

Instituto Federal da Paraíba (IFPB) - Campina Grande  
Bacharelado em Engenharia de Computação

Estudos Experimentais de Redes IEEE 802.15.4g/SUN para  
Aplicações de Campus Inteligente

Autor: Allan José Bispo do Nascimento

Orientador: Ruan Delgado Gomes

Campina Grande - PB

ALLAN JOSÉ BISPO DO NASCIMENTO

**ESTUDOS EXPERIMENTAIS DE REDES IEEE  
802.15.4G/SUN PARA APLICAÇÕES DE CAMPUS  
INTELIGENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
de Computação, Instituto Federal da Paraíba.

Orientador: Prof. Dr. Ruan Delgado Gomes

Campina Grande - PB

2022

N244e Nascimento, Allan José Bispo do.  
Estudos experimentais de redes IEEE 802.15.4g / SUN  
para aplicações de Campus Inteligente / Allan José Bispo  
do Nascimento. - Campina Grande, 2022.  
50 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Bacharelado  
em Engenharia de Computação ) - Instituto Federal da  
Paraíba, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Ruan Delgado Gomes.

1. Redes de sensores 2. Padrão IEEE 3. Sistemas de  
monitoramento I. Título.

CDU 004.7

*Essa página foi intencionalmente deixada em branco.*

## Resumo

Comumente os sistemas de monitoramento trabalham de forma offline ou fazem uso de redes cabeadas para transmissão das informações até uma central de monitoramento. Essa abordagem apresenta pouca flexibilidade, o que acaba por dificultar a instalação e manutenção desses sistemas. Uma alternativa de maior flexibilidade é a utilização uma redes de sensores sem fio, formadas por nós equipados com sensores ou atuadores e capacidade de comunicação via radiofrequência. Ainda assim, com esta solução, pode-se ocorrer problemas de comunicação visto que o meio sem fio é inerentemente não confiável. Em 2012 foram lançadas as emendas IEEE 802.15.4e e IEEE 802.15.4g, trazendo consigo uma série de protocolos que evitassem problemas já conhecidos a fim de melhorar a confiabilidade das redes, no entanto problemas ainda podem ocorrer. O presente trabalho apresenta soluções para melhorar a confiabilidade de rede de sensores sem fio através de técnicas que exploram topologia de rede, algoritmos de salto em rede através do aumento da potência de transmissão, o funcionamento da rede em ambiente de Campus Inteligente e como planejar a mesma.

## Abstract

*Commonly, monitoring systems work offline or make use of wired networks to transmit information to a monitoring center. This approach presents little flexibility that ends up making it difficult to install and maintain these systems. A more flexible alternative is the use of a wireless sensor network, which are formed by nodes equipped with sensors or actuators that have the ability to communicate via radiofrequency. Still, with this solution, communication problems can occur as the wireless medium is inherently unreliable. In 2012, the IEEE 802.15.4e and IEEE 802.15.4g amendments were released, bringing with a number of protocols that avoid known problems in order to improve the reliability of the network, however problems can still occur when using it. The present work presents solutions to improve the reliability in the wireless sensor network through techniques that explore network topology, network hop algorithms by increasing the transmission power, the operation of the network in an Intelligent Campus environment and how to plan the network.*

# Agradecimentos

Primeiramente a minha mãe Luciana Bispo, principal responsável pela minha escolha de curso;  
Meu irmão Anderson Bispo e minha cunhada Bárbara Guerra pelo apoio e motivação;  
Meu avô Assis Nascimento, pelo enorme carinho que tivera comigo enquanto estive nessa jornada;  
A todos os meus professores, mais especialmente a Ruan Gomes por ser meu orientador, conselheiro, amigo e inspiração. Assim como a Henrique Cunha que acreditou no meu potencial logo no início do curso me dando diversas oportunidades dentro da graduação;  
A todos os colegas dos Grupo de Comunicação e Processamento de Informação (GComPI) e do Laboratório de Robótica (LaR) do IFPB-CG pela enorme apoio nas horas de perrengue com projetos, troca de conhecimentos e convivência;  
A todos os membros do grupo Linhas Retas Curvas (LRC), mais especialmente a Breno Fernandes, Matheus Cavalcante, Pedro Alencar e Elton Arruda por estarem sempre presentes nos momentos de descontração no Discord e me arrancarem boas risadas mesmo distantes;  
A todos os membros do grupo Emos da Meia Noite, mais especialmente a João Soares, Witória Manuely, Anderson Nóbrega, Rennan Ramos e Talison Kennedy por me acolherem como colega e amigo em Campina Grande;  
A todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, me ajudarem a concluir esta graduação e este trabalho.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>5</b>
3.1	Desafios para a Implantação de Redes de Sensores Sem Fio . . . . .	5
3.2	Padrões para Redes de Sensores Sem Fio . . . . .	6
3.3	<i>Wireless Smart Ubiquitous Network</i> . . . . .	7
3.3.1	Visão geral das redes de longo alcance e baixa potência (LPWAN) . . . . .	7
<b>4</b>	<b>História e evolução do padrão IEEE 802.15.4</b>	<b>10</b>
4.1	Novas definições de camada física da emenda IEEE 802.15.4g . . . . .	14
4.2	SUN-FSK . . . . .	15
4.3	SUN-OQPSK . . . . .	16
4.4	SUN-OFDM . . . . .	16
4.5	Novas definições de camada de enlace da emenda IEEE 802.15.4e . . . . .	17
4.5.1	Aprimoramentos funcionais gerais . . . . .	18
4.5.2	Modos de comportamento da camada de enlace . . . . .	18
4.5.3	Resultados experimentais da implantação de redes IEEE 802.15.4g . . . . .	19
<b>5</b>	<b>Metodologias e resultados específicos</b>	<b>23</b>
5.1	Desenvolvimento de algoritmo para aumento de confiabilidade em RSSF . . . . .	23
5.1.1	Metodologia . . . . .	23
5.1.2	Resultados . . . . .	25
5.2	Desenvolvimento de protótipo e análise de rede Wi-SUN . . . . .	27
5.2.1	Metodologia . . . . .	27
5.2.2	Resultados . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>30</b>
<b>A</b>	<b>Implementação de redes IEEE 802.15.4g usando a plataforma OpenMote-B</b>	<b>31</b>
A.1	Instalação dos pacotes de software requeridos . . . . .	32
A.2	Clonagem e configuração do repositório . . . . .	32
A.3	Escrita e compilação do código do transmissor . . . . .	33
A.4	Escrita e compilação do código do receptor . . . . .	35

# Lista de Figuras

1	Tecnologias sem fio: Taxa de bits e consumo de energia versus alcance (baseado em [14]). . . . .	8
2	Redes LPWAN: Taxa de bits versus alcance (baseado em [17]). . . . .	8
3	Redes LPWAN: Latência versus alcance (baseado em [19]). . . . .	9
4	Padrões de LPWAN. [25] . . . . .	10
5	Arquitetura da rede Wi-SUN [39] FAN no modelo de camadas OSI. . . . .	22
6	Ambiente de realização dos experimentos . . . . .	24
7	Hardware montado . . . . .	25
8	Valores médios de PDR para cada enlace . . . . .	26
9	Valores médios de RSSI para cada enlace . . . . .	27
10	Diagrama de blocos do Sistema Embarcado . . . . .	28
11	Diagrama hierárquico do software embarcado . . . . .	28
12	Placa do TIVA C ligada ao módulo de rádio e se comunicando com a placa OpenMote (do lado direito). . . . .	29
13	Placa do OpenMote-B [44]. . . . .	31

## Lista de Tabelas

1	Evolução dos Padrões para RSSF e IoT. . . . .	3
2	Evolução do Padrão IEEE 802.15.4 . . . . .	11
3	Valores de RSSI médios e Desvio Padrão( $\sigma$ ). . . . .	27

# 1 Introdução

Tradicionalmente, os sistemas de monitoramento trabalham de forma *offline* ou fazem uso de redes cabeadas para transmissão das informações até uma central de monitoramento. Nesses sistemas, o processo de instalação dos cabos e sensores possui usualmente um custo muito mais alto que os próprios sensores [1]. Além disso, essa abordagem apresenta pouca flexibilidade, o que dificulta o processo de instalação e manutenção da rede. Uma alternativa de menor custo e maior flexibilidade é a utilização de redes sem fio. As Redes de Sensores sem Fio (RSSF) são formadas por nós equipados com sensores ou atuadores e capacidade de comunicação via radiofrequência. Os nós podem ainda ter capacidade de processamento, o que permite a inserção de inteligência nos dispositivos, possibilitando melhorar a utilização do canal de comunicação [2].

A utilização de RSSF também apresenta desafios que devem ser enfrentados. As redes sem fio utilizam um meio de comunicação inerentemente não confiável, o que pode ser agravado devido a ruídos e interferências na faixa de espectro utilizada para comunicação, além de problemas devidos à atenuação por multipercurso e sombreamento [2]. A falta de confiabilidade nas redes sem fio torna difícil a definição de garantias de qualidade de serviço (QoS). Além disso, os nós sensores devem ter baixo custo, o que pode resultar em um conjunto de restrições, como a baixa taxa de transmissão disponível e a baixa capacidade de processamento e, em alguns casos, restrições de consumo de energia [3].

Para tentar lidar com os problemas mencionados, alguns padrões têm sido propostos nos últimos anos com foco em aplicações industriais, como o WirelessHART e o ISA100.11a. Mais recentemente, em 2012, o Padrão IEEE 802.15.4e foi lançado [4]. O objetivo desse padrão é propor soluções para aplicações que requerem alta confiabilidade, como aplicações industriais [5]. Em geral, os protocolos definidos por esses padrões são baseados em acesso múltiplo por divisão de tempo (*Time Division Multiple Access*, TDMA) ou salto em frequência para reduzir colisões e mitigar os efeitos de interferência e atenuação por multipercurso, permitindo satisfazer os requisitos de aplicações de *Internet of Things* (IoT) em termos de confiabilidade e determinismo.

Embora esses protocolos usem mecanismos para lidar com os problemas de confiabilidade em uma RSSF, alguns problemas ainda podem surgir. Por exemplo, ao usar o salto em frequência, os nós geralmente alternam para um novo canal antes de cada transmissão. No entanto, sem um gerenciamento adequado da lista negra (lista de canais não usados na rede), o desempenho da rede pode ser significativamente degradado [6]. Dessa forma, novos mecanismos precisam ser implementados para garantir boa qualidade de serviço em redes sem fio que usam os protocolos definidos pelos padrões mencionados. Os protocolos especificados no Padrão IEEE 802.15.4e pos-

suem definições que permitem a proposição de diferentes implementações. Por exemplo, embora o modo *Time Slotted Channel Hopping* (TSCH) defina o uso de lista negra, não é definido no padrão como os canais a serem colocados na lista negra devem ser selecionados e nem como deve ocorrer a sincronização dos nós no caso de mudanças dinâmicas na lista negra.

Algumas medidas podem ser tomadas para melhorar o desempenho de uma RSSF, tanto durante a operação da rede, por meio de protocolos adaptativos, como na fase de planejamento da rede. Por exemplo, pode-se empregar estratégias de alocação dinâmica de canal ou escolha dinâmica de rota, com base na qualidade dos enlaces da rede. Um correto planejamento da rede também pode ajudar a melhorar o desempenho da rede e auxiliar no funcionamento dos protocolos, reduzindo, por exemplo, a possibilidade de colisões e a sobrecarga de roteadores.

No ano de 2011 ocorreu o surgimento de uma iniciativa denominada de *Smart Utility Network* (SUN) que agregou novas camadas físicas suportando principalmente a implementação de redes sem fio inteligentes de utilidades inteligentes. No mesmo ano também surgiu a *Wi-SUN Alliance*, aliança esta responsável pela padronização do uso de redes Wi-SUN a nível global e sua interoperabilidade.

Esse trabalho tem o objetivo de expor diversos resultados obtidos em projetos passados acerca de Redes IEEE 802.15.4/SUN para aplicações de Campus Inteligente visando demonstrar o funcionamento e como planejar a rede, algoritmos para melhorar a confiabilidade de comunicação e explorar o uso da topologia linear. Os resultados obtidos foram positivos e expõem uma melhora significativa na qualidade de comunicação da rede quando alguma das alternativas propostas são utilizadas. Também é fornecido um apêndice explicando como implementar redes IEEE 802.15.4g utilizando a plataforma OpenMote-B.

## 2 Justificativa

O presente trabalho está inserido em um tema recente e possui potencial para a geração de contribuições científicas relevantes, que podem ser utilizadas como base para o desenvolvimento de novos protocolos e padrões para RSSF, bem como para o desenvolvimento de novos produtos e aplicações IoT que fazem uso da tecnologia de redes de sensores sem fio.

Os esforços de padronização para RSSF são relativamente recentes, como pode ser visto na Tabela 1. Todos esses padrões são baseados na camada física do Padrão IEEE 802.15.4. Alguns mecanismos de camada de acesso ao meio definidos nos padrões WirelessHART e ISA100.11a foram incorporados no padrão mais recente IEEE 802.15.4e, como o uso de TDMA, salto em frequência e listas negras. Há uma tendência na convergência das definições dos padrões para RSSF e as definições de camada MAC do Padrão IEEE 802.15.4e. Portanto, as soluções estudadas neste projeto podem ser aplicadas diretamente ou adaptadas para uso nos diferentes padrões para RSSF.

Além disso, vários aspectos de implementação são deixados em aberto nos padrões. Entre esses aspectos em aberto está a definição do escalonamento da rede, ou seja, a atribuição de slots de tempo para comunicação aos nós sensores, roteadores intermediários e sorvedouros da rede. Embora a implementação da estratégia de escalonamento não seja definida no padrão, este aspecto pode influenciar significativamente no desempenho da rede e no atendimento aos requisitos das aplicações [7]. Em trabalhos anteriores do nosso grupo de pesquisa [8], [9] foram propostos

Tabela 1: Evolução dos Padrões para RSSF e IoT.

