto relevante é que protocolos MAC TDMA, possuem limitação de tamanho de rede, ou seja, quantidade de nós sensores devido a divisão restrita das janelas de tempo. E conforme autores, possuem processos centralizados e complexos para sincronização da rede. Em contrapartida, são livres de colisões, sendo utilizado por diversos protocolos industriais por suas características de garantia do determinismo e baixa latência na entrega dos pacotes.

Já os protocolos de camada MAC assíncronos, devido suas características de acesso ao meio, nunca poderão ser considerados determinísticos e livres de colisões. Em contrapartida, o estabelecimento do enlace com os vizinhos é

Tabela 9 – Tempo de vida do nó sensor (envio de mensagens a cada 3 segundos) com a bateria LS 26500.

Protocolo MAC	Vida útil (anos)
L-MAC	2,29
X-MAC	3,23
B-MAC	2,83

Fonte: do autor.

Tabela 10 – Fator linear do consumo de energia aproximado (envio de mensagens a cada 60 segundos)

Protocolo MAC	Consumo de energia (W*s)
L-MAC	0,00098*t(s)
X-MAC	0,000044*t(s)
B-MAC	0,000097*t(s)

Fonte: do autor.

Tabela 11 – Tempo de vida do nó sensor (envio de mensagens a cada 60 segundos) com a bateria LS 26500

Protocolo MAC	Vida útil (anos)
L-MAC	3,23
X-MAC	71,92
B-MAC	32,62

Fonte: do autor.

Tabela 12 – Fator linear do consumo de energia aproximado (envio de mensagens a cada 150 segundos)

Protocolo MAC	Consumo de energia (W*s)
L-MAC	0,00096*t(s)
X-MAC	0,000015*t(s)
B-MAC	0,000045*t(s)

Fonte: do autor.

Tabela 13 – Tempo de vida do nó sensor (envio de mensagens a cada 150 segundos) com a bateria LS 26500.

Protocolo MAC	Vida útil (anos)
L-MAC	3,29
X-MAC	210,96
B-MAC	70,32

Fonte: do autor.

de forma descentralizada. Este fator, faz com que as RSSF assíncronas sejam robustas e tolerantes a aspectos ambientais encontrados principalmente dentro de ambientes prediais. Também, possibilitando RSSF com maior número de nós sensores.

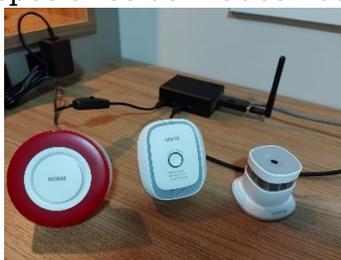
Os Eventos de alarme em SDAI em construções prediais tendem a ser pontuais na detecção. Com isto, a probabilidade de ocorrer eventos em cadeia que sobrecarreguem a rede de forma instantânea não são comuns nesta aplicação. Devido esta característica da aplicação de SDAI, em maior parte do tempo a RSSF irá informar o status dos dispositivos ao invés de eventos de alarme. Com isto, mesmo um protocolo MAC assíncrono sendo considerado probabilístico, as restrições temporais do SDAI são atendidas com quatro nós sensores conforme apresentado nos resultados das simulações.

## 5.2 Resultados do experimento MSE

### 5.2.1 Ensaios iniciais de comunicação

Com o objetivo de realizar os testes na rede Zigbee, primeiramente foram validadas as configurações básicas do *setup*. Nos primeiros testes, foram realizados a verificação de mapa da rede Zigbee e testes de acionamento de alarme. Foi possível verificar no *debug* do software Node-Red cada publicação MQTT realizada. Os tempos de resposta entre o acionamento do detector de fumaça e o acionamento da sirene, operando na casa dos décimos de segundo, realizando um salto apenas até o coordenador. Na figura 39 é possível verificar o detector de fumaça endereço MAC B822 enviando a mensagem de alarme e a sirene com o endereço MAC 2C56 recebendo o comando para acionamento. Este comando é intermediado pelo SRV, que contém o coordenador Zigbee, e a lógica de comando no Node-Red.

Figura 38 – Dispositivos utilizados nos testes iniciais.



Fonte: do autor.

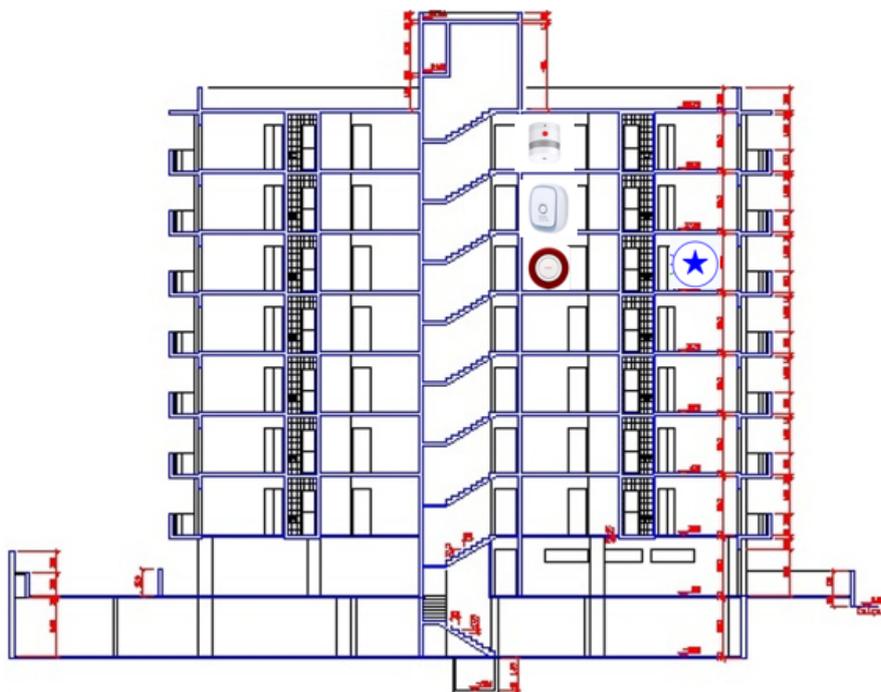
Após foram posicionados os dispositivos nos pavimentos do prédio, onde o coordenador foi posicionado dentro do apartamento e os demais nodos distribuídos no corredor de cada pavimento conforme figura 40.

