

Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Centro de Informática (CI)

Programa de Pós-Graduação em Informática (PPGI)

Controle Dinâmico de Potência em Redes Wi-SUN/IEEE

802.15.4g em Topologia Linear

Frederico Augusto Monteiro Saraiva

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Informática da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Informática.

Área de Concentração: Ciência da Computação

Linha de Pesquisa: Computação Distribuída

Iguatemi Eduardo da Fonseca

(Orientador)

Ruan Delgado Gomes

(Coorientador)

João Pessoa, Paraíba, Brasil

©Frederico Augusto Monteiro Saraiva, 30 de setembro de 2020

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S243c Saraiva, Frederico Augusto Monteiro.

Controle Dinâmico de Potência em Redes Wi-SUN/IEEE
802.15.4g em Topologia Linear / Frederico Augusto
Monteiro Saraiva. - João Pessoa, 2020.

86 f.

Orientação: Iguatemi Eduardo da Fonseca.

Coorientação: Ruan Delgado Gomes.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/Informática.

1. Informática. 2. Redes Wi-SUN. 3. Redes de sensores
sem fio industriais. 4. Redundância. 5. Topologia
linear. I. Fonseca, Iguatemi Eduardo da. II. Gomes,
Ruan Delgado. III. Título.

UFPB/BC

CDU 004(043)

Resumo

O desenvolvimento das tecnologias de informação fazem com que nos dias de hoje vivamos em um mundo conectado, onde a computação pervasiva está cada vez mais presente na sociedade. Assim, as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são componentes vitais na construção dessa infraestrutura de conexão. O Wi-SUN é uma tecnologia de RSSF que implementa o padrão IEEE 802.15.4g e, por natureza, suporta diversas topologias, dentre elas a linear. Desta forma, ela também carrega consigo a necessidade de prover tolerância a falhas. Alguns usos de redes Wi-SUN necessitam que os transceptores sejam interligados de forma linear. Nessas ocasiões, a falha em algum dos transceptores pode acarretar prejuízos extensivos devido ao rompimento do caminho da informação, uma vez que a forma linear de interligação não oferece rotas alternativas para o tráfego. Nesse sentido, a presente pesquisa tem como premissa principal a ser seguida a existência da necessidade de que toda rede Wi-SUN deve ser o mais resiliente possível. Além disso, tem-se a ideia de que uma possível redundância para um sistema arranjado de forma linear é a de que a falha de um nó pode ser mitigada através do controle dinâmico de potência de transmissão, de modo a sobrepor o nó defeituoso e, com isso, conseguir repassar a informação. Este trabalho visa analisar de que maneira uma rede Wi-SUN/802.15.4g pode se manter o mais operacional possível quando os transceptores estão dispostos linearmente e ocorre a falha em algum dos nós, com base em dados experimentais obtidos em um ambiente de Campus Inteligente e o desenvolvimento e apresentação de estratégias para o controle dinâmico de potência .

Palavras-chave: Redes Wi-SUN, Redes de Sensores sem Fio Industriais, Redundância, Topologia Linear.

Abstract

Nowadays, the development of information technologies mean that we live in a connected world, where pervasive computing is increasingly present in society. Therefore, wireless sensor networks (WSNs) are vital components in the construction of this connection infrastructure. Wi-SUN networks are a kind of RSSF that, by its nature, has mesh topology as the most adopted. In this way, they also carry with them the need for transceivers' redundancy. Some uses of Wi-SUN networks require that the transceivers should be interconnected in a linear form. At such times, the failure of one of the transceivers may lead to extensive damage due to the disruption of the information path, since the linear form of interconnection does not offer alternative routes for the traffic. Thereby, this research has its main hypothesis the need that every Wi-SUN network should be as resilient as possible. As secondary hypothesis, it's expected that a possible redundancy for a linearly arranged system is that the failure of a node may be mitigated if its neighboring nodes increase their transmission power, in order to supplant the defective node and, with this, be able to pass on the information. This research aims to analyze how a Wi-SUN/802.15.4g network may remain as operational as possible when the transceivers are arranged linearly and there is a failure in one of the nodes, based on experimental data obtained in an Smart Campus environment and the development and presentation of strategies for dynamic power control.

Keywords: Wi-SUN Networks, Industrial Wireless Sensor Networks, Redundance, Linear Topology.

Agradecimentos

A minha esposa Lidiane, cujo carinho, atenção e paciência foram primordiais para o desenvolvimento deste trabalho.

A minha mãe, que me proporcionou educação ao longo de minha vida e sempre me ensinou (e ensina) que os melhores caminhos são aqueles que levam a ajudar ao próximo.

Aos meus irmãos e demais familiares que sempre estiveram presentes.

Aos meus orientadores, professor Iguatemi e professor Ruan, que me acompanharam nessa jornada e sempre me deram todo o apoio de que necessitei.

Ao colega Allan Bispo, pela enorme ajuda na confecção dos experimentos e testes realizados em campo.

Aos colegas da GSEGI/STI, Raniere e Janio, que sempre se prontificaram a me tirar as diversas dúvidas que surgiram ao longo da caminhada.

Ao colega Laerte Pereira, pelos incentivos e pelas orientações dadas.

Ao colega professor Félix, cuja paciência de "poeta parnasiano" e incentivos foram de grande importância para esta última etapa do trabalho.

Ao Centro de Informática e seu corpo de professores e técnicos administrativos, os quais realizam trabalho de relevante importância para a sociedade.