Lançamento	Nome	Código do Padrão	Edição	Status	Estabilidade
12/01/2009	WIA-PA	IEC PAS 62601:2009	1.0	Substituído	-
22/01/2009	WirelessHART	IEC PAS 62591:2009	1.0	Substituído	-
27/04/2010	WirelessHART	IEC 62591:2010	1.0	Revisado	-
29/11/2011	WIA-PA	IEC 62601:2011	1.0	Revisado	-
26/03/2012	ISA 100.11a	IEC PAS 62734:2012	1.0	Substituído	-
28/10/2014	ISA 100.11a	IEC 62734:2014	1.0	Válido	2019
27/01/2015	Wi-SUN	Wi-SUN FAN	1.0	Válido	-
14/05/2015	6TiSCH	RFC 7554	-	Substituído	-
09/12/2015	WIA-PA	IEC 62601:2015	2.0	Válido	2018
30/03/2016	WirelessHART	IEC 62591:2016	2.0	Válido	2018
04/10/2018	6TiSCH	RFC 8480	-	Substituído	-
29/05/2021	6TiSCH	RFC 9033	-	Válido	-

mecanismos para estimação de qualidade de enlace e um novo protocolo adaptativo multicanal para RSSF. Parte desses trabalhos foram realizados no contexto de um projeto Interconecta e de um projeto de Inovação, aprovados pelo grupo de pesquisa proponente deste projeto, no ano de 2018. Por meio desses projetos foi possível iniciar estudos de simulação sobre RSSF e sobre os

novos padrões para esse tipo de rede, bem como desenvolver protótipos de um novo tipo de nó capaz de realizar a estimação de qualidade de enlace em tempo real, de acordo com a arquitetura descrita em [8]. Este trabalho tem como objetivo demonstrar resultados de diversos experimentos a fim de prover informação acerca de diferentes técnicas, topologias e o comportamento da rede em área de Campus Inteligente de forma a trazer possíveis melhorias a projetos e trabalhos futuros.

## 3 Fundamentação Teórica

### 3.1 Desafios para a Implantação de Redes de Sensores Sem Fio

O canal sem fio no ambiente industrial apresenta características não favoráveis à comunicação sem fio, como o alto nível de atenuação e problemas de sombreamento. Muitos ambientes também apresentam características que tornam o canal sem fio não estacionário no longo prazo, o que pode provocar mudanças bruscas nas características dos canais no decorrer do tempo. Em ambientes industriais usualmente existem muitos objetos e obstruções (muitas vezes construídos com materiais metálicos), além de objetos móveis, como robôs, automóveis e pessoas. Isso influencia tanto no desvanecimento em larga escala como na atenuação em pequena escala. Além disso, problemas de interferência podem ocorrer, uma vez que os rádios em uma RSSF usam bandas não licenciadas[2].

A potência do sinal recebido em um receptor depende da potência de transmissão, do ganho das antenas, da distância entre transmissor e receptor e dos efeitos causados pelo ambiente. Existe uma variação entre a potência do sinal recebido, considerando uma mesma distância entre transmissor e receptor, dependendo do local onde eles estão posicionados. Essa variação na potência recebida é conhecida como sombreamento log-normal [10]. Além da perda no percurso e sombreamento, deve-se também analisar a atenuação em pequena escala, devido a modificações rápidas que ocorrem no perfil de multipercurso do ambiente causado pelo movimento de objetos ao redor do transmissor e do receptor.

O canal sem fio pode ser modelado como estacionário no sentido amplo, por um período curto de tempo, apesar das movimentações ao redor do transmissor e do receptor. No entanto, as características do canal podem mudar significativamente em um período de poucas horas devido a mudanças ocorridas na topologia do ambiente [11]. Por exemplo, o movimento de uma grande estrutura metálica pode modificar o perfil de multipercurso relacionado ao conjunto de raios que permanecem invariantes por um longo período de tempo, o que modifica o valor médio da potência recebida, embora o transmissor e o receptor permaneçam estáticos.

Outro aspecto importante é a decorrelação entre os diferentes canais. O Padrão IEEE 802.15.4 define 16 canais na faixa de 2,4 GHz, com largura de banda de 2 MHz e espaçamento entre canais de 5 MHz. Experimentos descritos em [8] mostram que trocar o canal de comunicação pode levar a uma diferença de cerca de 15 dB na potência recebida, em um ambiente industrial. Nos experimentos descritos em [12], em um ambiente de escritório, foi observado que para distâncias maiores que 6,5 m entre transmissor e receptor, mesmo os canais adjacentes são decorrelacionados. Dessa forma, além da variação no valor de potência recebida ao se considerar locais diferentes, mas

com a mesma distância, esse valor também pode variar ao se considerar transmissões em diferentes faixas de frequência, mesmo com o transmissor e o receptor posicionados em locais fixos [8].

### 3.2 Padrões para Redes de Sensores Sem Fio

O Padrão IEEE 802.15.4 é designado para aplicações de RSSF e define as camadas física e de acesso ao meio (*Medium Access Control* – MAC), provendo comunicação sem fio com baixo consumo de energia e baixo custo para aplicações que não requerem alta taxa de transferência de dados. O padrão opera em bandas não licenciadas e um total de 27 canais para comunicação são definidos. A taxa de *bits* máxima é de 250 *kbit/s* nominal, quando operando na banda de 2,4 GHz.

Em redes que utilizam os protocolos MAC definidos pelo Padrão IEEE 802.15.4 é difícil estabelecer limites estritos de latência, devido ao uso de CSMA/CA. Neste protocolo o acesso ao meio de comunicação ocorre de forma distribuída e aleatória, em que cada nó decide individualmente o melhor momento de realizar uma transmissão, baseado na sua noção local de disponibilidade do canal. No entanto, problemas de terminal escondido podem ocorrer, em que dois nós que transmitem para o mesmo receptor não conseguem detectar as transmissões um do outro. Este problema pode tornar o comportamento da rede ainda mais imprevisível. Além disso, os protocolos definidos pelo IEEE 802.15.4 utilizam apenas um canal em toda rede, o que é um ponto único de falha e aumenta o número de colisões. Devido a essas limitações, novos protocolos com foco em aplicações industriais foram desenvolvidos, como o WirelessHART, o ISA100.11a e o IEEE 802.15.4e [4]. Estes protocolos utilizam a camada física do IEEE 802.15.4, mas definem novos protocolos de acesso ao meio.

O Padrão IEEE 802.15.4e é o mais recente dos mencionados anteriormente. O seu objetivo é definir soluções para aplicações que requerem alta confiabilidade, como é o caso de muitas aplicações. Cinco modos de operação são definidos para o IEEE 802.15.4e: TSCH, *Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension* (DSME), *Low Latency Deterministic Network* (LLDN), *Asynchronous Multi-Channel Adaptation* (AMCA), e *Radio Frequency Identification Blink* (BLINK). No entanto, apenas os modos TSCH, DSME e LLDN têm sido explorados na literatura até recentemente [5]. Uma das principais diferenças entre o novo Padrão IEEE 802.15.4e, em comparação com o Padrão IEEE 802.15.4 definido previamente, é o uso de múltiplos canais. O modo TSCH define o uso de salto em frequência e o modo DSME define o uso de salto em frequência ou adaptação de canal. Quando a rede usa adaptação de canal, dois nós podem se comunicar utilizando o mesmo canal por um longo período de tempo. Uma troca de canal apenas ocorre quando o canal em uso passa a apresentar baixa qualidade. Dessa forma, um procedimento para avaliar a

qualidade dos enlaces de forma contínua se faz necessário para permitir o uso do mecanismo de adaptação de canal. A implementação desse procedimento não é definida pelo padrão [5].

### **3.3 *Wireless Smart Ubiquitous Network***

#### **3.3.1 Visão geral das redes de longo alcance e baixa potência (LPWAN)**

Com o surgimento da Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT) e comunicações máquina a máquina (*machine to machine*, M2M), um crescimento maciço na implantação de nós sensores é esperado, equipando carros, medidores, sensores, terminais de ponto de venda, produtos eletrônicos, vestimentas e as mais variadas máquinas. O crescimento exponencial da IoT está impactando virtualmente todas as áreas da indústria e quase todas as áreas de mercado. Há um imenso potencial para um crescimento também exponencial no desenvolvimento de aplicações baseadas em sensoriamento sem fio em quase todos os setores da sociedade, permitindo conectar sensores, veículos, robôs e máquinas à internet, para os mais variados objetivos [13].

Os dispositivos de IoT usualmente apresentam restrições, como a baixa taxa de transferência de dados disponível e a necessidade de apresentarem um baixo consumo de energia, uma vez que em muitos casos eles são alimentados por baterias. Diversas tecnologias de comunicação podem ser utilizadas para prover comunicação aos dispositivos e cada uma apresenta diferentes características, com relação a diferentes aspectos, como taxa de bits, custo, alcance e consumo de energia. A escolha da tecnologia mais apropriada deve considerar as características do ambiente, dos dispositivos e os requisitos das aplicações.

Na Figura 1 [14] é possível visualizar uma comparação entre as principais tecnologias de rádio utilizadas para soluções de IoT. As opções de rádio amplamente utilizadas para curto alcance (ex: ZigBee [15] e Bluetooth) não são adaptadas para cenários que requerem transmissão de longo alcance. Tecnologias mais conhecidas como Wi-Fi e Bluetooth consomem bastante energia. Soluções com base em comunicações celulares (ex: redes 3G, 4G e 5G) podem fornecer cobertura maior, mas seus dispositivos possuem um consumo alto de energia, além de um alto custo fixo com manutenção e assinaturas. Portanto, os requisitos de algumas aplicações de IoT impulsionaram o surgimento de um novo tipo de tecnologia de comunicação sem fio, as redes de longo alcance e baixa potência (LPWAN), que atendem os requisitos de baixo custo, baixo consumo de energia e longo alcance [16], embora em contrapartida ofereçam uma baixa taxa de bits, em comparação com outros padrões.

Com foco específico em algumas tecnologias LPWAN, a Figura 2 [17] mostra uma comparação de taxa de bits e o alcance delas. Como pode-se verificar, a tecnologia Wi-SUN é a mais indicada

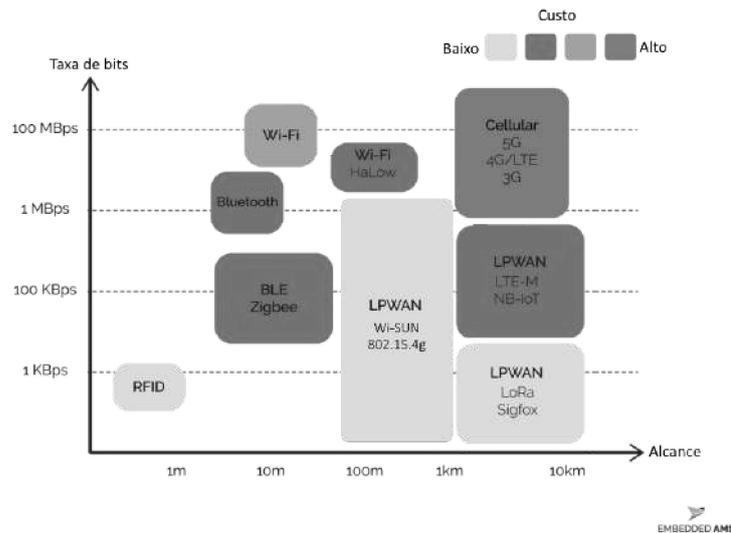


Figura 1: Tecnologias sem fio: Taxa de bits e consumo de energia versus alcance (baseado em [14]).

quando se deseja utilizar aplicações que demandam taxas de bits maiores, chegando a 2,4 Mbps em algumas configurações definidas na versão de 2020 do padrão [18]. Por outro lado, ela não é a mais indicada quando os dispositivos estão a distâncias muito grandes, apesar de que essa inferioridade poder ser suplantada implantando dispositivos adicionais e formando uma rede em malha.

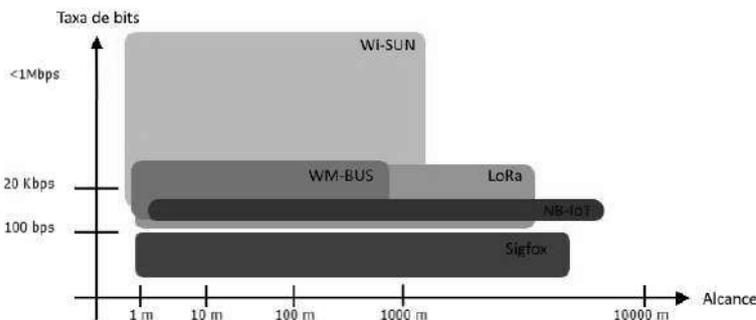


Figura 2: Redes LPWAN: Taxa de bits versus alcance (baseado em [17]).

Na Figura 3 é mostrada uma comparação entre as tecnologias LPWAN com relação à latência da rede e ao alcance. Apesar de não atingir distâncias de vários quilômetros, as redes IEEE 802.15.4g/Wi-SUN conseguem oferecer latência reduzida, compatíveis com as exigidas por aplicações de uso crítico, em relação a outras tecnologias LPWAN, que devido a mecanismos de camada MAC, mantêm os dispositivos em inatividade durante muito tempo, atrasando portanto transmissões e recepções de pacotes [19].

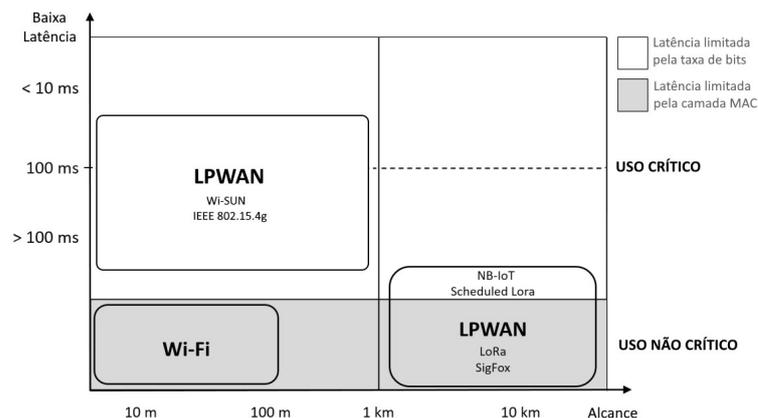


Figura 3: Redes LPWAN: Latência versus alcance (baseado em [19]).