Figura 39 – Análise com o packet sniffer da sinalização de evento.

P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address		
RX	+8125	54	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr					
80	=314540	54	DATA	0	0	1	1	0x6D	0x1A62	0x0000	0xB822	48 02 00 0 A4 F2 29 4
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field				Sequence number	LQI	FCS			
RX	+2	5	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr					
81	=314542	5	ACK	0	0	0	0	0x6D	155	OK		
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address		
RX	+65	53	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr					
82	=314607	53	DATA	0	0	1	1	0x8E	0x1A62	0x2C56	0x0000	48 02 56 2 00 39 BD E
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field				Sequence number	LQI	FCS			
RX	+2	5	Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr					
83	=314609	5	ACK	0	0	0	0	0x8E	99	OK		

Fonte: do autor.

Figura 40 – Dispositivos posicionados nos pavimentos.



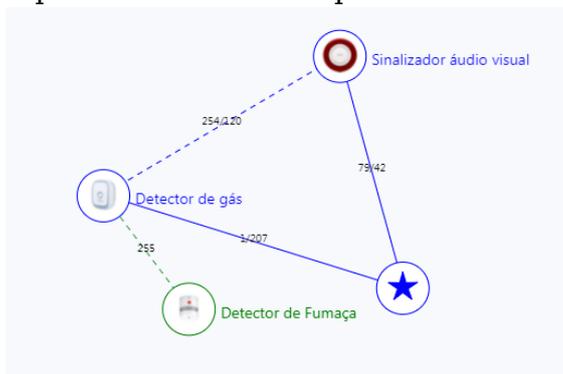
Fonte: do autor.

Observando o mapa da rede Zigbee proporcionado pelo software zigbee2mqtt verifica-se os enlaces de comunicação com maior LQI conforme a proximidade dos nós sensores, figura 41.

Foi realizado o teste de acionamento do evento, através do detector de fumaça. E na casa dos décimos de segundo acionou a sirene. Este teste foi realizado 50 vezes mantendo o tempo de acionamento menor que 1 segundo. Importante ratificar que este acionamento da sinalização do evento passou por três a quatro saltos, observando o mapa da figura 41.

Após os testes iniciais de validação do *setup* da aplicação, foram adicionados todos os nós sensores adquiridos para o experimento na RSSF dentro de um apartamento. Onde, alguns nós sensores estavam posicionados a uma ou duas barreiras até o coordenador, figura 42. Com isto verificando a funciona-

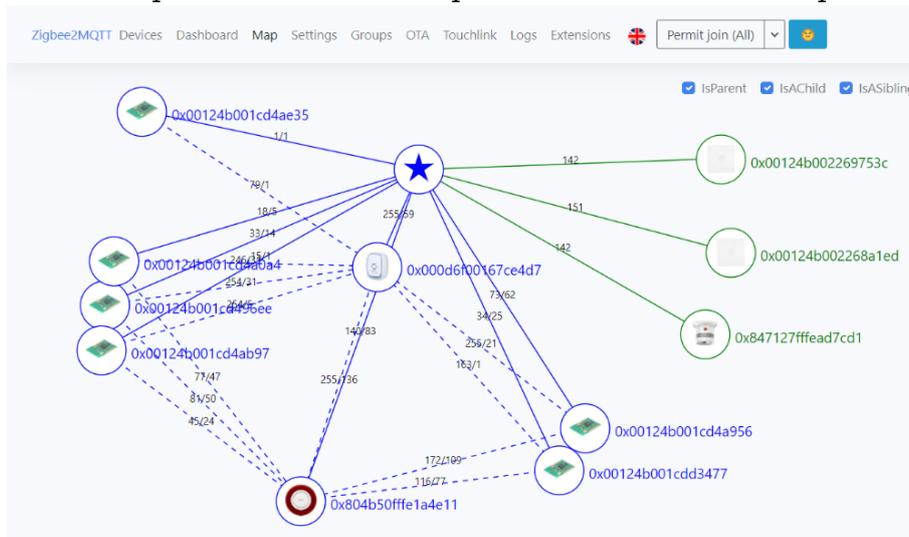
Figura 41 – Mapa da RSSF dos nós posicionados nos pavimentos.



Fonte: do autor.

lidade e os benefícios da padronização do protocolo, pois todos os dispositivos funcionaram adequadamente, mesmo com fabricantes diferentes na mesma rede. Pode-se observar que com duas barreiras (paredes) o nó sensor de endereço estendido final ae35 (CC2531) está com LQI de 1, figura 42.

Figura 42 – Mapa da RSSF dos nós posicionados dentro do apartamento.



Fonte: do autor.