Ao colega Elialdo (in memoriam), que lamentavelmente retornou cedo demais.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que tudo desse certo.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo Geral	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Estrutura da Dissertação	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	Tolerância a Falhas em Sistemas	5
2.2	Redes Utilitárias Inteligentes (SUN)	9
2.2.1	Definições Gerais	9
2.2.2	O Padrão IEEE 802.15.4	10
2.2.3	Campos Comuns de Aplicação	18
2.3	Redes Ubíquas Inteligentes Sem Fio (Wi-SUN)	19
2.3.1	Definições Gerais	19
2.3.2	Emenda IEEE 802.15.4g	20
2.3.3	6LoWPAN	24
2.3.4	Campos Comuns de Aplicação	30
3	ESTUDOS RELACIONADOS	32
3.1	Estudos de Avaliação de Tecnologias	32
3.1.1	Discussão	34
3.2	Estudos Acerca de Confiabilidade	35
3.2.1	Discussão	37

3.3	Considerações Finais	38
4	MECANISMO PARA ADAPTAÇÃO DINÂMICA DE POTÊNCIA E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL	39
4.1	Estudo de Caso	40
4.2	Mecanismo de Adaptação Dinâmica de Potência	41
4.3	Avaliação Experimental	42
4.3.1	Cenário Utilizado	43
4.3.2	Material Utilizado	43
4.3.3	Execução do Experimento	46
4.3.4	Resultados e Discussão	47
4.4	Simulação Realista	50
4.4.1	Estratégias para Seleção de Potência de Transmissão	51
4.4.2	Resultados e Discussão	53
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	62
5.1	Síntese dos Resultados	62
5.2	Considerações Finais	63
5.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	63
	Referências Bibliográficas	71
A	Apêndice A	72
A.1	Fotos do Experimento	72

Lista de Símbolos

6LoWPAN : *IPV6 over Low-Power Personal Area Networks*

ABMP : *Adaptative and Beacon-Based Multi-channel Protocol*

AES : *Advanced Encryption Standard*

ANSI : *American National Standards Institute*

ARR : *ACK Reception Ratio*

ASK : *Amplitude-Shift Keying*

BPSK : *Binary Phase Shift Keying*

COAP : *Constrained Application Protocol*

CSMA/CA : *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*

CTS : *Clear-to-Send*

DSSS : *Direct Sequence Spread Spectrum*

FAN : *Field Area Network*

FEC : *Forward Error Correction*

FFD : *Full Function Device*

FSK : *Frequency Shift Keying*

ICT : *Information and Communications Technology*

IE : *Information Element*

IETF : *Internet Engineering Task Force*

IoT : *Internet of Things*

IP : *Internet Protocol*

IPV4 : *Internet Protocol Version 4*

IPV6 : *Internet Protocol Version 6*

ISM : *Industrial, Scientific and Medical*

ITU-T : *International Telecommunication Unit-t*

KMP : *Key Management Protocol*

LPWAN : *Low Power Wide Area Network*

LR-WPAN : *Lower-Rate Wireless Personal Area Network*

M2M : *Machine-2-machine*

MAC : *Media Access Control*

MTBF : *Mean Time Between Failures*

MTTF : *Mean Time To Failure*

MTTR : *Mean Time to Repair*

MTU : *Maximum Transmission Unit*

NGN : *Next Generation Networks*

OFDM : *Ortogonal Frequency Division Multiplexing*

OQPSK-DSSS : *Offset Quadrature Phase Shift Keying-Direct Sequence Spread Spectrum*

OQPSK : *Offset Quadrature Phase-Shift Keying*

OSI : *Open System Interconnections*

PAN : *Personal Area Network*

PDR : *Packet Delivery Ratio*

RAID : *Redundant Array of Inexpensive Disks*

REI : *Redes Eléctricas Inteligentes*

RFD : *Reduced Function Device*

RSSI : *Received Signal Strength Indication*

RTS : *Request-to-Send*

SFD : *Start of Frame Delimiter*

SUN : *Smart Utilities Networks*

TDMA : *Time Division Multiplex Access*

TIA : *Telecommunications Industry Association*

Wi-SUN : *Wireless Smart Ubiquitous Network*

WPAN : *Wireless Personal Area Network*

Lista de Figuras

2.1	Redundância de <i>hardware</i>	6
2.2	Sistema conectado de forma linear.	7
2.3	Arquitetura do padrão IEEE 802.15.4	10
2.4	Camada física do IEEE 802.15.4. [Hanes et al. 2017]	11
2.5	Modulação ASK. [Mahdiraji e Abas 2010]	12
2.6	Modulação BPSK. [Mahdiraji e Abas 2010]	13
2.7	Modulação OQPSK. [Knauth 2008]	13
2.8	Algoritmo do CSMA/CA. [Papadimitratos, Mishra e Rosenburgh 2005]	14
2.9	Quadro da camada MAC. [Hanes et al. 2017]	15
2.10	Topologias de SUN. [Bensky 2019].	15
2.11	Modelo de rede SUN. [Sum et al. 2017].	19
2.12	Arquitetura do padrão IEEE 802.15.4g.	21
2.13	Modulação FSK. [Bilic e Ozdemir 2017]	22
2.14	Modulação OFDM. [Al-jawhar 2017]	23
2.15	Quadro de Segurança da Camada MAC. [Hanes et al. 2017]	24
2.16	Camada de adaptação 6LoWPAN. [Olsson 2014]	25
2.17	Compressão de cabeçalho em 6LoWPAN.[Shelby e Bormann 2011]	26
2.18	Fragmentação de cabeçalho. [Hanes et al. 2017]	27
2.19	Cabeçalho de endereçamento de malha 6LoWPAN. [Hanes et al. 2017]	28
2.20	Endereçamento em malha inferior e rota. [Olsson 2014]	29
4.1	Topologia linear.	40
4.2	Topologia linear interrompida.	40
4.3	Topologia linear restabelecida.	42

4.4	Rede Wi-SUN/802.15.4g em topologia linear.	43
4.5	Planta baixa do cenário.	44
4.6	Nó montado com CC1310.	45
4.7	Minicomputador Raspberry PI.[raspberrypi.org]	45
4.8	Valores de taxas de entrega de pacotes.	48
4.9	Níveis de RSSI (médio).	49
4.10	Algoritmo <i>AP4-Best</i>	53
4.11	Algoritmo <i>AP4-ARR</i>	54
4.12	Variação temporal do PDR para o enlace 3→2.	55
4.13	Variação temporal do PDR para o enlace 2→1.	55
4.14	Variação temporal do PDR para o enlace 3→G.	56
4.15	Variação temporal do PDR para o enlace 2→G.	57
4.16	Variação temporal do PDR para o enlace 1→G.	57
4.17	Valores médios de PDR.	58
4.18	Potência de transmissão do nó 2 para o enlace 2→G.	59
4.19	Potência de transmissão do nó 1 para o enlace 1→G.	60
A.1	Instalação do Nó.	72
A.2	Equipe do Projeto.	73
A.3	Nós Prontos para Instalação.	74