Atualmente existem vários esforços de padronização das redes LPWAN, que vêm sendo realizados por diversos órgãos padronizadores, tais como o IEEE, o instituto de padrões de telecomunicações europeu (*european telecommunications standards institute*, ETSI) [20], o projeto de parceria da terceira geração (*3rd generation partnership project*, 3GPP) [21], e também alguns consórcios da indústria, tais como o grupo de interesse especial Weightless (*Weightless special interest group*, WSIG) [22] e as alianças LoRa© [23] e DASH7 [24]. No longo prazo, espera-se que a adoção desses padrões provavelmente reduza a fragmentação do mercado de LPWAN e permita a coexistência de várias tecnologias concorrentes [25]. A Figura 4 organiza os padrões propostos de acordo com as organizações que as desenvolve.

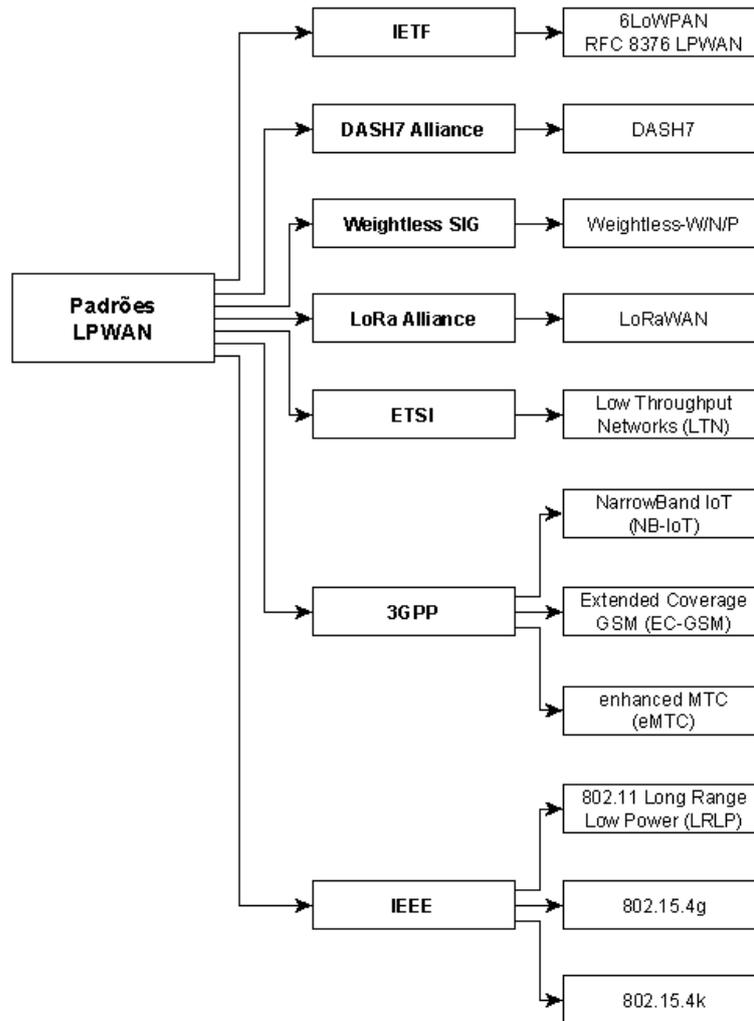


Figura 4: Padrões de LPWAN. [25]

## 4 História e evolução do padrão IEEE 802.15.4

Motivado pelas crescentes demandas por redes que unissem os requisitos de baixo consumo de energia e de baixo custo, o comitê de novos padrões (*new standards committee*, NESCOM) do IEEE criou oficialmente, em dezembro de 2000, o grupo de trabalho 4 (*task group 4*, TG4), dentro de um grupo maior, o 802.15, que desenvolve padrões para as redes sem fio de alcance pessoal (*wireless personal area networks*, WPAN), ou redes sem fio de curtas distâncias. O TG4 tinha como objetivo principal desenvolver um novo padrão de WPAN, com baixa taxa de transmissão, ou seja, uma *low-rate* WPAN (LR-WPAN).

Assim, foi dado o primeiro passo para o que culminaria na criação do padrão IEEE 802.15.4, que fornece conectividade sem fio, com baixa complexidade, baixo custo, baixo consumo de energia e baixa taxa de transferência de dados entre dispositivos portáteis, fixos ou móveis. Pode-se afirmar que o padrão é apropriado quando o consumo de energia é uma questão importante e trocas pouco

frequentes de pequenos pacotes de dados é suficiente para atender aos requisitos de comunicação. É importante frisar que o TG4 teve como escopo de projeto apenas a especificação das camadas físicas e de controle de acesso ao meio, assim, está fora da definição do padrão IEEE 802.15.4 quaisquer outras camadas da rede [26].

A Tabela 2 contempla todas as publicações relacionadas ao padrão IEEE 802.15.4. As publicações estão divididas por tipo (base, emenda ou correção) e por status (ativo, esboço ou inativo). Nos parágrafos a seguir a evolução do padrão é detalhada.

Tabela 2: Evolução do Padrão IEEE 802.15.4

<b>Código do Padrão</b>	<b>Aprovação</b>	<b>Publicação</b>	<b>Status</b>	<b>Tipo</b>
802.15.4-2003	12/05/2003	01/10/2003	Inativo	Base
802.15.4a-2007	22/03/2007	31/08/2007	Inativo	Emenda
802.15.4-2006	08/06/2006	07/09/2006	Inativo	Base
802.15.4c-2009	19/03/2009	17/04/2009	Inativo	Emenda
802.15.4d-2009	19/03/2009	17/04/2009	Inativo	Emenda
802.15.4-2011	16/06/2011	05/09/2011	Inativo	Base
802.15.4e-2012	06/02/2012	16/04/2012	Inativo	Emenda
802.15.4f-2012	06/02/2012	20/04/2012	Inativo	Emenda
802.15.4g-2012	29/03/2012	27/04/2012	Inativo	Emenda
802.15.4j-2013	06/02/2013	27/02/2013	Inativo	Emenda
802.15.4k-2013	14/06/2013	14/08/2013	Inativo	Emenda
802.15.4m-2014	27/03/2014	30/04/2014	Inativo	Emenda
802.15.4n-2016	29/01/2016	29/04/2016	Inativo	Emenda
802.15.4p-2014	27/03/2014	05/05/2014	Inativo	Emenda
802.15.4q-2016	29/01/2016	29/04/2016	Inativo	Emenda
802.15.4s-2018	15/02/2018	27/06/2018	Inativo	Emenda
802.15.4t-2017	14/02/2017	14/04/2017	Inativo	Emenda
802.15.4u-2016	22/09/2016	10/02/2017	Inativo	Emenda
802.15.4-2015	05/12/2015	22/04/2016	Inativo	Base
802.15.4-2015 Cor1	15/02/2018	09/07/2018	Inativo	Correção
802.15.4v-2017	18/05/2018	30/06/2017	Inativo	Emenda
802.15.4x-2019	21/03/2019	26/04/2019	Inativo	Emenda
802.15.4w-2020	04/06/2020	25/09/2020	Ativo	Emenda
P802.15.4y	14/05/2018	-	Esboço	Emenda
802.15.4z-2020	04/06/2020	25/08/2020	Ativo	Emenda
802.15.4-2020	06/05/2020	23/07/2020	Ativo	Base
802.15.4aa	-	-	Esboço	Emenda

O padrão inicial, IEEE 802.15.4-2003 [27], especificou duas camadas físicas, ambas utilizando a técnica de espalhamento espectral *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). A primeira operando a 2.450 MHz, com taxa de bits de 250 kbps e a segunda utilizando as bandas de 915 MHz e 868 MHz, com taxas de bit de 40 kbps e 20 kbps, respectivamente.

A camada MAC é única e lida com todos os acessos ao canal, empregando o mecanismo de

acesso múltiplo com verificação de portadora e prevenção de colisão (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*, CSMA-CA), além de ainda ser responsável pelas seguintes tarefas: Gerar pacotes sinalizadores (*beacons*) para a rede se o dispositivo for um coordenador, sincronizar com os *beacons*, apoiar a associação e desassociação a uma *Personal Area Network* (PAN), suportar segurança do dispositivo, manipular e manter o mecanismo garantidor de *slots* de tempo (*Guaranteed Time Slots*, GTS) e finalmente fornecer um canal confiável entre duas entidades MAC. Após a versão inicial, quatro novas versões base foram lançadas nos anos de 2006, 2011, 2015 e 2020.

Em 2006 [28] a nova versão base liberada após a versão de 2003, adicionou mais duas opções de camadas físicas, que produzem taxas de dados mais altas nas bandas de frequência mais baixas, assim as configurações PHY de 868/915 MHz que já suportavam taxas de dados de 20 kbps e 40 kbps, agora opcionalmente poderiam suportar, 100 kbps e 250 kbps, respectivamente. A configuração PHY de 2.450 MHz permanece suportando uma taxa de dados de 250 kbps. Assim, passaram a existir quatro camadas físicas:

- OQPSK<sup>1</sup>-DSSS na banda de 2.450 MHz (802.15.4-2003);
- BPSK<sup>2</sup>-DSSS na banda de 868/915 MHz (802.15.4-2003);
- OQPSK-DSSS na banda de 868/915 MHz (802.15.4-2006);
- BPSK-PSSS<sup>3</sup> e ASK na banda de 868/915 MHz (802.15.4-2006).

A camada de acesso ao meio permaneceu compatível com a versão inicial, mas adicionou novas opções e alguns aprimoramentos, incluindo: suporte a uma base de tempo compartilhada com um mecanismo de marcação de tempo; suporte a agendamento de pacotes sinalizadores *beacons*; sincronização de mensagens de *broadcast* em redes PAN habilitadas para utilização de *beacons* e aprimoramentos de segurança.

Em 2011 [29] o padrão foi mais uma vez revisado e passou a incluir três alterações aprovadas após a versão de 2006. Este esforço acrescentou mais quatro opções de camadas físicas:

- Uso de *Chirp Spread Spectrum* (CSS), empregando modulação *Differential Quadrature Phase-Shift Keying* (DQPSK), operando na banda de 2.450 MHz;
- Banda ultra-larga (*ultra-wideband*, UWB) combinando a modulação *Burst Position Modulation* (BPM) e a modulação BPSK, operando nas bandas sub-GHz ou na banda de 3–10 GHz;

---

<sup>1</sup> *Offset Quadrature Phase-Shift Keying*

<sup>2</sup> *Binary Phase Shift Keying*

<sup>3</sup> *Parallel Sequence Spread Spectrum*

- Modulação *M-ary Phase-Shift Keying* (MPSK), operando na banda de 780 MHz;
- Modulação *Gaussian Frequency-Shift Keying* (GFSK), operando na banda de 950 MHz.

Além de uma nova característica da camada de acesso ao meio, para estimação de distâncias entre nós. Também é preciso destacar uma mudança na organização do padrão, que passou a ser organizado de modo que cada camada física passou a ter uma seção separada, enquanto que a camada de acesso ao meio foi dividida em descrição funcional, especificação de interface e especificação de segurança.

Em 2015 [30] uma nova versão base foi criada com o intuito de reunir as alterações aprovadas após a revisão de 2011, que engloba seis alterações na camada física e uma alteração na camada de acesso ao meio, além de retificações e esclarecimentos. Os recursos adicionados pelas emendas são os seguintes:

- Formatos de quadros aprimorados, mantendo compatibilidade com versões anteriores;
- Elementos de informação (*information elements*, IE);
- Salto de canais;
- Opções estendidas de *superframes*;
- Mecanismos para reduzir consumo de energia;
- Um *frame* de reconhecimento aprimorado que pode transportar dados e ser protegido;
- Acesso priorizado a canais;
- Uma variedade de novas opções de modulação, codificação e faixas de frequência na camada física, para suportar uma ampla variedade de aplicações específicas, como:
  - Identificação por radiofrequência (*radio frequency identification*, RFID);
  - Redes inteligentes de utilidades (redes SUN);
  - Operação na faixa branca de televisão (*television white space*, TVWS);
  - Monitoramento de infraestrutura crítica com baixo consumo de energia (*low-energy critical infrastructure monitoring*, LECIM);
  - Comunicações e controle ferroviários (*rail communications and control*, RCC).

Em 2020 [18] foi lançada a mais recente versão base da norma, denominada IEEE 802.15.4-2020, que tem como objetivo corrigir erros, inconsistências e ambiguidades de versões anteriores, além de incorporar sete emendas já existentes e completas (802.15.4n, 802.15.4q, 802.15.4s, 802.15.4t, 802.15.4u, 802.15.4v e 802.15.4x). Duas camadas físicas e uma nova camada MAC foram adicionadas, com retificações e esclarecimentos. Os recursos adicionados pelas alterações incluem novas opções de modulação, codificação e faixas de frequência na camada física para oferecer suporte a uma ampla variedade de aplicações e necessidades, incluindo alterações nas modulações das redes SUN, a faixa de frequência médica da China (*china medical band*, CMB) e as modulações *Ternary Amplitude Shift Keying* (TASK) e *Rate Switch - Gaussian Frequency Shift Keying* (RS-GFSK). Já um dos aprimoramentos na camada MAC é um recurso de medição da qualidade das faixas de frequências em uso, além de definição de métricas de desempenho, tais como taxa de erro de entrega de pacotes e atraso na entrega de pacotes.