Apesar do LQI de 1, a comunicação permaneceu estabelecida. Durante os testes, verificou-se que quando o LQI está igual a zero, não existe conexão estabelecida, apenas o registro que em algum momento já houve conexão entre estes dispositivos. O LQI conforme verificado na fundamentação teórica, subseção 2.4.3, caracteriza a qualidade de um sinal recebido em um enlace. O valor de LQI em decimal é de 0 a 255. Onde 255 é a referência máxima de força de um sinal recebido.

### 5.2.2 Comunicação entre pisos

O estabelecimento do enlace de comunicação entre os pavimentos de piso é um dos desafios, principalmente devido a atenuação do sinal RF por obstáculos de laje de piso. Pois além do concreto, a laje de piso é caracterizada por ferragens em maior quantidade comparado com as paredes divisórias que normalmente são de tijolos revestidos com acabamentos.

Para o teste de comunicação entre pavimentos, optou-se em utilizar o nó sensor CC2531 como roteador, pois teoricamente possuindo a antena de 3 dBi poderia ter um alcance maior, já que os equipamentos da Heimam possuem antenas internas em circuito impresso.

Com isto, foi realizada uma nova configuração com todos os roteadores CC2531, inserindo todos na rede e após posicionando os mesmos um em cada pavimento.

Com a atualização do mapa Zigbee, percebeu-se que a qualidade do link ficou baixa entre os roteadores, apresentando o valor de LQI de 1, figura 44.

O Enlace de comunicação, apesar de estar com LQI de 1 entre roteadores de pavimentos, possibilitou o teste de sinalização de evento. Onde um botão de pânico RFD foi acionado no térreo e através dos roteadores CC2531 (FFD's) dos pavimentos, possibilitaram a comunicação multi-saltos até chegar no coordenador que está localizado dentro do apartamento. Neste teste, a mensagem do evento passou pelos FFD's dos pavimentos 1, 2, 3, 4 e 5, totalizando 6 saltos, figura 43. Na tabela 14 é possível verificar os resultados estatísticos do *end-to-end delay* dos seis saltos até o coordenador. Os dados temporais foram coletados através do Software *Packet Sniffer* e analisados juntamente com o Debug das publicações MQTT do Node-Red.

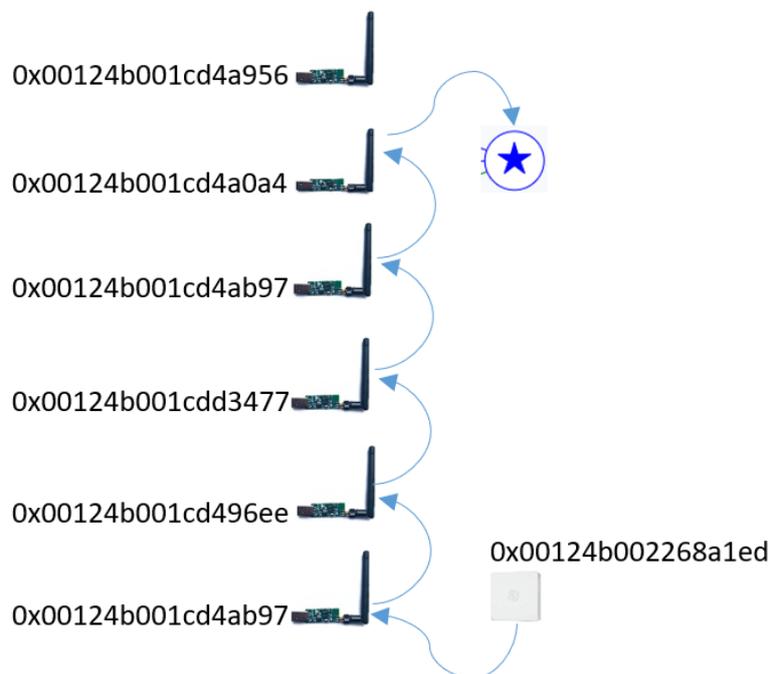
Como no SRV foi configurada a função de envio de mensagem via Bot WhatsApp, foi possível detectar em menos de 5 segundos o evento no número de WhatsApp cadastrado, figura 45.

Pode-se observar na figura 44, que algumas conexões estão com LQI = 0, isto significa sem conexão. No processo de cadastramento, todos os nodos estavam no mesmo ambiente, com isto diversas rotas foram traçadas e salvas nos roteadores e no coordenador.

Observando a figura 41 pode-se verificar que os roteadores Heimam, apresentam melhor cobertura de sinal, do que os roteadores CC2531. Pois neste teste inicial também foi instalado um roteador Heimam em cada pavimento, obtendo uma resposta melhor na cobertura de sinal entre pisos.

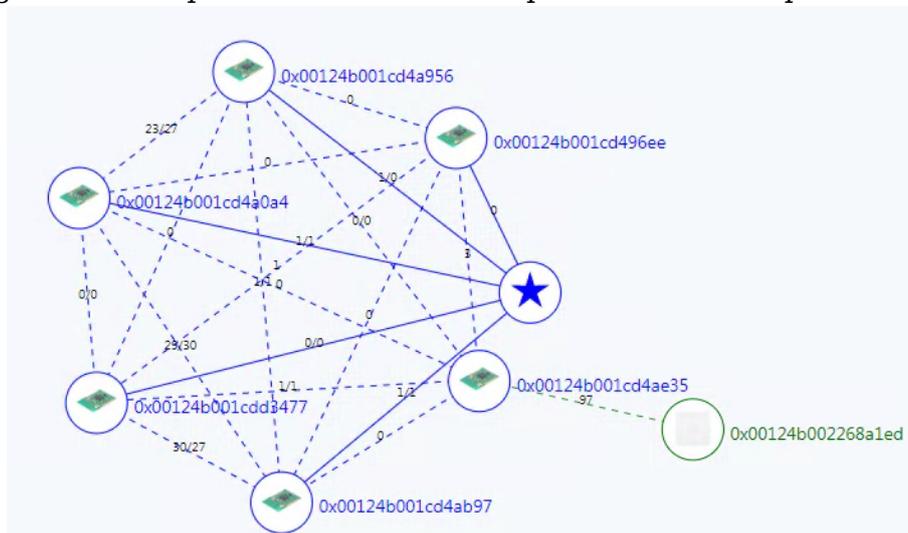
Foi realizado a abertura de um dos roteadores da Heimam (detector de Gás) para verificação de qual SoC Zigbee estava sendo utilizado ou se existia algum amplificador. Após a verificação não foi encontrado amplificador de sinal RF.