Lista de Tabelas

2.1	Opções originais do padrão IEEE 802.15.4-2003.	12
2.2	Processos de segurança pelo padrão IEEE 802.15.4 - edição 2003	17
2.3	Processos de segurança pelo padrão IEEE 802.15.4 - edições 2006 e 2011	18
2.4	Bandas de frequência - IEEE 802.15.4g	21
4.1	Taxa de entrega de pacotes.	47
4.2	Valores de RSSI médios e Desvio Padrão (σ).	49

Capítulo 1

Introdução

Comunicações digitais sem fio já fazem parte do cotidiano de grande parte das pessoas ao redor do mundo. Porém, não é ideia recente. A literatura cita que o inventor italiano Guglielmo Marconi no ano de 1901 realizou um experimento demonstrando como funcionava um telégrafo sem fio que transmitia informações em código morse de um navio para o litoral. De lá para cá, apesar de a base da ideia ainda permanecer, sobretudo nos meios de propagação de informações através de ondas eletromagnéticas, os modernos sistemas digitais além de apresentar desempenho melhor do que o apresentado por Marconi [Tanenbaum 2003], vem cada vez mais evoluindo e a curto espaço de tempo. O resultado dessa evolução tem feito com que a nossa sociedade viva, nos dias de hoje, em um mundo de ativos tecnológicos conectados, sejam estes relógios, motores, sensores inteligentes etc, que funcionam como provedores de serviços e disponibilizam uma capacidade sem precedentes de controle e monitoramento remotos, com objetivos principais de fornecer informações, as mais variadas, seja para aumentar a produtividade, a qualidade de serviços e mesmo o processamento inteligente dos dados gerados por esses ativos.

Com efeito, nesse contexto tecnológico atual, encontram-se as Redes Utilitárias Inteligentes (SUN), que tem em seu cerne os dispositivos de Internet das Coisas (IoT - *Internet-of-Things*) [Shahinzadeh et al. 2019]. Possuidoras de diversas funções, principalmente o encaminhamento de dados gerados por diversos dispositivos, tais redes despertam o interesse da comunidade científica, pois, além de serem tecnologias recentes, ainda estão em pleno desenvolvimento e encontram um vasto campo de aplicações, que vai desde a agricultura inteligente até os sistemas de Redes Elétricas Inteligentes [Veneri e Capasso 2018].

Nesse ínterim, essas tecnologias apresentam para os pesquisadores diversos desafios a serem solucionados, tais como tolerância a falhas, eficiência energética dos dispositivos, dentre outros.

1.1 Motivação

O Gartner Group¹ identificou, no ano de 2018, pelo menos 10 (dez) principais tecnologias e tendências estratégicas na área de IoT [Omale 2018] para pelo menos os próximos 5 (cinco) anos, o que demonstra que existe uma necessidade imediata de pesquisas de desenvolvimentos de produtos que objetivem melhoria de qualidade dos serviços e informações prestadas pelos dispositivos.

Cumprir mencionar, todavia, que as demandas por diversas tecnologias de IoT partem, fortemente, de indústrias que atuam nos mais diversos segmentos, como a do setor elétrico, agronegócio, indústria automotiva etc. Inclusive, as próprias Redes de Utilidades em topologia linear são também resultado de demandas da própria indústria [Harada et al. 2017]. O setor elétrico, por exemplo, que é um dos agentes essenciais impulsionadores do desenvolvimento das sociedades, melhorando a qualidade de vida das pessoas [Mochizuki et al. 2016], vem investindo cada vez mais em pesquisa e desenvolvimento na área de Redes de Utilidades e IoT para a indústria [Davoody-Beni et al. 2019]. De forma semelhante, o setor de gás, que se configura como sendo matriz energética principal de vários setores produtivos, também sente a necessidade de pesquisas e desenvolvimento na área de IoT. Não diferente, o setor agrícola, que é de grande importância para o desenvolvimento dos países, também investe sistematicamente em pesquisas na área [Salam e Shah 2019].

Destaca-se que muitos desses setores são de missão crítica e operam com redes em topologia linear, o que revela que paradas no sistema podem ser desastrosas, tais como o sistema de irrigação que deixa de operar levando a perda parcial ou total da produção, o sistema elétrico que deixa de enviar informações de monitoramento e controle de linhas energéticas, o setor de gás que deixa de enviar informações de pressão e temperatura ao longo da tubulação etc.

Enfim, esses exemplos mencionados, dentre tantos outros que poderiam ser destacados,

¹<https://www.gartner.com/en>

necessitam de tecnologias confiáveis e que sejam economicamente viáveis.

Nesse sentido, é possível se vislumbrar um mercado, ainda em formação, que demanda diversas soluções, algumas destas que já existem e precisam ser melhoradas, e outras que precisam ainda serem desenvolvidas. Isto, evidentemente, é um fator positivo, uma vez que estimula a produção intelectual em um modelo que exige, por sua natureza, processos e entes colaborativos que se envolvam na busca de soluções de problemas reais da sociedade e da indústria, gerando ganhos científicos e econômicos para todos.

Todas essas áreas de aplicação para as tecnologias descritas exigem que os sistemas sejam o mais confiáveis possíveis, tendo em vista que muitos deles se fazem importantes na cadeia produtiva de diferentes setores de aplicação. Logo, pesquisas em tolerância a falhas para essas áreas se fazem de grande necessidade.

1.2 Objetivos

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos que compõem o desenvolvimento deste trabalho científico.

1.2.1 Objetivo Geral

Como objetivo geral este trabalho se propõe analisar de que maneira uma Rede de Utilidades pode se manter o mais operacional e, por consequência, o mais confiável possível quando os nós estão em topologia linear e ocorre a falha em algum destes de modo a interromper o fluxo de informações.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os Objetivos Específicos propostos são os seguintes:

- realizar estudos de operação de equipamentos que implementem o padrão 802.15.4g;
- construir uma rede Wi-Sun/802.15.4g de testes para estudos;
- medir e avaliar indicadores de intensidade de sinal recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indication*);

- medir e avaliar taxas de entregas de pacotes (PDR - *Packet Delivery Rate*);
- criar e avaliar estratégias para adaptação dinâmica de potência utilizando métricas de PDR e ARR (ACK Reception Ratio).