Outros avanços para o padrão IEEE 802.15.4 vêm sendo desenvolvidos pelos grupos de tarefa TG4w, TG4y e TG4z, que devem implementar, respectivamente, as futuras emendas que atualmente estão num estágio inicial, ou seja, de esboço. O TG4w está desenvolvendo o 802.15.4w, que trata da definição de uma LPWAN, sendo uma extensão da camada física LECIM (já definida em emenda do padrão). O TG4y, por sua vez, é responsável pelo 802.15.4y, que definirá extensões de segurança ao padrão 802.15.4, adicionando suporte ao padrão de criptografia *Advanced Encryption Standard - 256 bits - Counter with Cipher block chaining Message authentication code* (AES-256-CCM), além de um método de registro de autenticação e a inclusão de novos algoritmos de segurança. Finalmente, o TG4z é responsável pelo desenvolvimento de novas camadas físicas que aumentem a capacidade de dispositivos que utilizam a UWB para transmissão de dados, utilizando técnicas como o *Enhanced High Rate pulse* (HRP) e o *Low Rate Pulse* (LRP). A camada de acesso ao meio também sofrerá modificações para se adequar às mudanças na camada física propostas por esta emenda.

#### **4.1 Novas definições de camada física da emenda IEEE 802.15.4g**

A emenda IEEE 802.15.4g, que foi consolidada no padrão IEEE 802.15.4-2015, especifica camadas físicas alternativas, além das existentes no padrão IEEE 802.15.4-2011. Além disso, a emenda também define modificações na camada de enlace necessárias para apoiar a implementação delas. As novas camadas físicas dão suporte principalmente à implementação de redes sem fio inteligentes de utilidades em ambientes externos para medição inteligente (redes SUN), com baixa taxa de transferência de dados, em vários domínios regulatórios.

As novas camadas físicas para redes SUN são as seguintes:

- SUN-FSK - Chaveamento por deslocamento de frequência (*frequency shift keying*, FSK);
- SUN-OFDM - Multiplexação por divisão de frequência ortogonal (*orthogonal frequency division multiplexing*, OFDM);
- SUN-O-QPSK - Chaveamento por deslocamento de fase em quadratura (*offset quadrature phase-shift keying*, O-QPSK).

As camadas físicas das redes SUN suportam múltiplas taxas de transferência de dados em bandas de frequência que variam de 169 MHz a 2450 MHz. As três novas definições de camada física para redes SUN são detalhadas a seguir.

## 4.2 SUN-FSK

A modulação SUN-FSK tem duas vantagens principais: a primeira é a boa eficiência energética, devido ao envelope constante do sinal e a baixa complexidade de implementação, a segunda é a compatibilidade com sistemas legados [31]. Por exemplo, a maioria dos sistemas implantados para medição inteligente nos Estados Unidos é baseada em esquemas de modulação FSK, principalmente aqueles que usam a faixa de frequência de 902 a 928 MHz [32].

O SUN-FSK pode ser usado em várias faixas de frequência, o que o torna adequado para diferentes regiões. Três modos de operação diferentes são definidos para cada faixa de frequência. O modo de operação define parâmetros de modulação e canal, como o tipo de modulação (BFSK ou 4FSK), o espaçamento do canal e o índice de modulação.

A unidade de dados de serviço na camada física (*physical service data unit*, PSDU) pode ser opcionalmente processada por um codificador de correção antecipada de erros (*forward error correction*, FEC). Dois tipos de FEC podem ser aplicados: um código recursivo e sistemático (*recursive and systematic code*, RSC) ou um código não-recursivo e não sistemático (*non-recursive and non-systematic code*, NRNSC). O FEC deve ser empregado no cabeçalho da camada física (*physical header*, PHR) e nos bits do PSDU. A intercalação deve ser empregada em conjunto com a codificação NRNSC e também pode ser empregada com a codificação RSC [30].

A unidade de dados de protocolo da camada física (*physical protocol data unit*, PPDU) do SUN-FSK é composta por um cabeçalho de sincronização (*synchronization header*, SHR), com um preâmbulo e um delimitador de início de quadro (*start of frame delimiter*, SFD), um PHR de 16 bits e uma carga útil de até 2047 bytes. No PHR, é definido o comprimento da sequência de verificação de quadros (*frame check sequence*, FCS), assim como o comprimento do quadro. Há

um bit para indicar a ocorrência de uma alternância de modo, que é um mecanismo que permite alterar a taxa de símbolos ou o esquema de modulação usado pelos rádios [31].

### 4.3 SUN-OQPSK

A modulação OQPSK foi introduzida na primeira versão do padrão IEEE 802.15.4, em 2003, apenas para a faixa de 2,4 GHz e fornecendo uma taxa de bits de 250 kbps. No IEEE 802.15.4g, outros modos de uso foram definidos, permitindo o uso da modulação OQPSK também em outras faixas de frequência e para taxas de bits variando de 6,25 a 500 kbps. O SUN-OQPSK emprega o DSSS, que permite uma melhor resistência à interferência. Para algumas faixas, é possível usar um modo alternativo, chamado DSSS multiplexado (*multiplexed direct sequence spread spectrum*, MDSSS) [30].

O PPDU do quadro SUN-OQPSK é composto por um SHR, um PHR e a carga útil PHY (PSDU). A taxa de símbolos é definida como a taxa de bits do SHR [30]. Quatro modos de uso, com diferentes taxas de bit, são suportados para cada faixa de frequência, mas apenas o Modo 0 é obrigatório.

O uso do FEC é obrigatório para o campo PHR. Ao usar DSSS como modo de espalhamento, o FEC também deve ser aplicado aos bits do PSDU, com uma codificação convolucional. Para o modo de propagação definido como MDSSS, o FEC é opcional. A intercalação deve ser empregada em conjunto com o FEC, para melhorar a robustez contra erros de intermitência e interromper a correlação de bits consecutivos [30].

### 4.4 SUN-OFDM

O SUN-OFDM foi definido pela primeira vez na emenda IEEE 802.15.4g e depois incorporado no IEEE 802.15.4-2015. Foi definido para fornecer altas taxas de dados e longo alcance, enquanto lida com problemas de interferência e atenuação por multipercursos [33]. Diferente do FSK e O-QPSK, o OFDM não vinha sendo amplamente utilizado para comunicações sem fio de baixa potência até recentemente, devido aos rigorosos requisitos de processamento, memória e consumo de energia [34]. O SUN-OFDM pode ser usado em diferentes faixas de frequência (sub-GHz e 2,4 GHz) e, no padrão IEEE 802.15.4-2015, foram definidas configurações que oferecem taxas de bit entre 50 kbps e 800 kbps. O espaçamento da subportadora é constante e igual a  $10416 \cdot 2/3$  Hz, enquanto a taxa de símbolos é igual a  $8 \cdot 1/3$  ksymbol/s (um período de símbolo de  $120 \mu$  s) [34]. No padrão IEEE 802.15.4-2020, foram definidas novas configurações que oferecem taxas de bit entre 12,5 kbps e 2.400 kbps [18].

Quatro opções de uso diferentes são definidas para o SUN-OFDM, cada uma com um número diferente de tons ativos. Para cada opção, um conjunto de esquemas de modulação e codificação (*modulation coding scheme*, MCS), numerados de 0 a 6, podem ser usados. Se um dispositivo suportar uma determinada opção, ele deverá suportar todas as modulações BPSK e QPSK e todos os MCS para essa opção. O suporte à modulação de amplitude em quadratura (*quadrature amplitude modulation*, QAM) é opcional [30].

O MCS determina o esquema usado para modular as subportadoras (BPSK, QPSK ou 16-QAM), se a repetição de frequência é aplicada (ou seja, 4x, 2x ou sem repetição de frequência) e a taxa de codificação FEC (1/2 ou 3/4). Assim, a taxa de dados efetiva depende do MCS usado. Por exemplo, para a Opção 2, que usa 52 tons ativos, a taxa de dados efetiva pode variar de 50 kbps, ao usar BPSK, uma taxa de codificação de 1/2 e repetição de frequência 4x, a 1.200 kbps, ao usar o 16-QAM, com uma taxa de codificação de 1/2 e sem repetição de frequência.

O PPDU do SUN-OFDM é composto por um SHR, um PHR e a carga útil. O SHR possui um preâmbulo e o PHR contém as informações sobre a configuração usada para transmitir a carga útil. O SHR e o PHR são transmitidos usando o MCS mais baixo suportado para a opção que está sendo usada. O comprimento máximo da carga útil é de 2047 bytes, o que permite transmitir um pacote IPv6 completo sem fragmentação [34].

## 4.5 Novas definições de camada de enlace da emenda IEEE 802.15.4e

Em 2008, o IEEE criou o grupo de trabalho 802.15 TG4e com o objetivo de redesenhar a camada de enlace do protocolo IEEE 802.15.4 existente, a fim de superar suas limitações. O objetivo era definir uma camada de enlace de baixa potência com saltos múltiplos, capaz de atender às necessidades emergentes de aplicações industriais. O resultado final foi o IEEE 802.15.4e, aprovado em 2012, que é baseado em muitas ideias dos padrões existentes para aplicações industriais (ou seja, WirelessHART e ISA100.11a), incluindo janelas de acesso (compartilhadas ou dedicadas), comunicação multicanal e salto em frequência. Especificamente, o IEEE 802.15.4e estende o padrão 802.15.4 anterior, introduzindo novos modos de comportamento na camada de enlace, projetados para suportar domínios de aplicações específicos, além de aprimoramentos funcionais gerais. A seguir é apresentada uma descrição mais detalhada sobre os aprimoramentos funcionais gerais e os modos de comportamento da camada de enlace, com base no trabalho de Guglielmo et.al [35].

### 4.5.1 Aprimoramentos funcionais gerais

O padrão IEEE 802.15.4e define seis aprimoramentos funcionais gerais, que são listados a seguir.

- Modo de baixa energia (*low energy*, LE): mecanismo destinado a aplicações que podem trocar latência por eficiência energética. Permite que um nó opere em um ciclo de trabalho muito baixo (por exemplo, 1% ou menos), enquanto parece estar sempre ativo para as camadas superiores. Esse mecanismo é importante para o paradigma da Internet das Coisas, em que os protocolos da Internet foram projetados assumindo que os nós estão sempre ativos;
- Elementos de informação (*information elements*, IE): mecanismo extensível para trocar informações em uma subcamada de enlace;
- Pacotes sinalizadores aprimorados (*enhanced beacons*, EB): extensão dos quadros de *beacons* do padrão IEEE 802.15.4 que fornecem uma maior flexibilidade. Eles permitem criar quadros específicos de aplicações, incluindo elementos de informação relevantes;
- Quadros multi-uso (*multipurpose frame*, MF): mecanismo que fornece um quadro com formato flexível que pode endereçar várias operações da camada de enlace baseado em elementos de informação;
- Métrica de desempenho da camada de enlace (*medium access control performance metric*, MAC-PM): mecanismo para fornecer *feedback* apropriado sobre a qualidade do canal para a rede e camadas superiores, buscando tomar decisões mais apropriadas. Por exemplo, o protocolo IP pode implementar fragmentação dinâmica de datagramas, dependendo das condições do canal;
- Associação Rápida (*fast association*, FastA): procedimento que permite que um nó se associe em um tempo reduzido para aplicações críticas, em que a latência tem prioridade sobre a eficiência energética.

### 4.5.2 Modos de comportamento da camada de enlace

O padrão IEEE 802.15.4e define cinco novos modos de comportamento MAC, que são listados a seguir.

- Salto de canal sincronizado com o tempo (TSCH): destina-se a domínios de aplicação como automação industrial e controle de processos. Esse modo fornece suporte para comunicações utilizando múltiplos canais e acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA);

- Extensão multicanal determinística e síncrona (DSME): destina-se a aplicações industriais e comerciais com requisitos rigorosos em termos de latência e confiabilidade. Para esse fim, combina acesso ao meio baseado em contenção e divisão de tempo e oferece dois modos diferentes de diversidade de canais (adaptação de canal e o salto de canal). Ele é projetado especificamente para redes em malha com múltiplos saltos;
- Rede determinística de baixa latência (*low latency deterministic network*, LLDN): projetado para redes de salto único e canal único, destina-se à automação de fábricas e indústrias, onde as aplicações exigem latência muito baixa ( $\leq 10$  ms);
- Adaptação multicanal assíncrona (*asynchronous multi-channel adaptation*, AMCA). É focada em aplicações em que grandes implantações são necessárias, como redes de utilidades inteligentes, redes de monitoramento de infraestrutura e redes de controle de processos. Nessas redes, utilizar um canal comum e único de comunicação pode não permitir a conexão de todos os nós na mesma rede PAN. Além disso, a variação da qualidade do canal é geralmente grande e a assimetria de enlace pode ocorrer entre dois nós vizinhos. O modo AMCA depende de adaptação multicanal assíncrona e pode ser usado somente em PANs não habilitadas para uso de *beacons*. Em uma rede AMCA, cada dispositivo seleciona o canal com a melhor qualidade como canal de escuta e começa a escutar nessa frequência. No momento em que dois nós precisam trocar pacotes, o dispositivo emissor muda para o canal de escuta designado do dispositivo receptor.
- Sinalizador de identificação por radiofrequência (*radio frequency identification blink*, BLINK). Destina-se a aplicações para identificação de itens ou pessoas, localização e rastreamento. Especificamente, ele permite que um nó comunique sua identificação (ID) para outros nós, sem associação prévia e sem reconhecimento. Pacotes BLINK geralmente são enviados para os dispositivos, usando o protocolo *ALOHA*.

#### 4.5.3 Resultados experimentais da implantação de redes IEEE 802.15.4g

Em [36] é descrita uma solução geral adotando o padrão de especificação de mensagem de linha de distribuição / especificação complementar para medição de energia (*distribution line message specification / companion specification for energy metering*, DLMS/COSEM) para desenvolvimento de aplicações de medição para rede elétrica inteligente (*smart grid*, SG). O transceptor utilizado na solução é o Microchip AT86RF215, compatível com os padrões IEEE 802.15.4-2011 e IEEE 802.15.4g-2012, operando em bandas de frequência sub-GHz e 2,4 GHz, com uma potência máxima

de transmissão de 14 dBm e sensibilidade de até -123 dBm. Foram utilizadas antenas omnidirecionais com ganho de 2 dBi para a banda de 915 MHz. Os transceptores foram configurados para operar no canal 7 da banda de 915 MHz com o esquema de modulação O-QPSK e com taxa de transmissão de dados de 250 kbps. A potência de transmissão foi definida em 14 dBm e a sensibilidade do RF215, para este esquema de modulação, é de -102 dBm.