Figura 43 – Saltos da mensagem através dos roteadores CC2531 posicionados nos pavimentos.



Fonte: do autor.

Figura 44 – Mapa roteadores CC2531 posicionados nos pavimentos.



Fonte: do autor.

O SoC encontrado foi o EM3585 da Silicon Labs (LABS, 2014). Este SoC (EM3585), em comparação com o CC2531 da TI, possibilita uma potência de saída de até 8 dBm em sua configuração, contra 4,5 dBm do CC2531. Isto deve justificar a melhor qualidade de link obtida com os equipamentos da Heiman.

O experimento realizado, possibilitou uma análise real das dificuldades encontradas nas aplicações de RSSF em prédios. As atenuações causadas por

Tabela 14 – Dados estatísticos do *end-to-end delay*, com intervalo de confiança de 99% (Experimento de sinalização de evento Zigbee com seis saltos).

Dados	Zigbee
Número de eventos	50
Tempo mínimo (s)	0,88
Tempo máximo (s)	2,8
Tempo médio (s)	2,2
Desvio padrão (s)	0,5
Margem de erro (s)	0,18

Fonte: do autor.

Figura 45 – Eventos sinalizados remotamente via Bot WhatsApp.



Fonte: do autor.

paredes e principalmente por lajes de piso, fazem com que sejam necessários rádios com maior potência de saída, exigindo maior consumo de energia. O teste de comunicação multi-salto apresentou resultados temporais de acordo com os regulamentados (menos de 10 segundos) para até seis saltos.

Os dispositivos RFD alimentados por bateria, apresentaram rápida conectividade na mudança de roteador pai, isso pode ser explicado pois os roteadores Zigbee ficam sempre com o canal de recepção aberto quando não estão transmitindo.

Para possibilitar a redundância de sinal, uma hipótese é utilizar mais de um roteador Zigbee por pavimento. Com isto, objetivando que todos os nodos estejam ao alcance de pelo menos dois roteadores. Isto seja no pavimento ou na comunicação vertical até o coordenador.

### 5.2.3 Interferências em ambientes prediais

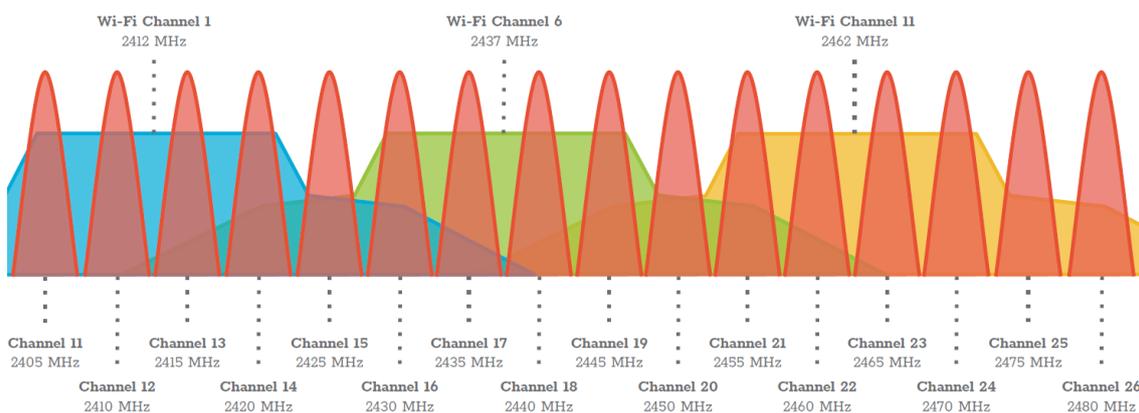
A frequência de 2,4 GHz é livre de licenciamento, com isto, diversos fabricantes de equipamentos acabam adotando esta frequência para utilização. As aplicações são diversas, desde roteadores Wi-Fi (IEEE 802.11), microondas, telefone fixo sem fio e Bluetooth.

Durante a implantação de RSSF de 2,4GHz em prédios, é necessário um estudo ambiental do espectro de utilização do rádio. Pois diversos canais do IEEE 802.15.4 estão sobrepostos a canais do Wi-Fi IEEE 802.11.

Conforme figura 46 , pode-se observar que apenas os canais 15, 20, 25 e 26 IEEE 802.15.4 estão menos propensos a interferências por Wi-Fi, neste caso.

Nos ensaios realizados, foi configurado a utilização do canal 24 do IEEE 802.15.4 no software Zigbee2MQTT.

Figura 46 – Utilização dos canais 2,4GHz IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4.