1.3 Estrutura da Dissertação

Capítulo 2: Apresenta os conceitos básicos necessários para a compreensão dos tópicos do trabalho, bem como conceitos técnicos necessários para o entendimento de tolerância a falhas em sistemas em nível conceitual e matemático, bem como os diferentes meios que podem ser empregados em aplicações práticas.

Capítulo 3: Apresenta a revisão da literatura sobre os padrões IEEE 802.15.4/4g. São apresentados estudos de diferentes autores sobre desempenho, comparativos de tecnologias e de confiabilidade.

Capítulo 4: Apresenta estudo de caso de topologia linear em que o problema de interrupção do fluxo de informações pode ocorrer, bem como suas consequências. Detalha a construção prática de uma rede de testes em topologia linear e os meios de se obter resultados de dados desta rede, que servem para a elaboração de uma estratégia que use a adaptação de potência como meio de tolerância a falhas.

Capítulo 5: Apresenta as conclusões do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Tolerância a Falhas em Sistemas

As tecnologias da informação e comunicações (ICT - *Information and Communications Technologies*) se apresentam nos dias de hoje como sendo ferramentas do cotidiano das diversas organizações existentes na atualidade. O largo espectro das possibilidades de uso as tornaram ferramentas essenciais e utilizadas em diversos setores, seja no de produção ou de serviços. Muitas organizações compartilham a ideia de que o emprego dessas tecnologias gera maior produtividade, eficiência e lucratividade no desenvolvimento de tarefas [Gerônimo et al. 2018]. Então, diante desse cenário, é natural que se deseje, ou se necessite, que os sistemas relacionados à ICT estejam operacionais a maior parte do tempo possível.

Porém, a medida que esses sistemas, sejam em *hardware* ou *software*, crescem em número e complexidade, aumenta-se a propensão a falhas e, conseqüentemente a erros do sistema¹. Com efeito, é importante então que tais sistemas sejam tolerantes a falhas.

Tolerância a falhas implica na busca de meios para se contornar falhas quando elas aparecerem, o que é inevitável. Isso geralmente é explorado através do uso de redundâncias² [Blommers 1998; Koren e Krishna 2010], cujos tipos bastante conhecidos são a de *hardware*, *software* e informação.

Em implementações práticas, quando se fala de redundância de *hardware*, existem diver-

¹ Podemos entender uma *falha* como sendo um defeito de hardware ou software. Já um *erro* é a manifestação de uma falha [Koren e Krishna 2010]

² Redundância está ligada à ideia de reprodução de recursos, ou seja, é ter mais recursos do que o minimamente necessário para o sistema executar a tarefa para a qual foi construído [Verma e Singh 2018]

sas abordagens que costumeiramente podem ser utilizadas. Por exemplo, redes de computadores podem utilizar um segundo *link* de dados para servir de meio de transmissão alternativo, conforme apresentado na Figura 2.1. Roteadores de rede podem utilizar módulos de energia duplicados para os casos em que um apresentar falhas. Centros de dados podem ter múltiplos servidores de aplicação. Empresas podem ter mais de uma base de dados, e assim sucessivamente.

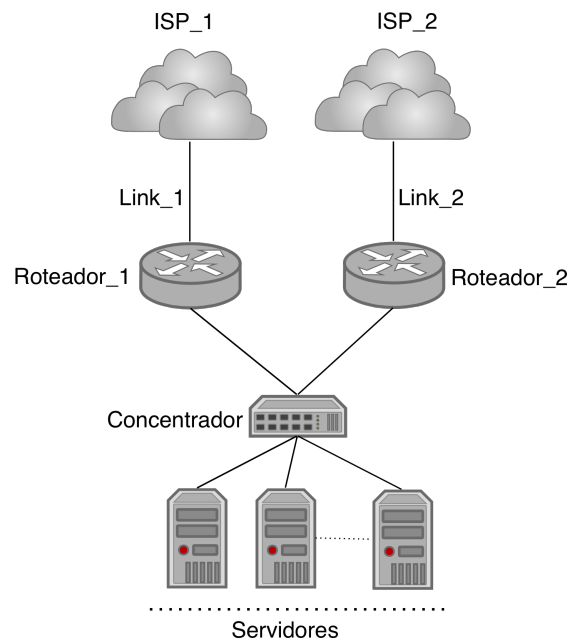


Figura 2.1: Redundância de *hardware*.

No caso da redundância de *software* é necessário lembrar que quando estes são complexos existem grandes probabilidades de surgirem falhas (*bugs*), contra as quais a redundância de *software* procura se opor. Geralmente versões diferentes do mesmo software (ou partes dele) são produzidas por times de desenvolvimento diferentes na esperança de que as duas não falhem ao mesmo tempo [Weber 2003].

Por fim, é importante citar a redundância da informação. Em geral, nessa modalidade são adicionados *bits* extras (*check bits*) ao conjunto de *bits* original dos dados, para utilização de códigos de detecção e correção de erros. Essa forma de redundância é muito utilizada em memórias, dispositivos de armazenamento matriciais (RAID - *Redundant Array of Inexpensive Disks*), canais de comunicação sujeitos a falhas transientes, dentre outros [Koren e

Krishna 2010].

Com efeito, o uso de redundâncias implica na necessidade de se efetuar medidas que capturem o desempenho ou alguma faceta relevante do comportamento do sistema. Uma abstração matemática³ comumente utilizada para esse objetivo é conhecida como confiabilidade. Denotada por $R(t)$, confiabilidade é a probabilidade (como função do tempo t) que um sistema, elemento ou componente tem em desempenhar suas funções prescritas em determinadas condições e em um período de intervalo $[0,t]$ [Verri 2010]. Logo, podemos concluir que sistemas usados em aplicações críticas, tais como aeronáutica, energia, comércio, saúde, dentre outros, devem ter alta confiabilidade.

Costuma-se pensar que se um determinado sistema é construído com n componentes e é desejável que esse sistema seja altamente confiável, então ele deve ser construído a partir de componentes também altamente confiáveis. Tal raciocínio é natural e decorre de uma lógica que funciona para muitos casos em que é empregada. Todavia, existem exceções. Por exemplo, em sistemas interdependentes formados por componentes dispostos de forma linear, conforme pode ser observado na Figura 2.2, a confiabilidade geral de tais sistemas é dada pela Equação 2.1 [Koren e Krishna 2010].