Os testes experimentais foram conduzidos durante 20 dias, observando-se que a taxa de perda de pacote aumenta drasticamente de acordo com o aumento do número de saltos entre os nós, variando entre um valor baixo, próximo de 0%, quando a transmissão utiliza apenas 1 salto, até um valor alto, em torno de 90%, quando a transmissão realiza mais de 4 saltos para atingir o nó destino. Mesmo nesse último caso, com uma alta taxa de perda de pacote, a taxa média de falhas das sessões DLMS foi de apenas 0,25% (utilizando o protocolo TCP), e 0,47% (utilizando o protocolo UDP). Também foi observada a influência dos materiais armazenados no armazém no tempo total de transmissão (*round-trip time*, RTT), durante o período de teste. De maneira geral, o RTT foi baixo, e aumentou em torno de 15 ms a cada novo salto.

uma placa de rádio ATREB215-XPRO-A, que possui um chip de rádio AT86RF215 e é equipada com dois conectores coaxiais de rádio frequência de semi-precisão SMA (*subminiature version A*) conectados a antenas com ganho de 2 dBi. Também possui um módulo GPS (*Global Positioning System*) da Adafruit (Ultimate GPS), construído com chip MTK3339 e com um conector uFL externo para conexão de uma antena GPS. Por meio de um barramento de interface periférica serial (*serial peripheral interface*, SPI), o Raspberry Pi pode acionar a placa de rádio, modificando suas configurações a cada teste a ser realizado e também pode receber o horário de *greenwich* (*greenwich mean time*, GMT) e a posição geográfica, através do módulo GPS.

Foi possível observar que os enlaces de rádio com maior alcance foram obtidos utilizando as modulações FSK-FEC e O-QPSK. Esse comportamento era esperado, pois essas configurações de camada física possuem a maior sensibilidade entre todas as disponíveis, fornecendo até 141 dB de *link budget*.

Já as configurações que usam OFDM são mais robustas contra interferências e efeitos de atenuação por multipercursos. O OFDM1-100 MCS0 usa 104 sub-portadoras com 4 repetições de frequência e oferece taxa de bits de 100 kbps, proporcionando um alto nível de robustez. O OFDM2-50 MCS0 tem a mesma característica de 4 repetições de frequência, mas utiliza apenas metade das subportadoras, oferecendo conseqüentemente a metade da taxa de bits (50 kbps). Cada canal OFDM Opção 1 ocupa 1,2 MHz e as 4 subportadoras iguais são separadas pela mesma distância em frequência. Mesmo se 3 subportadoras forem comprometidas durante a transmissão de um símbolo no caminho, o receptor ainda pode recuperar as informações. Apesar dessa robustez,

a taxa de entrega de pacote (*packet delivery ratio*, PDR) para esta configuração foi de 31% para pacotes curtos e de apenas 5% para pacotes longos, considerando uma distância de 700 m. Para o OFDM2-100, o PDR aumentou para 92% e 47%, respectivamente. Essa configuração de camada física possui sensibilidade 2 dB maior em relação ao OFDM1-100.

A razão pela qual as configurações que usam OFDM não conseguem comunicações a longa distâncias é que elas apresentam uma menor sensibilidade e uma potência de transmissão menor (11 dBm para o OFDM e 14 dBm para FSK e O-QPSK). Esses valores de sensibilidade e potência máxima de transmissão são diretamente dependentes do hardware e pode variar dependendo do fabricante.

Em [37], inicialmente uma visão geral dos diferentes protocolos para redes LPWAN foi elaborada, incluindo uma discussão sobre o uso dessas tecnologias para aplicações de monitoramento em ambientes industriais. Na segunda parte do estudo, foram apresentados resultados de um experimento para avaliação de uma aplicação de monitoramento industrial com duração de várias semanas, com foco em três tecnologias LPWAN: LoRa<sup>®</sup>, IEEE 802.15.4g e um esquema de comunicação de banda estreita proprietário (modo de longo alcance implementado no transceptor TI CC1310). A avaliação mostrou que não há um protocolo único que supere todos os outros protocolos em termos de todas as métricas de avaliação (confiabilidade, alcance, energia) consideradas no estudo.

LoRa<sup>®</sup> fornece o maior alcance de comunicação de todos os três protocolos. No entanto, o consumo de energia de LoRa<sup>®</sup> é uma ordem de magnitude maior que a do padrão IEEE 802.15.4g (com modulação 2-FSK), que fornece um *link budget* menor, ou seja, o gasto final de potência de enlace necessário para envio de um pacote de rádio é 80 vezes menor, quando utilizado o protocolo IEEE 802.15.4g em comparação com os outros protocolos do teste. Assim para a escolha de um protocolo LPWAN adequado é necessário analisar quais os requisitos concorrentes da aplicação (alcance de comunicação, consumo de energia, capacidade de rede).

Nos experimentos descritos por em [38], foram utilizados nós sensores da plataforma Zolertia, equipados com antenas omnidirecionais com ganho de 2 dBi. Os nós sensores são baseados no microcontrolador ARM Cortex-M3 (*system on chip*, SoC), e executam o sistema operacional Contiki. Para a comunicação sem fio, foi utilizada uma interface de rádio baseada no transceptor CC1120, da Texas Instruments, configurada para operar na banda de 863-950 MHz. Durante os experimentos, foi selecionada uma configuração do padrão IEEE 802.15.4g, mais especificamente a que opera na banda de 868 MHz, com modulação 2-GFSK e possui 33 canais disponíveis. Nesta configuração, a taxa de bits é de 50 kbps. A potência de transmissão selecionada foi o valor padrão definido no driver do CC1200 no Contiki, que é a potência máxima de transmissão permitida

(14 dBm).

As medições mostraram que o alcance da comunicação depende fortemente dos ambientes onde os nós estão instalados. Por exemplo, a presença de edifícios, árvores e outros objetos podem atenuar significativamente ou impedir a propagação do sinal. Especificamente, descobriram que o alcance de comunicação é de aproximadamente 800 m em uma área rural, 250 m em um ambiente semi-rural, e cerca de 150 m em um ambiente urbano. Embora esses resultados dependam das condições específicas dos experimentos e não permitem obter conclusões mais gerais, os valores medidos mostram um limitado alcance da comunicação, especialmente no meio urbano. Mesmo no meio rural, o alcance da comunicação foi inferior a 1 km. Portanto, quando as distâncias são maiores do que os intervalos medidos, a comunicação direta não é suficiente e redes com múltiplo saltos podem ser necessárias.

Em [34] é descrita uma avaliação experimental pra comparar a robustez contra interferência das camadas físicas OQPSK-DSSS (IEEE 802.15.4-2003) e SUN-OFDM (IEEE 802.15.4-2015). Condições de interferência foram geradas em uma configuração controlada para avaliar a relação sinal-ruído (*signal-to-interference ratio*, SIR), exigida por cada modulação, de modo a atingir um PDR > 80%.

Foram utilizados três dispositivos OpenMote-B, um atuando como transmissor, outro como receptor e o terceiro como interferente. O OpenMote-B é equipado com um chip Texas Instruments CC2538 (SoC) e um transceptor de rádio Microchip AT86RF215. Para coordenar as ações entre os diferentes dispositivos, um computador executando o Ubuntu 18.04 LTS foi conectado às placas OpenMote-B via USB e executou um script Python que orquestrou todo o experimento.

Os resultados mostram que o SUN-OFDM fornece pelo menos 6 dB de proteção adicional, em relação ao OQPSK-DSSS, independentemente do tipo de interferência e do comprimento do pacote. Além disso, o SUN-OFDM ocupa apenas 1,2 MHz de largura de banda, enquanto o OQPSK-DSSS ocupa 5 MHz.

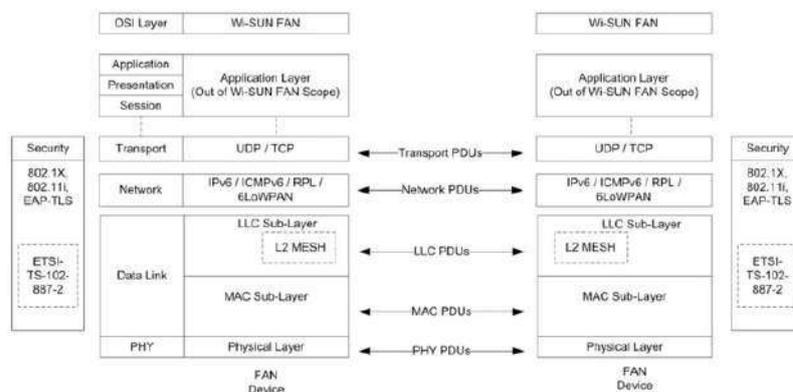


Figura 5: Arquitetura da rede Wi-SUN [39] FAN no modelo de camadas OSI.

## 5 Metodologias e resultados específicos

Nesta seção estão localizadas as metodologias e resultados de todas as pesquisas anteriores que, de maneira agrupada, constituem este trabalho de conclusão de curso.

### 5.1 Desenvolvimento de algoritmo para aumento de confiabilidade em RSSF

#### 5.1.1 Metodologia

Durante a produção do projeto, foi realizado um conjunto de experimentos para testar e estudar a confiabilidade de uma rede Wi-SUN com topologia linear para estudar sua aplicabilidade e efetuar o estudo de níveis de potência que se tornem viáveis para o contorno de falhas em nós da rede e, com isso, verificar se a adaptação de potência é um meio viável de solução para o cenário avaliado.

Para o estudo foi montada uma rede Wi-SUN em ambiente externo, composta por 3 nós sensores e 1 nó Gateway no Campus I da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), implantados em postes de energia (nós sensores) e na sede da Superintendência de TI do Campus (Gateway). Os nós foram configurados para transmitir com o diferentes potências (entre 5 dBm e 14 dBm), com o objetivo de fornecer dados para os estudos. Os resultados mostraram que a adaptação da potência pode ser um meio de ser utilizado para a recuperação de falhas a fim de se aumentar a confiabilidade de redes Wi-SUN com topologia linear.

Redes que utilizam topologia linear funcionam de forma a ligar dispositivos/sensores em série, dessa forma, se um dos nós deseja se comunicar com uma outra parte da rede; a mensagem é repassada nó a nó até chegar ao destino [40]. Esta técnica é geralmente utilizada quando as distâncias físicas a serem cobertas pelos nós são demasiado grandes e há impossibilidade de comunicações diretas. Um exemplo de uso é no monitoramento de linhas de transmissão de energia elétrica [41].

Quanto ao cenário do experimento e seus equipamentos: O cenário de realização do experimento, conforme Figura 6, foi o Campus I da UFPB. Os experimentos consistiram na implementação de uma rede IEEE 802.15.4g/Wi-SUN com topologia linear, composta de quatro Nós, sendo três Nós sensores e um gateway. Os Nós sensores foram instalados em postes de energia do Campus a altura aproximada de 3 metros. Já o gateway foi instalado na sede da Superintendência de TI. As distâncias entre os Nós podem ser vistas na Figura 6.

A execução dos experimentos se deu em duas etapas. Na primeira foram coletados dados por aproximadamente 7 horas de observações. Já na segunda, foram coletados dados por 21 horas.



Figura 6: Ambiente de realização dos experimentos

Os hardwares utilizados na construção dos Nós da rede e do gateway, cuja finalidade é a de encaminhar os pacotes recebidos para serem gravados no banco de dados, consistiram de uma placa SimpleLink Sub-GHz CC1310, a qual possui um transceptor que opera na banda Sub-GHz e foi programado para usar modulação 2GFSK, com frequência de 868 MHz e taxa de bits de 50 kbps, um mini computador de placa única Raspberry Pi, para salvar informações sobre pacotes recebidos em cada nó, e de uma bateria de 10.000 mAh. A exceção coube apenas ao Nó 3, no qual não foi utilizado o mini computador, uma vez que ele não recebia pacotes, apenas transmitia. Detalhes dos componentes de hardware podem ser encontrados a seguir:

- SimpleLink Sub-GHz CC1310: É um kit de desenvolvimento fabricado pela Texas Instruments que oferece conectividade de longo alcance, opera na banda Sub-GHz e possui um processador ARM Cortex M3 de 32 bits. É destinado a aplicações que exigem baixo consumo de energia e longo alcance de comunicação. Permite, entre outras coisas, ajustar por software a potência de transmissão. Além disso, o kit implementa a pilha TI-15.4 e adota arquitetura idêntica à Wi-SUN FAN V1.0
- Raspberry Pi 3: A Raspberry possui uma distribuição Linux e também o código construído para o envio das informações a serem armazenadas no banco de dados (no caso do gateway)

ou para salvamento em arquivo (no caso dos nós finais).

A montagem final do hardware pode ser observada na Figura 7.



Figura 7: Hardware montado

Foram também utilizados softwares que serviram para programação dos transceptores (plataforma SimpleLink da Texas), scripts de coleta dos dados (escritos em Python), bem como para a construção de um banco de dados, usando o sistema gerenciador de bancos de dados de séries temporais InfluxDB. Os Nós 1, 2 e 3 foram configurados para gerar um novo pacote a cada 30 segundos. Na aplicação implementada, cada pacote é transmitido múltiplas vezes, com potências de 5 dBm, 8 dBm, 11 dBm e 14 dBm. O valor da potência usada na transmissão de uma réplica do pacote é armazenado no payload e essa informação também é gravada no arquivo de registro (no caso da recepção por nós intermediários) e no banco de dados (no caso da recepção pelo gateway). Os valores gravados no banco de dados e nos arquivos de cada Nó foram de RSSI, destino final do pacote, origem do pacote, número de sequência e potência de transmissão. Por meio dos valores gravados e conhecendo-se previamente os valores transmitidos, como quantidades de pacotes em uma determinada potência, por exemplo, foi possível fazer os diversos cálculos apresentados, tais como taxa de entrega de pacote e RSSI médio.