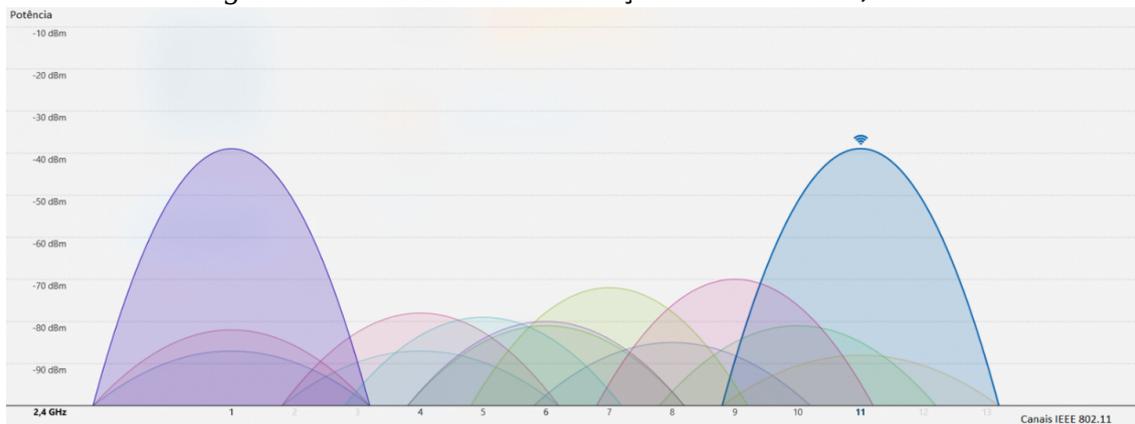
Fonte: (METAGEEK, 2021).

Aplicativos para verificação de canais de Wi-Fi, são normalmente utilizados para verificação e ajustes de canais de roteadores Wi-Fi, buscando sempre separar os canais de roteadores de vizinhos próximos ou da mesma residência ou escritório, buscando diminuir as interferências. Estes aplicativos não possuem grande precisão nas medidas, mas é uma boa ferramenta para um rápido diagnóstico.

Em ambientes prediais, sinais de roteadores Wi-Fi 2,4 GHz IEEE 802.11 são dominantes, conforme visto na figura 47, onde pelo aplicativo *Wi-fi analyser*, no canal 1 está o roteador Wi-Fi do apartamento e no canal 11 é o sinal do celular que está configurado no modo roteador Wi-Fi. Nos demais canais pode-se observar os sinais dos vizinhos, que devido a distância e os obstáculos, possuem menor potência no ponto medido e com isso não causam interferências destrutivas na comunicação.

Outro fator relevante de interferência são os equipamentos de microondas

Figura 47 – Análise de utilização dos canais 2,4GHz.

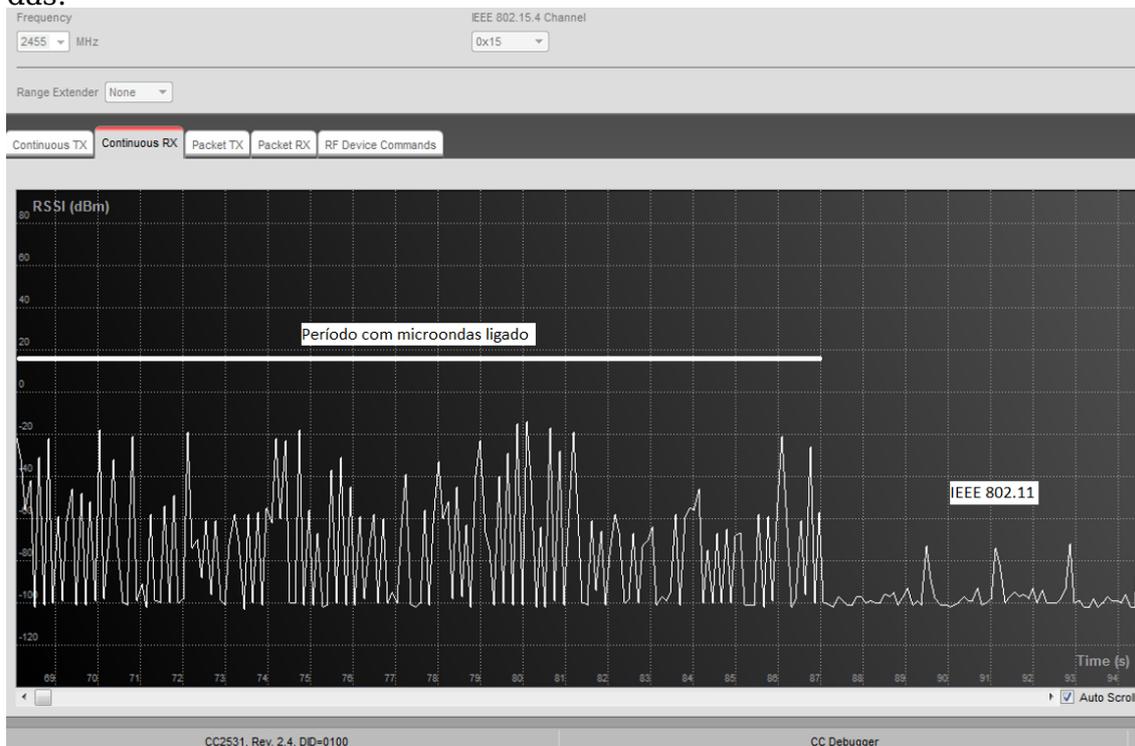


Fonte: do autor.

que operam normalmente na faixa de 2453 MHz até 2465 MHz segundo ITU (ITU, 2015).