Figura 2.2: Sistema conectado de forma linear.

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t) \quad (2.1)$$

Então, observa-se que se hipoteticamente existirem 100 módulos com taxas de confiabilidade individual $R_i(t)$ igual a 0.999 ligados linearmente, a confiabilidade geral $R_s(t)$ do sistema será de 0.904 aproximadamente, a despeito da alta confiabilidade individual dos componentes.

³ "Abstração matemática é o processo de considerar e manipular operações, regras, métodos e conceitos despojados de sua referência a fenômenos e circunstâncias do mundo real, e também privados do conteúdo conectado a aplicações particulares." [Sinaceur 2014]. Ou seja, na abstração a ideia é capturada do mundo real e generalizada para ter maior aplicação. É o que acontece com o conceito de confiabilidade.

Essa é uma situação que pode causar diversos efeitos negativos, sobretudo se no sistema existirem partes que tenham baixa confiabilidade individual e, conseqüentemente, maior propensão a falhas, o que poderá refletir em outras partes do sistema e até mesmo no todo. É justamente acerca desse tipo de situação da qual esse trabalho trata, na medida em que é trabalhada a metodologia de adaptação de potência a fim de evitar que falhas individuais em transceptores em topologia linear repercutam no todo.

Junto ao conceito de confiabilidade existem o de Tempo Médio para Falha, denotado por *MTTF* (*Mean Time To Failure*), que é a média de tempo que o sistema opera até ocorrer a falha, e o de Tempo Médio entre Falhas, *MTBF* (*Mean Time Between Failures*), que é o tempo médio existente entre duas falhas consecutivas. Esses dois conceitos guardam uma relação entre si na medida em que um terceiro conceito, Tempo Médio de Reparo, ou seja, o tempo para a recuperação da falha, *MTTR* (*Mean Time to Repair*), passa também a ser considerado.

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (2.2)$$

A disponibilidade, denotada por $A(t)$, por seu turno, é outro conceito importante. Ela se refere à média fracional de tempo dentro do intervalo $[0,t]$ em que o sistema está ativo em um ponto aleatório desse intervalo. A disponibilidade em termos de longo prazo, denotada por A , é definida como:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) \quad (2.3)$$

e guarda uma relação entre o *MTTF* e o *MTBF* da seguinte forma:

$$A = \frac{MTTF}{MTBF} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (2.4)$$

2.2 Redes Utilitárias Inteligentes (SUN)

2.2.1 Definições Gerais

Nas duas últimas décadas as infraestruturas de ICT evoluíram significativamente, muito devido ao uso do protocolo IP (*Internet Protocol*), popularização e barateamento de tecnologias móveis e também da difusão e uso da banda larga. O protocolo IP na atualidade é utilizado largamente para prover conectividade fim-a-fim sobre redes de dados. Celulares utilizam redes sem fio para fornecer conectividade a qualquer usuário. A banda larga, por sua vez, fornece os canais necessários por onde as informações das tecnologias anteriormente apontadas trafegam. Estas tecnologias, portanto, apresentam um mundo inteiramente conectado e uma sociedade da informação que é o resultado da evolução dessas tecnologias [Lee, Lee e Rhee 2014].

São cada vez maiores as demandas dessa sociedade da informação por recursos que fazem uso das infraestruturas de ICT, especialmente considerando a diversidade de serviços, aplicações e dispositivos tais como Redes Inteligentes de Comunicações, Automóveis Inteligentes, Residências Inteligentes, dentre outros, que não somente fazem a pura entrega da informação, mas vão mais além entregando também conhecimentos.

O Setor de Normatização das Telecomunicações (ITU-T - *International Telecommunication Unit-T*) através do Grupo de Estudos 13 (SG13), vem desenvolvendo para essa emergente sociedade da informação padrões globais para diversos serviços de ICT, tais como tecnologias móveis, computação em nuvem e redes de próxima geração (NGN - *Next Generation Networks*) [Matsubara et al. 2013], as quais são um novo conceito comumente usado pelos projetistas de redes para representar suas visões de futuras redes de telecomunicações, com o objetivo geral de se chegar a um entendimento comum sobre NGN e preparar padrões sobre ele [Cochennec 2002].

Nesse contexto de Redes de Comunicação Inteligentes, o ITU-T SG13 vem desenvolvendo desde o ano de 2011 uma iniciativa denominada de redes utilitárias inteligentes (SUN - *Smart Utilities Networks*), as quais são redes NGN de serviços públicos equipadas com tecnologias de comunicação, facilitando aprimoramentos para otimizar o consumo de recursos.

Redes SUN trazem consigo diversas vantagens, tais como comunicações bidirecionais que implicam no uso através dela de sistemas que efetuam gerenciamento de recursos, con-

trole, processamento e armazenamento de informações. Aliado a essa questão, existe também o aspecto de redução de custos econômicos de operacionalização de determinados serviços, como leituras automatizadas de medidores de energia, gás, água e outros. Por fim, vale destacar também que a tecnologia também prevê segurança das comunicações através da possibilidade do uso de encriptação.

2.2.2 O Padrão IEEE 802.15.4

O IEEE 802.15.4 é um padrão proposto que atende às necessidades de redes de área pessoal sem fio de baixa taxa de dados (LR-WPAN - *Lower-Rate Wireless Personal Area Network*), que são redes SUN, com foco na aplicação de redes de sensores sem fio. O padrão é caracterizado por manter um alto nível de simplicidade, permitindo implementações de baixo custo e baixa potência. Sua banda de frequência operacional inclui a banda industrial, científica e médica (ISM - *Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz, fornecendo disponibilidade quase mundial [Howitt e Gutierrez 2003]. No padrão são definidas todas as especificações de comunicação da camada física e da camada de controle de acesso ao meio (MAC - *Media Access Control*) para as redes de comunicações sem fio em estudo. A Figura 2.3 apresenta a arquitetura do padrão em estudo.