### 5.1.2 Resultados

As figuras 8 e 9 mostram respectivamente a taxa de entrega de pacotes e os níveis de RSSI médios por cada par transmissor-receptor e potência empregados. Pode-se observar pelas figuras que o Nó 3 tem grandes dificuldades em se comunicar com o gateway diretamente, pois está localizado a uma distância de 170 m. Nas potências de 5 dbm e 8 dbm, a Taxa de Entrega de Pacote (PDR) fica em 0%, conforme Figura 8. Mesmo aumentando-se a potência para o máximo, o melhor valor de

PDR foi em torno de 11%. O RSSI, para este nó, indica uma baixa qualidade do enlace, conforme pode ser visto na Figura 9. Assim, no cenário e na topologia considerados, pode-se concluir que estando o nó a uma distância de 170 m, é possível sobrepor os Nós 2 e 1 utilizando a potência de 14 dBm, mas com qualidade muito baixa. Por outro lado, o Nó 2, mesmo estando a 124 m do gateway, já consegue se comunicar com este diretamente na potência de 5 dbm, sobrepondo o Nó 1.

Observando as figuras, é possível notar a tendência de melhora da qualidade da comunicação quando se aumenta a potência. O Nó 1, estando mais próximo do gateway, obteve bons resultados, conforme pode ser observado nos gráficos. Observa-se que as comunicações diretas entre o nó

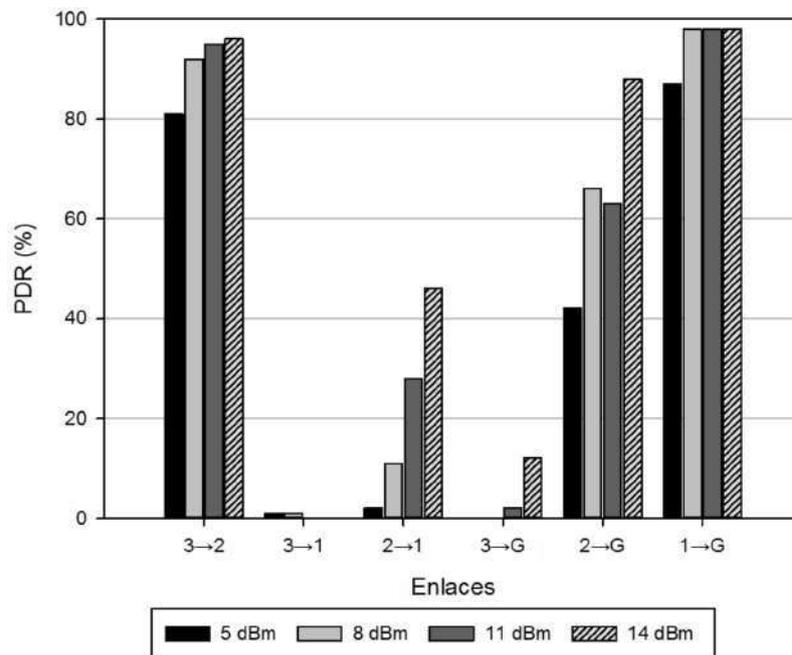


Figura 8: Valores médios de PDR para cada enlace

3 e Gateway, que sobrepõe o nó 2 e o nó 1, foram de qualidade melhor que as comunicações diretas entre o nó 3 e o nó 1. É possível notar também que as comunicações entre o nó 2 e o Gateway foram melhores do que as comunicações diretas entre o nó 2 e o nó 1. Entende-se que esse acontecimento se deu por causa dos obstáculos existentes entre o nó 2 e o nó 1, como uma lanchonete com telhado metálico, canos de ferro no poste onde foi instalado o nó 1, possíveis interferências externas e, naturalmente, os posicionamentos de todos os nós, incluindo a altura de instalação dos mesmos. Na contra mão desse inesperado acontecimento, pôde-se observar que mesmo com as comunicações do nó 3 e nó 2 com o nó 1 prejudicadas, as comunicações daqueles nós (nó 3 e nó 2) com o Gateway aconteceram, sobrepondo os nós intermediários.

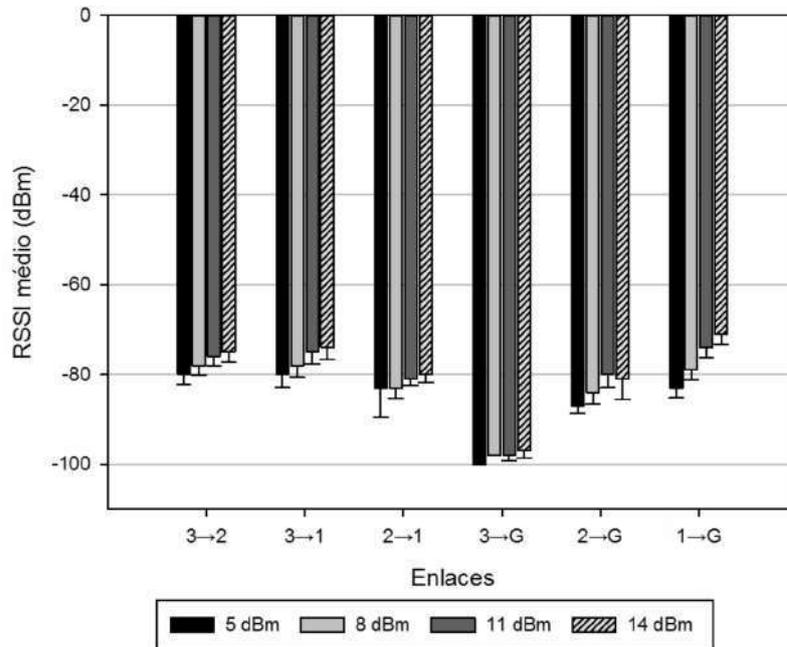


Figura 9: Valores médios de RSSI para cada enlace

Tabela 3: Valores de RSSI médios e Desvio Padrão( $\sigma$ ).

Enlace / potência	5 dBm	$\sigma$	8 dBm	$\sigma$	11 dBm	$\sigma$	14 dBm	$\sigma$
3>2	-80	2,26	-78	2,13	-76	2,16	-75	2,22
3>1	-80	2,86	-78	2,63	-75	2,70	-74	2,69
2>1	-83	6,58	-83	2,44	-81	1,53	-80	1,80
3>G	-	-	-98	0,00	-98	1,26	-97	1,58
2>G	-87	1,63	-84	2,65	-80	2,91	-81	4,58
1>G	-83	2,21	-79	2,20	-74	2,24	-71	2,25

## 5.2 Desenvolvimento de protótipo e análise de rede Wi-SUN

### 5.2.1 Metodologia

Durante o projeto foi realizado um estudo detalhado sobre o padrão IEEE 802.15.4-2015/Wi-SUN, de modo a comparar as opções de implementação da rede sem fio e qual se adéqua melhor ao sistema proposto, com base nos requisitos da aplicação e nas características dos ambientes de implantação. Também foi feito um levantamento sobre as possibilidades de coleta de dados de consumo de energia, seja por meio da implantação de sensores de tensão e corrente ou por meio da coleta de dados a partir de sensores já existentes nos locais.

Após os estudos e levantamentos iniciais, fora desenvolvido um protótipo de um sistema embarcado, para posterior integração na rede de sensores sem fio. Para a construção deste protótipo foi utilizado a plataforma Tiva-C da Texas Instruments que conta com o microcontrolador TM4C123GXL e contém um ARM Cortex-M3 embutido em conjunto com o transceptor AT86RF215 da Microchip que implementa o padrão IEEE 802.15.4-2015/Wi-SUN. O protótipo

conta também com o conversor analógico-digital ADS8556EVM da Texas Instruments que é utilizado para a coleta de dados sobre o consumo de energia na rede elétrica.

A Figura 10 mostra o diagrama de blocos do sistema embarcado projetado neste projeto. Foi incluído nessa arquitetura também um *single-board computer* (Raspberry Pi) para coletar informações de log do sistema embarcado durante a fase de testes, de modo a permitir avaliar o desempenho do sistema e da rede sem fio nos experimentos iniciais, bem como salvar dados brutos de tensão e corrente para posterior análise offline.

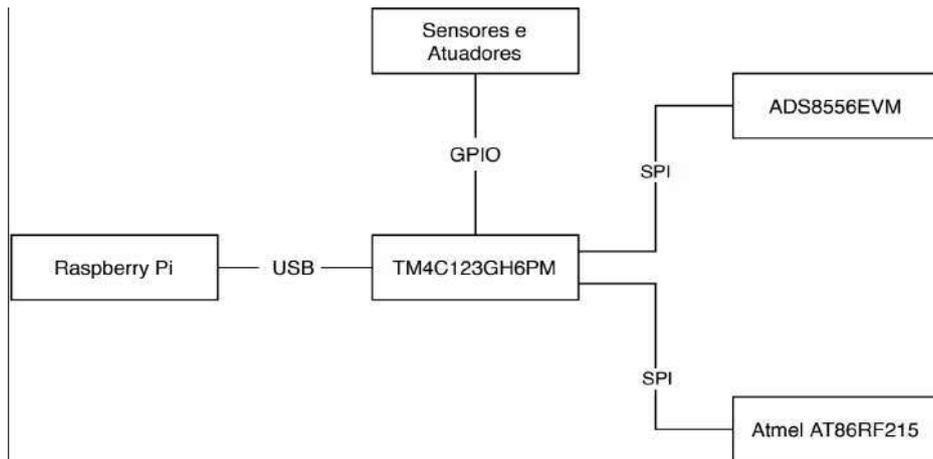


Figura 10: Diagrama de blocos do Sistema Embarcado

Também foi construído um software embarcado para gerir o hardware do protótipo. A Figura 11 mostra o diagrama hierárquico do software embarcado projetado neste projeto.

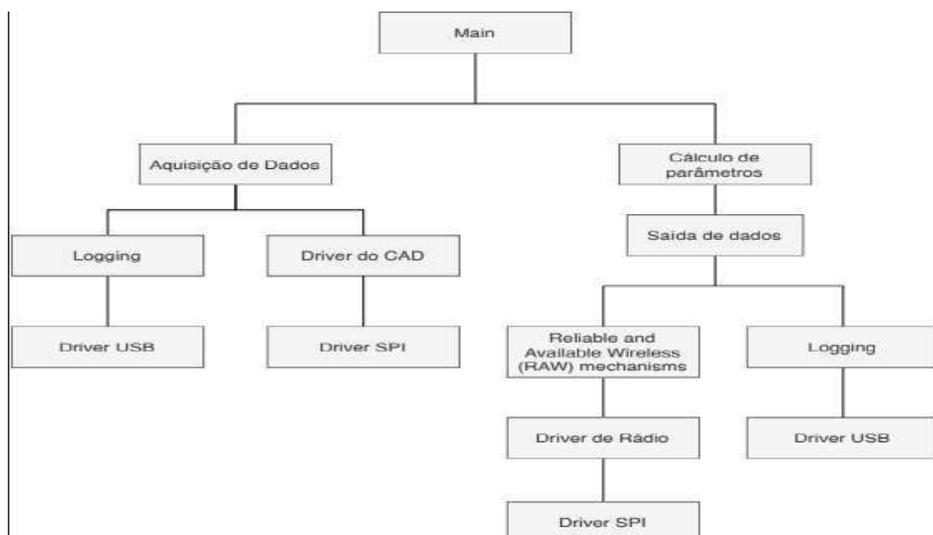


Figura 11: Diagrama hierárquico do software embarcado

### 5.2.2 Resultados

O software embarcado foi construído ao longo do projeto para que fosse possível integrar todos os componentes propostos de forma harmônica para que o sistema funcionasse corretamente de forma a construir *drivers* para que fosse possível comunicar o Tiva-C com os demais hardwares escolhidos para compor o sistema. O desenvolvimento do *driver* do rádio foi concluído com sucesso e foi realizado um teste de integração com a plataforma OpenMote, que foi usada para a construção de gateways no protótipo inicial do sistema. A Figura 12 mostra uma imagem do protótipo desenvolvido para validação do *driver* do rádio.

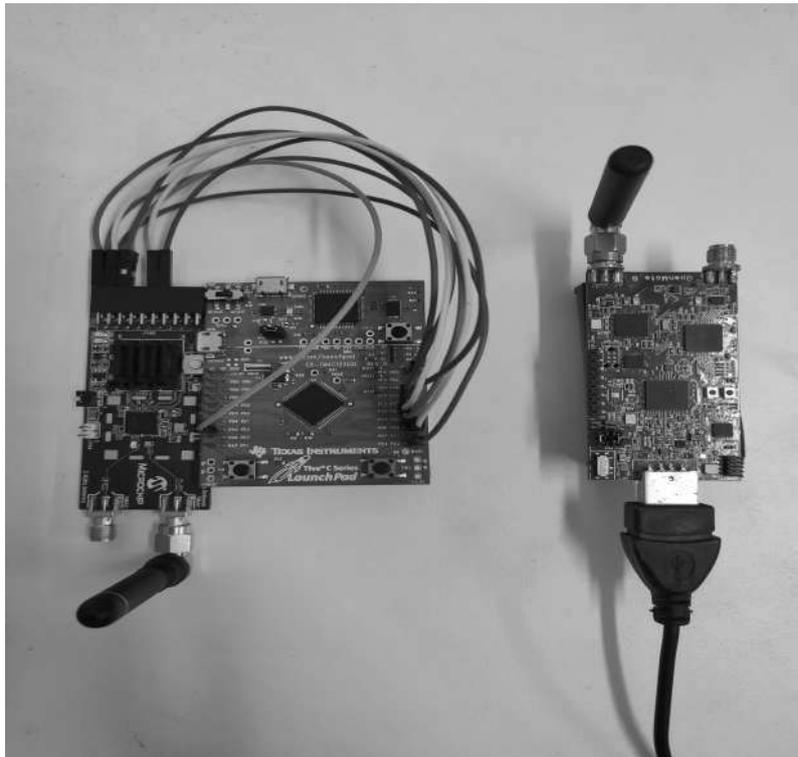


Figura 12: Placa do TIVA C ligada ao módulo de rádio e se comunicando com a placa OpenMote (do lado direito).