Utilizando o sniffer CC2531 juntamente com o software Smart-RF 7, foi realizado um teste, onde o mesmo foi configurado para escutar o canal 21, 2455 MHz do IEEE 802.15.4. Conforme figura 48, pode-se observar o nível de interferência eletromagnética que um microondas pode causar tanto em RSSF quanto em sistemas Wi-Fi, cerca de 80 dBm a 1 metro de distância.

Figura 48 – Ruído causado na utilização do equipamento doméstico microondas.



Fonte: do autor.

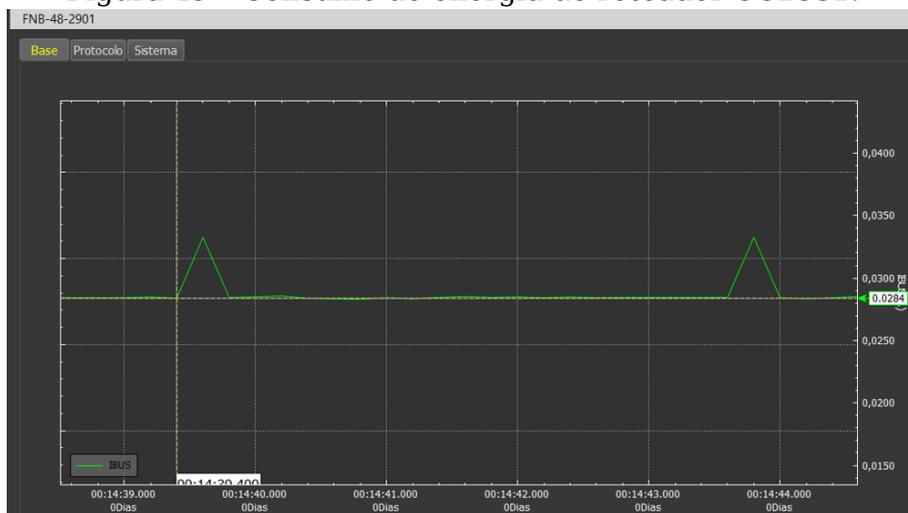
As interferências de outros equipamentos de 2,4GHz não causaram interferências perceptíveis na RSSF, quando utilizado a rede Zigbee no canal 24.

Pesquisas com RSSF industriais como o *WirelessHART*, buscam melhorias na coexistência no espectro de frequência da banda de 2,4 GHz (WINTER, 2017). Estes trabalhos colaboraram para novas versões do IEEE 802.15.4 como por exemplo a emenda "e"(MULLER, 2012; KUMAR *et al.*, 2018). No caso da versão comercial da RSSF Zigbee e conforme visto na subseção 2.5.4.1, a mesma utiliza o IEEE 802.15.4 em sua forma original. Com isto, a RSSF Zigbee não possui técnicas avançadas de coexistência como por exemplo, salto entre canais.

#### 5.2.4 Consumo de energia do Nó sensor

O consumo de energia dos nós sensores Zigbee é elevado nos roteadores, inviabilizando o uso de baterias. Isto devido os roteadores estarem sempre com o canal no modo recepção aberto, quando não estão transmitindo, figura 49.

Figura 49 – Consumo de energia do roteador CC2531.



Fonte: do autor.

Para a aquisição do consumo de energia do nó sensor roteador, foi utilizado um medidor USB modelo FNB48 (FNIRSI, 2022). Com relação aos nós sensores alimentados por bateria (RFD), estes enviam uma mensagem de periodicidade configurável informando o valor percentual da bateria, status de funcionamento e LQI, o detector de fumaça envia esta mensagem a cada 60 segundos aproximadamente. Como o Zigbee utiliza o CSMA/CA sem *beacon*, logo, sem compartimento o acesso ao meio é totalmente probabilístico, utilizando a escuta do canal e os tempos de *Backoff* revisados na teoria do capítulo 2. Com isto, os tempos de envio de mensagens sempre terão pequenas dife-

renças temporais.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

As Redes de Sensores Sem Fio apresentam grandes desafios de engenharia, e estão alcançando os mais diversos campos de utilização. As aplicações de RSSF em prédios para Monitoramento e Sinalização de Eventos, podem ser factíveis, conforme este trabalho apresentou.

O desenvolvimento deste trabalho, foi realizado em duas etapas, onde primeiramente através de simulações parte das conclusões foram apresentadas. Nesta primeira etapa, este trabalho propôs a análise através de simulações de diferentes protocolos de camada MAC buscando atender os requisitos de RSSF para SDAI aplicados em MSE prediais, de acordo com as normas pertinentes que regulamentam estes sistemas. Com essa análise, foi possível ratificar a importância da camada MAC e sua relação direta com o consumo de energia, principalmente em redes multi-saltos. Também foi possível verificar que protocolos MAC assíncronos, assim como o CSMA/CA podem ser utilizados para aplicações de SDAI, sendo esta uma RSSF baseada em monitoramento e sinalização de eventos. Os resultados das simulações mostraram que é possível obter um desempenho satisfatório no que diz respeito ao uso de energia em nodos alimentados por bateria, incluindo o *end-to-end delay* dentro dos requisitos das normas de alarme de incêndio. As simulações realizadas mostraram que é possível ultrapassar mais de 10 anos a vida útil de um nó sensor, utilizando protocolos assíncronos com bateria de alto desempenho. Embora o protocolo assíncrono B-MAC seja energeticamente eficiente, ele apresentou extrema dificuldade na comunicação com envio de mensagens a cada 3 segundos. O protocolo TDMA L-MAC apresenta consumo de energia superior, mas possui resposta determinística em sua comunicação. O protocolo MAC que apresentou melhores resultados nas simulações é o protocolo assíncrono X-MAC, que atendeu a todos os requisitos normativos simulados.