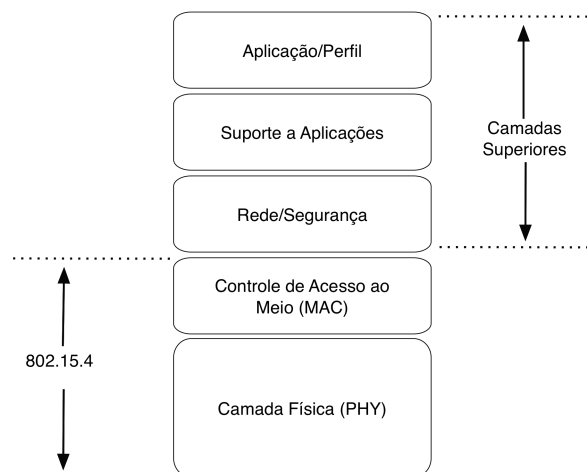


Figura 2.3: Arquitetura do padrão IEEE 802.15.4

a) Camada física

A camada física (PHY - *Physical Layer*) tem como objetivo a transmissão e recepção de dados do meio externo e prepará-los, seja para repassar à MAC, nos casos de recepção de dados, ou para receber dela e enviar para o mundo externo, para os casos de transmissão. Na camada PHY se encontram os circuitos elétricos moduladores e demoduladores dos sinais que compõem a informação manipulada [Tanenbaum 2003]. A Figura 2.4 mostra o quadro para a camada física 802.15.4. O cabeçalho de sincronização para esse quadro é composto pelos campos Preâmbulo e Início do delimitador de quadros. O campo Preâmbulo é um padrão de 4 *bytes* que identifica o início do quadro, sendo usado para sincronizar a transmissão de dados. O campo início de delimitador de quadro (SFD - *Start of Frame Delimiter*), por sua vez, informa ao receptor que o conteúdo do quadro é iniciado imediatamente após esse *byte*.

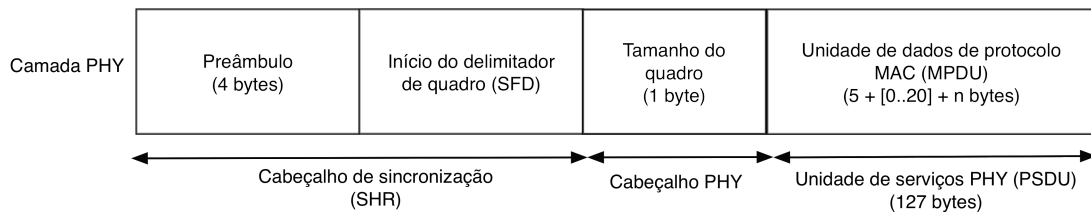


Figura 2.4: Camada física do IEEE 802.15.4. [Hanes et al. 2017]

No padrão em estudo, a camada em questão pode operar em 3 bandas de frequências definidas sobre as bandas ISM, que são: 868 MHz (Europa), 915 MHz (Estados Unidos/Américas) e 2,4 GHz (no mundo todo) [Standard 2003]. Essas 3 bandas de frequências estão embutidas em 27 canais, distribuídos da maneira que segue:

- 1 canal para a banda de frequência da Europa;
- 10 canais para a banda de frequência dos Estados Unidos/Américas;
- 16 canais para a banda de frequência da maior parte do mundo.

O padrão original do ano de 2003 especificou apenas três opções para a camada física, com base na modulação por espectro de propagação de sequência direta (DSSS - *Direct*

Sequence Spread Spectrum). DSSS é uma técnica de modulação na qual um sinal é intencionalmente espalhado no domínio da frequência, resultando em maior largura de banda [Hanes et al. 2017]. As opções originais de transmissão da camada PHY são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Opções originais do padrão IEEE 802.15.4-2003.

Padrão	Frequências	Canais	Modulação	Taxa(kbps)	Largura
802.15.4	2.4-2.4835 GHz	16	OPSK	250	5 MHz
802.15.4	868-868.6 MHz	1	BPSK	20	600 KHz
802.15.4	902-928 MHz	10	BPSK	40	10MHz

Revisões posteriores do padrão ocorridas nos anos 2006, 2011 e 2015 introduziram novas opções de comunicações na camada PHY, a saber:

- **ASK:** modulação por chaveamento de mudança de amplitude (ASK - *Amplitude-Shift Keying*), onde são utilizadas mudanças de amplitude para sinalizar valores de *bits* diferentes. A Figura 2.5 mostra um exemplo de ASK.

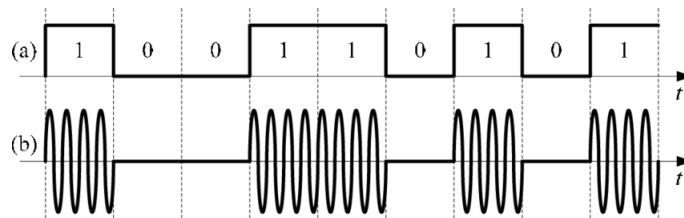


Figura 2.5: Modulação ASK. [Mahdiraji e Abas 2010]

- **BPSK:** modulação binária de mudança de fase (BPSK - *Binary Phase Shift Keying*), onde são especificadas duas mudanças de fase exclusivas como seu esquema de codificação de dados. A Figura 2.6 mostra um exemplo de BPSK.
- **OQPSK:** modulação de deslocamento de fase em quadratura de deslocamento (OQPSK - *Offset quadrature phase-shift keying*) que utiliza quatro valores de *bits* exclusivos que são sinalizados por alterações de fase. Uma função de deslocamento que está presente durante as mudanças de fase permite que os dados sejam transmitidos de maneira mais confiável. A Figura 2.7 mostra um exemplo de OQPSK.