O protótipo teve seu software construído de forma que implementou toda a parte de comunicação com rede sem fio prevista por meio do *driver*, que utiliza comunicação SPI para realizar a interação entre os dispositivos existentes no sistema.

Não foi possível concluir a parte de integração com o conversor analógico-digital, dado que durante seu estudo foram identificados problemas com a fonte de energia, que impossibilitou a continuação do trabalho dentro do tempo de duração do projeto.

## 6 Conclusões

Este trabalho tem por objetivo explorar técnicas não abarcadas diretamente pelo padrão IEEE 802.15.4 a fim de alcançar uma possível melhoria na comunicação entre sensores em uma rede sem fio e também de criar um dispositivo protótipo que implementasse a pilha do protocolo IEEE 802.15.4 para uso futuro.

Através do primeiro experimento apresentado pôde-se constatar uma melhora ao utilizar o aumento de potência de transmissão por pacote e a retransmissão através de topologia de rede linear. Por este experimento ter ocorrido em ambiente real, não há como inferir tudo que ocorrera após analisar os dados, no entanto resultados positivos foram observados.

Já o segundo experimento – utilizando o protótipo, mostrou-se bastante positivo. O mesmo conseguiu estabelecer comunicação com o OpenMote-B e trocar pacotes de dados utilizando a pilha Wi-SUN provendo então a possibilidade da criação de novos dispositivos.

Os resultados observados nesse trabalho podem vir a ser utilizados como parâmetro para a adição de novas técnicas ao padrão IEEE 802.15.4 e também como maneira de produzir novos dispositivos de custos mais baixos.

Além disso, de modo a auxiliar outros pesquisadores, é fornecido um apêndice que explica como implementar Redes IEEE 802.15.4g utilizando a plataforma OpenMote-B.

Também como resultados deste trabalho, foram publicados e apresentados os seguintes artigos:

- Artigo: Avaliação da Confiabilidade de uma Rede Wi-SUN com Topologia Linear para Aplicações de Cidades Inteligentes no XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais.
- Minicurso: Aspectos Teóricos e Práticos de Redes IEEE 802.15.4g/Wi-SUN no XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais.
- Artigo: Sistema para Monitoramento de Consumo de Energia e Análise de Falhas de Rede Elétrica baseado em Rede Wi-SUN no 4<sup>o</sup> Simpósio de Pesquisa, Inovação e Pós-graduação do IFPB.
- Artigo: Sistema para Monitoramento de Consumo de Energia e Análise de Falhas de Rede Elétrica baseado em Rede Wi-SUN na XI Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação.

# A Implementação de redes IEEE 802.15.4g usando a plataforma OpenMote-B

Este apêndice descreve como implementar uma rede IEEE 802.15.4g simples utilizando a plataforma OpenMote-B [42], [43], que é mostrada na Figura 13.

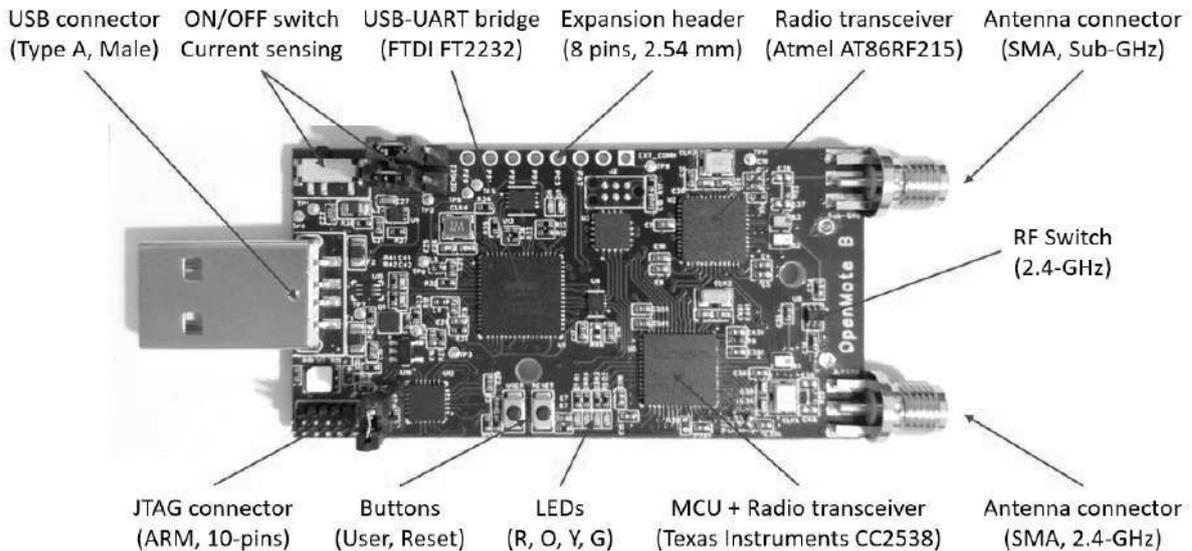


Figura 13: Placa do OpenMote-B [44].

A placa do OpenMote-B possui dimensões  $64 \times 33$  mm e é equipada com o *System on Chip* (SoC) CC2538 da Texas Instruments e um transceptor Microchip AT86RF215. O CC2538 [45] inclui um microcontrolador ARM Cortex-M3 (32 MHz, 32 kB RAM, 512 kB Flash) e um transceptor integrado compatível com o padrão IEEE 802.15.4-2006. O AT86RF215 [46] é um transceptor *dual-band* (sub-GHz e 2,4 GHz), compatível com o padrão IEEE 802.15.4-2015, que suporta as diversas opções de camada física definidas na emenda IEEE 802.15.4g-2012 (i.e., SUN-FSK, SUN-OQPSK, and SUN-OFDM). Por meio dessa plataforma e da base de código disponibilizada é possível implementar redes que usam as diferentes modulações definidas no IEEE 802.15.4g, bem como avaliar experimentalmente novas técnicas de diversidade propostas para esse tipo de rede.

Este tutorial apresenta uma aplicação simples, que pode ser usada como ponto de partida para a implementação de redes de sensores ou novos mecanismos e protocolos com base no padrão IEEE 802.15.4g. A aplicação descrita tem como objetivo realizar a comunicação entre dois dispositivos OpenMote-B. O primeiro realiza a função de enviar pacotes usando uma determinada modulação, frequência e largura de banda, que pode ser configurada no código, utilizando o transceptor AT86RF215. Pode-se ainda escolher se a comunicação ocorrerá na banda Sub-GHz ou na faixa de 2,4 GHz. O segundo dispositivo OpenMote-B recebe os pacotes e envia as informações relacionadas a eles pela porta USB.

No código de exemplo disponível no repositório, o rádio é configurado para se comunicar na banda Sub-GHz utilizando a modulação OFDM, com taxa de bits de 50 kbps e ocupando uma largura de banda de 800 kHz. No entanto, outras configurações de camada física podem ser usadas realizando poucas modificações no código.

## A.1 Instalação dos pacotes de software requeridos

O primeiro passo para a utilização do OpenMote-B e do código de exemplo é instalar o conjunto de ferramentas necessárias para compilar código C/C++ para o microcontrolador ARM Cortex-M3, que é a arquitetura do SoC CC2538 presente na plataforma. Para isso, é necessário instalar os pacotes *gcc-arm-none-eabi* e *binutils-arm-none-eabi*, por meio do seguinte comando no terminal<sup>4</sup>:

```
$ sudo apt install gcc-arm-none-eabi binutils-arm-none-eabi
```

Após a instalação desses pacotes, pode-se prosseguir com a instalação dos programas auxiliares e módulos Python:

```
$ sudo apt install build-essential git scons python3-pip
$ sudo pip3 install intelhex pyserial
```

## A.2 Clonagem e configuração do repositório

Após a conclusão de todas as instalações, pode-se realizar a programação, compilação e gravação de programas para o OpenMote-B. Para isso, deve-se clonar o repositório que contém os projetos de exemplo para o OpenMote-B e submódulos necessários. A seguir é mostrada a linha de comando necessária para clonar o código do repositório<sup>5</sup>, bem como as informações que são colocadas no terminal, indicando que o procedimento ocorreu com sucesso.

```
$ git clone https://github.com/GComPI-IFPB/openmote-sbrt.git
Cloning into 'openmote-sbrt'...
remote: Enumerating objects: 365, done.
remote: Counting objects: 100% (365/365), done.
remote: Compressing objects: 100% (238/238), done.
remote: Total 365 (delta 114), reused 365 (delta 114), pack-reused 0
Receiving objects: 100% (365/365), 628.78 KiB | 1.34 MiB/s, done.
Resolving deltas: 100% (114/114), done.
```

<sup>4</sup>Os passos descritos neste tutorial foram testados utilizando o sistema operacional Ubuntu 20.04 LTS.

<sup>5</sup>O repositório está disponível em <https://github.com/GComPI-IFPB/openmote-sbrt.git>.

Após finalizar a clonagem do repositório, deve-se entrar na pasta que foi criada (denominada “openmote-sbrt”) e digitar o comando `git submodule update --init --recursive`, como mostrado a seguir:

```
$ cd openmote-sbrt
$ git submodule update --init --recursive
Submodule 'tools/cc2538-bsl' (https://github.com/JelmerT/cc2538-bsl) registered for path 'tools/cc2538-bsl'
Cloning into '.../openmote-sbrt/tools/cc2538-bsl'...
Submodule path 'tools/cc2538-bsl': checked out '...'
```

### A.3 Escrita e compilação do código do transmissor

Seguindo o caminho “openmote-sbrt/projects/at86rf215/at86rf215-sensors-tx/src/” é possível encontrar o código fonte `main.cpp`, que utiliza o transceptor AT86RF215 para realizar a comunicação sem fio. No arquivo `main.cpp` encontra-se o código responsável por configurar o tipo de modulação, largura de banda e frequência de comunicação que serão utilizados pelo transceptor. Essas configurações devem ser escolhidas a partir de um conjunto de valores pré-definidos por meio de enumerações, uma para cada configuração de camada física suportada pelo transceptor. O trecho de código a seguir mostra como realizar as definições dos parâmetros do rádio:

```
#define RADIO_CORE ( At86rf215::CORE_RF09 )
#define RADIO_SETTINGS ( &radio_settings[CONFIG_OFDM2_MCS0] )
#define RADIO_FREQUENCY ( &frequency_settings_09[FREQUENCY_09_OFDM2] )
#define RADIO_CHANNEL ( 0 )
#define RADIO_TX_POWER ( At86rf215::TransmitPower::TX_POWER_MAX )
```

No diretório “openmote-sbrt/drivers/at86rf215/” pode-se encontrar os arquivos `At86rf215_conf.cpp` e `At86rf215_conf.h`, que contêm as declarações das enumerações, que podem ser usadas para configurar o rádio para usar uma das opções de camada física disponíveis.

Para garantir que o rádio funcionará corretamente é necessário manter as funções de inicialização, configuração e ativação do rádio no corpo do código fonte na seguinte ordem:

```
// Set radio callbacks and enable interrupts
at86rf215.setTxCallbacks(RADIO_CORE, &radio_tx_init_cb, &radio_tx_done_cb);
at86rf215.enableInterrupts();

// Turn AT86RF215 radio on
at86rf215.on();

// Wake up and configure radio
```

```

at86rf215.wakeup(RADIO_CORE);
at86rf215.configure(RADIO_CORE, RADIO_SETTINGS, RADIO_FREQUENCY, RADIO_CHANNEL);
at86rf215.setTransmitPower(RADIO_CORE, RADIO_TX_POWER);

// Prepare radio packet
tx_buffer_len = prepare_packet(radio_buffer, eui48_address, packet_counter, sensor_data);

// Load packet to radio
at86rf215.loadPacket(RADIO_CORE, radio_buffer, tx_buffer_len);

// Transmit packet
at86rf215.transmit(RADIO_CORE);

// Turn AT86RF215 radio off
at86rf215.off();

```

A função *prepare\_packet* deve ser escrita pelo usuário. Nos códigos existentes no repositório, é possível observar melhor o uso dos métodos do rádio. Um exemplo de implementação da função *prepare\_packet* também é fornecido.

Para compilar o projeto é necessário voltar à pasta raiz do repositório (denominada “openmote-sbrt”), usando o terminal, e executar o comando da ferramenta SCons, como demonstrado a seguir:

```

$ scons board=openmote-b project=at86rf215-sensors-tx compiler=gcc verbose=0
scons: Reading SConscript files ...
scons: done reading SConscript files.
scons: Building targets ...
.
.
.
scons: done building targets.

```

Com a compilação concluída, pode-se gravar o programa por meio dos seguintes passos: conecte a placa do OpenMote-B em uma porta USB e utilize o comando SCons com o parâmetro *bootload* indicando o dispositivo a ser usado (/dev/ttyUSB1 nesse exemplo) para realizar a gravação, como mostrado na linha de comando a seguir:

```

$ sudo scons board=openmote-b project=at86rf215-sensors-tx compiler=gcc verbose=0 bootload=/dev/
ttyUSB1
scons: Reading SConscript files ...
scons: done reading SConscript files.
scons: Building targets ...

```

```
.  
. .  
Starting bootloading on /dev/ttyUSB1  
Done bootloading on /dev/ttyUSB1  
scons: done building targets.
```

Se todas as mensagens no terminal forem exibidas corretamente, significa que o processo foi concluído e a imagem foi devidamente gravada.