A continuação do desenvolvimento deste trabalho, remeteu a implementação de uma aplicação real para possibilitar a realização de experimentos. Após a revisão sobre os protocolos de RSSF padronizados e um breve estudo

de mercado, foi definido que o experimento seria realizado com o protocolo Zigbee. Com isto, foi implementada uma RSSF Zigbee em um prédio e isto possibilitou a realização de testes de MSE. Os experimentos mostraram que a resposta temporal *end-to-end delay* (atraso de ponta-a-ponta) foi satisfatória, atendendo os tempos normativos de SDAI, mesmo com a realização de seis saltos até o sinalizador do evento. Conforme verificado no estudo, o protocolo Zigbee utiliza o protocolo de camada MAC IEEE 802.15.4 em sua forma mais simples, ou seja sem *beacon*. Este modo de operação de camada MAC do Zigbee, pode ser considerado assíncrono, pois o CSMA/CA sem compartimento é um método de acesso ao meio probabilístico. Um ponto negativo, são os roteadores Zigbee que em sua forma comercial mais comumente encontrada, trabalham com o receptor sempre ativado quando não estão transmitindo. Tanto a IEEE 802.15.4 quanto a Zigbee Alliance não aconselham o uso de nós sensores a bateria como roteadores. Mas para prédios verticais residenciais o uso de RSSF Zigbee para sistemas de MSE pode ser uma alternativa factível, tendo em vista que a energia elétrica é disponível nas áreas condominiais. Com isto, o uso de mais de um roteador Zigbee em um mesmo ambiente colabora para redundância de comunicação dos dispositivos finais alimentados por bateria, tornando a RSSF Zigbee uma alternativa viável para a sinalização de eventos pontuais como os de SDAI.

Finalizando as argumentações, pode-se concluir que este trabalho alcançou os seus objetivos.

Como sugestões para trabalhos futuros, poderão ser explorados:

- Os roteadores Zigbee alimentados por bateria, habilitando o seu uso específico para MSE em locais sem energia disponível, avaliando as respostas temporais.
- Desenvolvimento da aplicação de comunicação direta e descentralizada para sinalização de eventos quando o modo degradado estiver ativado. Ou seja, quando a comunicação com a central estiver interrompida e houver um evento.
- Para os trabalhos futuros propostos acima, a sugestão seria o uso do nó sensor CC2652 da TI que possibilita programação através do software CCS (TI, 2022).

## REFERÊNCIAS

BEAUDAUX, J. *et al.* Thorough Empirical Analysis of X-MAC Over a Large Scale Internet of Things Testbed. **IEEE Sensors Journal**, [S.l.], v. 14, n. 2, p. 383–392, 2014.

CANO, C. *et al.* A low power listening MAC with scheduled wake up after transmissions for WSNs. **IEEE Communications Letters**, [S.l.], v. 13, n. 4, p. 221–223, 2009.

CHEN, H. *et al.* NoPSM: a concurrent mac protocol over low-data-rate low-power wireless channel without prr-sinr model. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, [S.l.], v. 16, n. 2, p. 435–452, 2017.

EN54. **EN54-Part 25 Radio linked devices**. [S.l.: s.n.], 2012.

FNIRSI. **FNB48 English manual**. Accessed in: 25/02/2022, Available at:<<http://www.fnirsi.cn/support>>.

FOUNDATION, E. **Eclipse Mosquitto An open source MQTT broker**. Accessed in: 12/12/2020, Available at:<<https://mosquitto.org/>>.

FOUNDATION, F. P. R. **Research Roadmap for Smart Fire Fighting**. Accessed in: 10/12/2020, Available at:<<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1191.pdf>>.

FOUNDATION, O. **Nodered**. Accessed in: 12/12/2020, Available at:<<https://nodered.org/>>.

FOUNDATION, O. **node-red-contrib-whatsapp-cmb 1.0.2**. Accessed in: 20/03/2021, Available at:<<https://flows.nodered.org/node/node-red-contrib-whatsapp-cmb>>.

GAO, Y. *et al.* COPE: improving energy efficiency with coded preambles in low-power sensor networks. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, [S.l.], v. 11, n. 6, p. 1621–1630, 2015.

HEIMANTECH. **Smart Combustible Gas Sensor Heiman HS1CG.**

Accessed in: 15/12/2020, Available

at:<<https://www.heimantech.com/product/?type=detail&id=5>>.

HEIMANTECH. **Smart Wireless Siren Heiman HS2WD.** Accessed in:

15/12/2020, Available

at:<<https://www.heimantech.com/product/?type=detail&id=8>>.

HEIMANTECH. **Smart Mini Smoke Sensor Heiman HS1SA.** Accessed in:

16/12/2020, Available

at:<<https://www.heimantech.com/product/?type=detail&id=3>>.

IEEE, C. S. **IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks.** [S.l.: s.n.], 2015.

ISO7240-25. **Fire detection and Fire alarm Systems - Part 25 Components using radio transmission paths.** [S.l.: s.n.], 2016.

ITU. **Protection Against Interference - Eletromagnetic Characterization of the Radiated Environment in The 2.4 GHz ISM band.** [S.l.: s.n.], 2015.

KANTERS, K. **Zigbee2mqtt.** Accessed in: 10/12/2020, Available

at:<<https://www.zigbee2mqtt.io/>>.