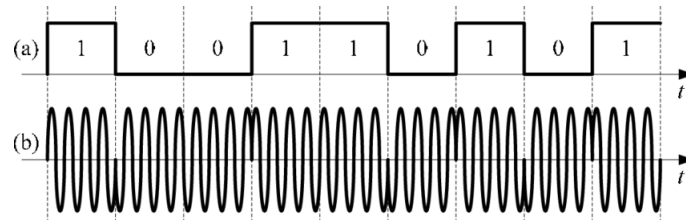


Figura 2.6: Modulação BPSK. [Mahdiraji e Abas 2010]

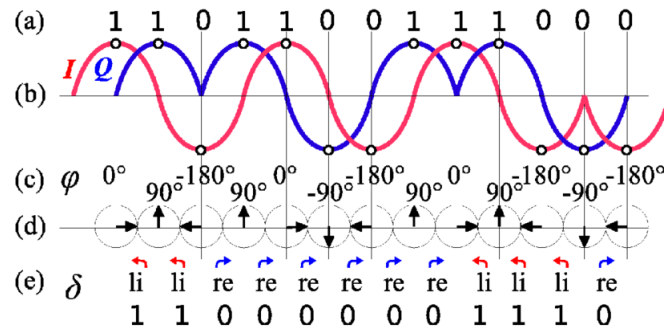


Figura 2.7: Modulação OQPSK. [Knauth 2008]

Essas melhorias aumentam a taxa máxima de dados de 868 MHz e 915 MHz para 100 kbps e 250 kbps, respectivamente. O suporte a 868 MHz foi aprimorado para 3 canais, enquanto outros grupos de estudo IEEE 802.15.4 produziram adendos para novas bandas de frequência [Hanes et al. 2017].

b) Camada MAC

A camada MAC tem como principal função disciplinar o acesso ao meio de comunicação, no caso em estudo, os canais de rádio. Para isso são utilizados protocolos específicos, que tanto pode ser o protocolo de acesso múltiplo com verificação de portadora com prevenção de colisão (CSMA/CA - *Carrier sense multiple access with collision avoidance*) [Gutiérrez 2007] ou, em certas circunstâncias, o protocolo de acesso por multiplexação de tempo (TDMA - *Time Division Multiplex Access*).

O funcionamento do protocolo CSMA/CA se baseia na ideia de que se determinado dispositivo deseja transmitir, ele primeiro precisa “escutar” o canal para ver se ele está livre. Assim, o nó define uma variável BE para $macMinBE$ (valor padrão: 3). Ele então espera por um período aleatório no intervalo de 0 a $(2^{BE} - 1)$ tempos de unidade e então realiza novamente um sensoramento do canal. Se essa análise apontar que o canal está ocioso,

o dispositivo transmite. Caso contrário, ele incrementa BE, até um valor de $macMaxBE$ (3–8, por padrão 5) e espera novamente. (Um nó finalmente desiste depois de tentar $macMaxCSMABackoffs$ vezes, um valor localizado no intervalo de 0–5, por padrão 4.) Quadros de confirmação, se solicitados, são enviados com um atraso muito curto (tempo de retorno) após a recepção sem usar o algoritmo CSMA/CA [Shelby e Bormann 2011]. A Figura 2.8 apresenta o algoritmo do CSMA/CA.

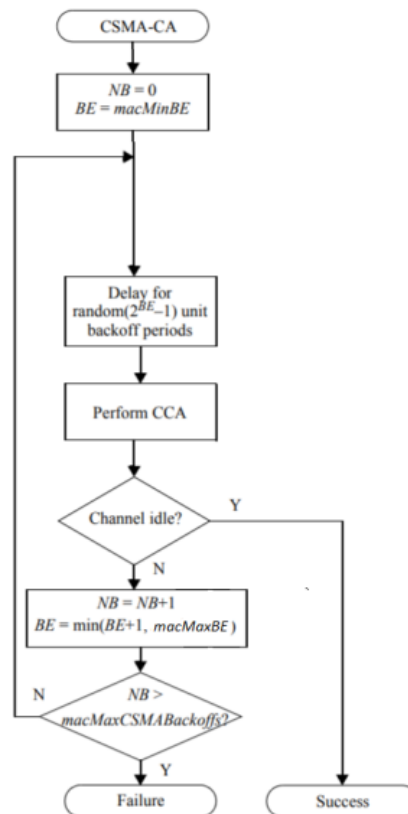


Figura 2.8: Algoritmo do CSMA/CA. [Papadimitratos, Mishra e Rosenburgh 2005]

A camada MAC também possui outras funções, como controle de fluxo através da confirmação de entrega de quadros, validação de quadros, sincronização da rede, controle de associação e segurança de dispositivos [Gutiérrez 2007]. A Figura 2.9 apresenta o formato de um quadro da camada MAC.

c) Topologia

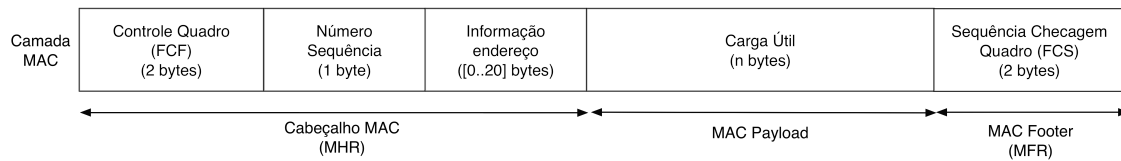


Figura 2.9: Quadro da camada MAC. [Hanes et al. 2017]

O padrão IEEE 802.5.4 prevê dois tipos de dispositivos que são classificados de acordo com suas funções, que são o dispositivo de função completa (FFD - *Full Function Device*) e o dispositivo de função reduzida (RFD - *Reduced Function Device*). Os dispositivos FFD possuem um conjunto de serviços MAC mais completo, podendo atuar tanto como coordenadores quanto como roteadores, o que possibilita acesso a todos os dispositivos dentro do alcance da transmissão. Os dispositivos RFD, por sua vez, são mais limitados uma vez que, possuindo um conjunto de serviços MAC reduzido, tem suas funções limitadas, deixando de exercer algumas funções, como roteamento, por exemplo. A configuração da rede, por sua vez, é obtida por meio de duas topologias - estrela e ponto-a-ponto, mostradas na Figura 2.10.

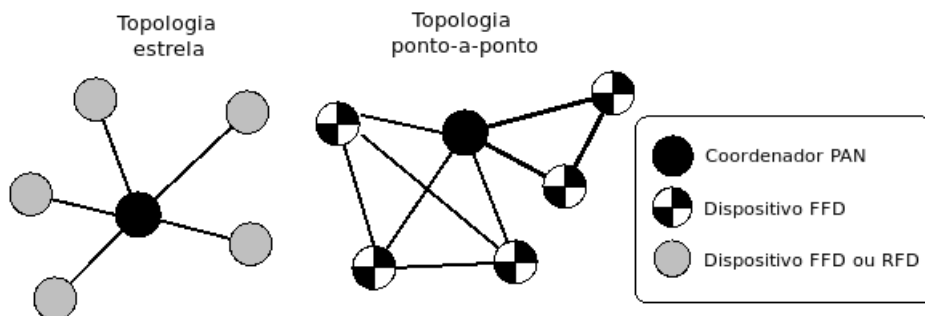


Figura 2.10: Topologias de SUN. [Bensky 2019].