## A.4 Escrita e compilação do código do receptor

Seguindo o caminho “openmote-sbrt/projects/at86rf215/at86rf215-sensors-rx/src/” é possível encontrar o código fonte *main.cpp*, que segue as mesmas especificações para configuração do rádio encontradas no arquivo *main.cpp* do diretório “at86rf215-sensors-tx/src/”, que possui o código do transmissor.

Há diferença nos métodos utilizados a fim de configurar o transceptor para função de receptor, bem como enviar as informações dos pacotes recebidos pela porta USB. A seguir o exemplo de código:

```
// Turn AT86RF215 radio on  
at86rf215.on();  
  
// Check AT86RF215 radio  
status = at86rf215.check();  
if (!status) {  
    // Blink red LED  
    board.error();  
}  
  
// Set radio callbacks and enable interrupts  
at86rf215.setRxCallbacks(RADIO_CORE, &radio_rx_init_cb, &radio_rx_done_cb);  
at86rf215.enableInterrupts();  
  
// Wake up and configure radio  
at86rf215.wakeup(RADIO_CORE);  
at86rf215.configure(RADIO_CORE, RADIO_SETTINGS, RADIO_FREQUENCY, RADIO_CHANNEL);  
at86rf215.setTransmitPower(RADIO_CORE, RADIO_TX_POWER);  
  
At86rf215::RadioResult result;
```

```

int8_t rssi, lqi;
bool crc;
bool received;

// Initialize packet pointer and length
uint8_t* packet_ptr = radio_buffer;
uint16_t packet_len = radio_buffer_len;

// Try to receive a packet
at86rf215.receive(RADIO_CORE);

// Get packet from radio
result = at86rf215.getPacket(RADIO_CORE, packet_ptr, &packet_len, &rssi, &lqi, &crc);

// Check packet has been received successfully
if (result == At86rf215::RadioResult::Success && crc == true) {
    uint16_t length;

    // Prepare serial buffer
    length = prepare_serial(serial_buffer, packet_ptr, packet_len, lqi);

    // Send packet via Serial
    serial.write(serial_buffer, length, true);
}

uint16_t length;
// Prepare serial buffer
length = prepare_serial(serial_buffer, packet_ptr, packet_len, lqi);

// Send packet via Serial
serial.write(serial_buffer, length, true);

// Turn AT86RF215 radio off
at86rf215.off();

```

Para compilar e gravar o projeto para função de receptor, basta executar os comandos SCons, como mostrado para o código do transmissor, alterando o parâmetro *project* para “at86rf215-sensors-rx”, de modo que o comando a ser digitado fica como a seguir:

```

$ scons board=openmote-b project=at86rf215-sensors-rx compile=gcc verbose=0

```

Para a gravação do programa no OpenMote-B, também deve-se seguir os mesmos passos descritos para o transmissor, apenas substituindo “at86rf215-sensors-tx” por “at86rf215-sensors-rx”.

No diretório “openmote-sbrt/projects/at86rf215-sensors-rx/” há um script Python que permite realizar a leitura dos dados via Serial do OpenMote receptor. Para utilizar o script é necessário executar os seguintes comandos:

```
$ cd projects/at86rf215-sensors-rx/  
$ python at86rf215-sensors-rx.py -p /dev/ttyUSB1
```

Substitua o argumento “/dev/ttyUSB1” pela porta que o OpenMote estiver utilizando em sua máquina se for o caso.

## Referências

- [1] B. Lu e V. C. Gungor, “Online and Remote Motor Energy Monitoring and Fault Diagnostics Using Wireless Sensor Networks,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 56, n. 11, pp. 4651–4659, 2009. DOI: 10.1109/TIE.2009.2028349.
- [2] R. D. Gomes, “Estimação de qualidade de enlace e alocação dinâmica de canais em redes de sensores sem fio industriais,” Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, 2017.
- [3] R. Gomes, I. Fonseca e M. Alencar, “Protocolos Multicanais para Redes de Sensores sem Fio Industriais,” *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, v. 5, p. 25, out. de 2015. DOI: 10.12721/2237-5112/rtic.v5n2p25-32.
- [4] “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer,” *IEEE Std 802.15.4e-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2011)*, pp. 1–225, 2012. DOI: 10.1109/IEEESTD.2012.6185525.
- [5] D. De Guglielmo, S. Brienza e G. Anastasi, “IEEE 802.15.4e: A survey,” *Computer Communications*, v. 88, pp. 1–24, 2016, ISSN: 0140-3664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.05.004>. endereço: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366416301980>.
- [6] M. Gürsu, M. Vilgelm, S. Zoppi e W. Kellerer, “Reliable co-existence of 802.15.4e TSCH-based WSN and Wi-Fi in an aircraft cabin,” mai. de 2016, pp. 663–668. DOI: 10.1109/ICCW.2016.7503863.
- [7] R. Hermeto, A. Gallais e F. Theoleyre, “Scheduling for IEEE802.15.4-TSCH and slow channel hopping MAC in low power industrial wireless networks: A survey,” *Computer Communications*, v. 114, out. de 2017. DOI: 10.1016/j.comcom.2017.10.004.
- [8] R. Gomes, D. Queiroz, A. Filho, I. Fonseca e M. Alencar, “Real-Time Link Quality Estimation for Industrial Wireless Sensor Networks Using Dedicated Nodes,” *Ad Hoc Networks*, v. 59, fev. de 2017. DOI: 10.1016/j.adhoc.2017.02.007.
- [9] R. D. Gomes, C. Benavente-Peces, I. E. Fonseca e M. S. Alencar, “Adaptive and Beacon-based multi-channel protocol for Industrial Wireless Sensor Networks,” *Journal of Network and Computer Applications*, v. 132, pp. 22–39, 2019, ISSN: 1084-8045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.02.007>.

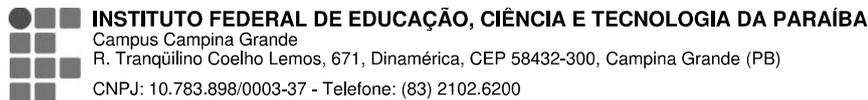
org/10.1016/j.jnca.2019.01.025. endereço: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804519300396>.

- [10] T. S. Rappaport, *Comunicações sem Fio – Princípios e Práticas*, sér. Segunda Edição. Pearson, 2009.
- [11] P. Agrawal, A. Ahlén, T. Olofsson e M. Gidlund, “Characterization of long term channel variations in industrial wireless sensor networks,” em *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2014, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICC.2014.6883285.
- [12] T. Watteyne, S. Lanzisera, A. Mehta e K. S. J. Pister, “Mitigating Multipath Fading through Channel Hopping in Wireless Sensor Networks,” em *2010 IEEE International Conference on Communications*, 2010, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICC.2010.5502548.
- [13] B. S. Chaudhari, M. Zennaro e S. Borkar, “LPWAN technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations,” *Future Internet*, v. 12, n. 3, p. 46, 2020.
- [14] *Figure with WSN radio technologies*, <https://embeddedams.nl/different-ways-to-connect-iot-devices-to-transmit-and-receive-data/>, Acessado em: Setembro de 2020.
- [15] *Zigbee Alliance*, <https://zigbeealliance.org/solution/zigbee/>, Acessado em: Setembro de 2020.
- [16] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel e F. Meyer, “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment,” *ICT express*, v. 5, n. 1, pp. 1–7, 2019.
- [17] W. Anani, A. Ouda e A. Hamou, “A Survey Of Wireless Communications for IoT Echo-Systems,” em *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [18] “IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks,” *IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)*, pp. 1–800, 2020.
- [19] A. Seferagić, J. Famaey, E. De Poorter e J. Hoebeke, “Survey on Wireless Technology Trade-Offs for the Industrial Internet of Things,” *Sensors*, v. 20, n. 2, p. 488, 2020.
- [20] *ETSI - European Telecommunications Standards Institute*, <https://www.etsi.org/>, Acessado em: Setembro de 2020.
- [21] *3GPP - 3rd Generation Partnership Project*, <https://www.3gpp.org/>, Acessado em: Setembro de 2020.
- [22] *WSIG - wsigWeightless Special Interest Group*, <http://www.weightless.org/>, Acessado em: Setembro de 2020.

- [23] *LoRa Alliance*, <https://lora-alliance.org/>, Acessado em: Setembro de 2020.
- [24] *DASH7 Alliance*, <https://dash7-alliance.org/>, Acessado em: Setembro de 2020.
- [25] U. Raza, P. Kulkarni e M. Sooriyabandara, “Low power wide area networks: An overview,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 19, n. 2, pp. 855–873, 2017.
- [26] J. A. Gutierrez, M. Naeve, E. Callaway, M. Bourgeois, V. Mitter e B. Heile, “IEEE 802.15.4: a developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks,” *IEEE network*, v. 15, n. 5, pp. 12–19, 2001.
- [27] “IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 15: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPAN),” *IEEE Std 802.15.4-2003*, pp. 1–680, 2003.
- [28] “IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs),” *IEEE Std 802.15.4-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003)*, pp. 1–320, 2006.
- [29] “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks–Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs),” *IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)*, pp. 1–314, 2011.
- [30] IEEE, “IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks,” *IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011)*, pp. 1–709, 2016.
- [31] C.-S. Sum, M.-T. Zhou, F. Kojima e H. Harada, “Experimental Performance Evaluation of Multihop IEEE 802.15.4/4g/4e Smart Utility Networks in Outdoor Environment,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, v. 2017, pp. 1–13, 2017. DOI: 10.1155/2017/7137406.
- [32] Kuor-Hsin Chang e B. Mason, “The IEEE 802.15.4g standard for smart metering utility networks,” em *2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, nov. de 2012, pp. 476–480. DOI: 10.1109/SmartGridComm.2012.6486030.
- [33] J. Muñoz, P. Muhlethaler, X. Vilajosana e T. Watteyne, “Why channel hopping makes sense, even with IEEE802.15.4 OFDM at 2.4 GHz,” em *2018 Global Internet of Things Summit (GIoTS)*, IEEE, 2018, pp. 1–7.

- [34] P. Tuset-Peiró, F. Vázquez-Gallego, J. Muñoz, T. Watteyne, J. Alonso-Zarate e X. Vilajosana, “Experimental Interference Robustness Evaluation of IEEE 802.15.4-2015 OQPSK-DSSS and SUN-OFDM Physical Layers for Industrial Communications,” *Electronics*, v. 8, n. 9, p. 1045, set. de 2019, ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics8091045. endereço: <http://dx.doi.org/10.3390/electronics8091045>.
- [35] D. De Guglielmo, S. Brienza e G. Anastasi, “IEEE 802.15. 4e: A survey,” *Computer Communications*, v. 88, pp. 1–24, 2016.
- [36] J. Dias, F. Ribeiro, R. Campos et al., “Evaluation of an RPL/6LoWPAN/IEEE 802.15. 4g solution for smart metering in an industrial environment,” em *2016 12th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, IEEE, 2016, pp. 1–4.
- [37] P. Sommer, Y. Maret e D. Dzung, “Low-power wide-area networks for industrial sensing applications,” em *2018 IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII)*, IEEE, 2018, pp. 23–32.
- [38] F. Righetti, C. Vallati, D. Comola e G. Anastasi, “Performance Measurements of IEEE 802.15. 4g Wireless Networks,” em *2019 IEEE 20th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM)*, IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [39] *Wi-SUN Alliance*, <https://wi-sun.org/>, Acessado em: Setembro de 2020.
- [40] M. Azman, J. G. Panicker e R. Kashyap, “Wireless Daisy Chain and Tree Topology Networks for Smart Cities,” em *2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICECCT.2019.8869252.
- [41] Y. W. Law, H. R. Pota, J. Jin, Z. Man e M. Palaniswami, “Control and Communication Techniques for the Smart Grid: An Energy Efficiency Perspective,” *IFAC Proceedings Volumes*, v. 47, n. 3, pp. 987–998, 2014, 19th IFAC World Congress, ISSN: 1474-6670. DOI: <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01736>. endereço: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701641743X>.
- [42] X. Vilajosana, P. Tuset, T. Watteyne e K. Pister, “OpenMote: Open-source prototyping platform for the industrial IoT,” em *International Conference on Ad Hoc Networks*, Springer, 2015, pp. 211–222.

- [43] P. Tuset-Peiró, X. Vilajosana e T. Watteyne, “OpenMote+: A Range-Agile Multi-Radio Mote,” em *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, sér. EWSN '16, Graz, Austria: Junction Publishing, 2016, pp. 333–334, ISBN: 9780994988607.
- [44] P. Tuset-Peiró, R. D. Gomes, P. Thubert, E. Cuerva, E. Egusquiza e X. Vilajosana, “A Dataset to Evaluate IEEE 802.15. 4g SUN for Dependable Low-Power Wireless Communications in Industrial Scenarios,” *Data*, v. 5, n. 3, p. 64, 2020.
- [45] T. Instruments, *CC2538 Powerful Wireless Microcontroller System-On-Chip for 2.4-GHz IEEE 802.15.4, 6LoWPAN, and ZigBee® Applications (Rev. SWRS096D)*, 2015.
- [46] Atmel, *AT86RF215 Device Family: Sub-1GHz/2.4GHz Transceiver and I/Q Radio for IEEE Std 802.15.4-2015 (Rev. 42415E)*, 2016.



## Documento Digitalizado Restrito

### Versão atualizada do TCC de Allan Bispo

**Assunto:** Versão atualizada do TCC de Allan Bispo  
**Assinado por:** Paulo Ribeiro  
**Tipo do Documento:** Dissertação  
**Situação:** Finalizado  
**Nível de Acesso:** Restrito  
**Hipótese Legal:** Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)  
**Tipo do Conferência:** Documento Original

Documento assinado eletronicamente por:

- Paulo Ribeiro Lins Junior, COORDENADOR DE CURSO - FUC1 - CCEC-CG, em 26/09/2022 16:18:13.

Este documento foi armazenado no SUAP em 26/09/2022. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 635019  
Código de Autenticação: ed7252f194