KUMAR, A. *et al.* A Comprehensive Study of IoT and WSN MAC Protocols: research issues, challenges and opportunities. **IEEE Access**, [S.l.], v. 6, p. 76228-76262, 2018.

LABS, S. **EM358x High-Performance, Integrated ZigBee/802.15.4 System-on-Chip Family.** Accessed in: 29/06/2021, Available at:<<https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/EM358x.pdf>>.

METAGEEK. **ZigBee and Wi-Fi Coexistence.** Accessed in: 20/05/2021, Available at:<<https://www.metageek.com/training/resources/zigbee-wifi-coexistence/>>.

MOULIK, S.; MISRA, S.; DAS, D. AT-MAC: adaptive mac-frame payload tuning for reliable communication in wireless body area networks. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, [S.l.], v. 16, n. 6, p. 1516-1529, 2017.

MULLER, I. **Gerenciamento Descentralizado de Redes Sem Fio Industriais Segundo o Padrão WirelessHart.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — , Porto Alegre, BR, 2012.

NBR-17240, A. **Sistemas de detecção e alarme de incêndio – Projeto, instalação, comissionamento e manutenção de sistemas de detecção e alarme de incêndio – Requisitos**. [S.l.: s.n.], 2010.

NFPA-72. **NFPA-72 National Fire Alarm and Signaling Code**. [S.l.: s.n.], 2016.

OLARTE, J. K. **Proposta de Sistema de Localização em Redes de Sensores Sem Fio Utilizando o Teorema de Bayes**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — , Porto Alegre, BR, 2014.

OMNET++. **Discrete Event Simulation**. Accessed in: 20/11/2020, Available at: <<https://omnetpp.org/>>.

PEGATOQUET, A.; LE, T. N.; MAGNO, M. A Wake-Up Radio-Based MAC Protocol for Autonomous Wireless Sensor Networks. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, [S.l.], v. 27, n. 1, p. 56–70, 2019.

PEREIRA, C. E.; NEUMANN, P. **Industrial Communication Protocols**. 2009.

PERES, A. **Mecanismo de Autenticação Baseado na Localização de Estações Sem Fios Padrão IEEE 802.11**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — , Porto Alegre, BR, 2010.

RASPBERRYPI. **Raspberry Pi 4**. Accessed in: 17/12/2020, Available at:<<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/?variant=raspberry-pi-4-model-b-8gb>>.

SAFT. **Non-rechargeable Li-SOCI2 cell LS 26500 Type**. Accessed in: 22/05/2021, Available at:<<https://www.farnell.com/datasheets/513071.pdf>>.

SEMPREBOM, T. **Explorando Descartes de Ativações Periódicas para Provedimento de Qualidade de Serviço em Redes IEEE 802.15.4**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — , Florianópolis, BR, 2012.

SONOFFTECH. **SONOFF SNZB-01 ZigBee Wireless Switch**. Accessed in: 15/12/2020, Available at:<<https://sonoff.tech/product/smart-home-security/snzb-01/>>.

TADDIA, C. *et al.* MAC support for high density wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE, TELECOMMUNICATIONS AND COMPUTER NETWORKS, 2007., 2007. **Proceedings [ . . . ]** [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–8.

TI, T. I. **CC2531**. Accessed in: 11/12/2020, Available at:<<https://www.ti.com/tool/CC2531EMK>>.

TI, T. I. **SmartRF Studio**. Accessed in: 20/12/2020, Available at:<<https://www.ti.com/tool/SMARTRFTM-STUDIO>>.

TI, T. I. **CC Debugger user's guide rev. H**. Accessed in: 15/12/2020, Available at:<<https://www.ti.com/lit/ug/swru197h/swru197h.pdf?ts=1656206010982>>.

TI, T. I. **SmartRF Flash Programmer**. Accessed in: 20/12/2020, Available at:<<https://www.ti.com/tool/FLASH-PROGRAMMER>>.

TI, T. I. **SmartRF Protocol Packet Sniffer**. Accessed in: 20/12/2020, Available at:<<https://www.ti.com/tool/PACKET-SNIFFER>>.

TI, T. I. **CC2652**. Accessed in: 12/12/2020, Available at:<<https://www.ti.com/product/CC2652R>>.

TI, T. I. **CCSTUDIO Code Composer Studio™ integrated development environment (IDE)**. Accessed in: 25/02/2022, Available at:<<https://www.ti.com/tool/CCSTUDIO>>.

WANG, Q.; JIANG, J. Comparative Examination on Architecture and Protocol of Industrial Wireless Sensor Network Standards. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, [S.l.], v. 18, n. 3, p. 2197–2219, 2016.

WINTER, J. M. **Método de Seleção de Canais baseado em Sensoriamento Espectral Distribuído para Redes WirelessHART**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — , Porto Alegre, BR, 2017.

XU, W. *et al.* The Design, Implementation, and Deployment of a Smart Lighting System for Smart Buildings. **IEEE Internet of Things Journal**, [S.l.], v. 6, n. 4, p. 7266–7281, 2019.

YANG, S.-H. **Wireless Sensor Networks**. 1. ed. Loughborough, UK: Springer London, 2014.

ZENG, X. *et al.* Reliability and Delay Trade-Off Analysis of Unslotted IEEE 802.15.4 Sensor Network for Shipboard Environment. **IEEE Sensors Journal**, [S.l.], v. 21, n. 2, p. 2400–2411, 2021.

ZIGBEE, A. **ZigBee PRO Layer PICS and Stack Profile**. [S.l.: s.n.], 2014.

ZIGBEE, A. **Zigbee Specification**. [S.l.: s.n.], 2017.