Uma rede pode ter até 64 mil nós, um dos quais é coordenador de rede de área pessoal (PAN - *Personal Area Network*). A função do coordenador do PAN, além de qualquer aplicativo específico que possa ter, é iniciar, encerrar ou rotear a comunicação pela rede. Ele também fornece serviços de sincronização. Em uma rede em estrela, cada dispositivo se comunica diretamente com o coordenador. O coordenador deve ser um dispositivo FFD e os outros podem ser dispositivos FFD ou RFD. Na topologia ponto a ponto, qualquer dispositivo pode se comunicar com qualquer outro dispositivo, desde que esteja dentro do alcance. No

entanto, os dispositivos RFD não podem participar, pois um RFD só pode se comunicar com um FFD. Estruturas mais complexas podem ser configuradas como uma combinação de grupos ponto a ponto e configurações em estrela. Contudo, deve existir apenas um coordenador PAN em toda a rede [Bensky 2019].

O que diferencia as duas topologias em termos de comunicações é a forma como elas ocorrem entre os nós. Na topologia estrela, por exemplo, existe uma relação mestre-escravo entre o dispositivo que aceita associação e entre o dispositivo que se associa. Por outro lado, na topologia ponto-a-ponto não existe o relacionamento mestre-escravo entre os dispositivos [Hanes et al. 2017].

d) Alcance das transmissões

A respeito do alcance das transmissões no padrão IEEE 802.15.4, são de curto alcance [Bensky 2019], podendo variar consideravelmente, a depender da natureza do caminho, que deve ser, na maior parte das vezes, uma comunicação em linha de visão (*LoS - Line-of-Sight*).

O nível de potência de transmissão e a sensibilidade do receptor também são fatores que influenciam o alcance das comunicações. Nesse sentido, nas comunicações executadas em ambientes externos, o alcance se localiza entre 100 a 200 m. Em ambientes internos, por outro lado, o alcance fica entre 20 a 50 m [Righetti et al. 2019].

Sob condições ótimas, pode chegar a 1000 metros em um caminho livre de obstáculos. Porém, ressalta-se que esses casos não são a regra geral, que diz que a maioria das aplicações cobre intervalos na ordem de dezenas de metros, por volta de 10 a 75 metros.

e) Segurança das comunicações

A natureza das comunicações sem fio a tornam um meio intrinsecamente inseguro, uma vez que as ondas de rádio podem trafegar muito além do espaço físico em que possam estar localizados os dispositivos [Kurose e Ross 2013]. Desta forma, o meio sem fio está sujeito a escutas das transmissões, ataques de negação de serviços, ataques de intermediários (*middleman*), entre outros.

O problema de segurança não pode ser eliminado por completo de qualquer sistema que seja. No entanto, ele pode ser minimizado na medida em que a segurança do sistema venha

a ser considerada um processo e que faça parte do projeto. Em razão disso, O padrão IEEE 802.15.4 especifica procedimentos criptográficos para proteger as comunicações na camada MAC, de acordo com o modelo de referência de interconexão de sistemas abertos (OSI - *Open System Interconnections*). O mecanismo criptográfico neste padrão é baseado na criptografia de chave simétrica e usa chaves fornecidas por processos de camada superior. O estabelecimento e a manutenção dessas chaves estão fora do escopo da norma. O mecanismo pressupõe uma implementação segura de operações criptográficas e armazenamento seguro e autêntico do material de chave [Melnik 2018].

Três edições da norma IEEE 802.15.4 - em 2003, 2006 e 2011, e várias alterações foram emitidas. Na primeira edição de 2003, foram oferecidos os oito níveis de segurança fornecidos por oito ações de segurança, conforme mostra a Tabela 2.2 .

Tabela 2.2: Processos de segurança pelo padrão IEEE 802.15.4 - edição 2003

Atrib. segurança	Confid. dados	Autent. dados	Prot. repetição
NENHUM	não	não	não
AES-CTR	sim	não	opcional
AES-CBC-MAC-32	não	sim	não
AES-CBC-MAC-64	não	sim	não
AES-CBC-MAC-128	não	sim	não
AES-CCM-32	sim	sim	opcional
AES-CCM-64	sim	sim	opcional
AES-CCM-128	sim	sim	opcional

Conforme se pode ver, os processos de segurança são divididos em quatro seções. O primeiro deles (NENHUM) define um processo que não fornece nenhum aplicativo de mecanismo criptográfico. Sua inclusão é obrigatória. A segunda seção (AES-CTR) define um processo que fornece confidencialidade executando a criptografia de acordo com o algoritmo padrão avançado de encriptação AES (AES - *Advanced Encryption Standard*) com o modo contador (CTR - *Counter*). A terceira seção mostra três ações de segurança que executam autenticação de acordo com o modo cifra de bloco encadeada para autenticação de mensagens (CBC-MAC - *Cipher block chaining message authentication code*) do algoritmo AES para o comprimento do código de autenticação de mensagens de 32, 64 e 128 bits, respecti-

vamente. A quarta seção, por fim, é construída de forma semelhante à anterior, mas aqui o modo contador com CBC-MAC (CCM - CTR + CBC-MAC) do AES é usado. Pode também fornecer confidencialidade e autenticidade [Saleem, Ullah e Kwak 2010].

O padrão IEEE 802.15.4, na edição de 2006, altera ligeiramente algumas especificações de segurança. Por exemplo, em vez de fazer uso de três modos diferentes de criptografia e autenticação, isto é, CTR, CBC-MAC e CCM, apenas usa o modo CCM que, por sua vez, é diferente do original. O comprimento do campo de autenticação é alterável (esse recurso está ausente no CCM original). O valor do comprimento é codificado em algum lugar no *nonce*⁴, que impõe restrições adicionais ao último. O valor zero para o comprimento de um campo de autenticação é possível, o que significa desativar a autenticidade, pois o campo de autenticação vazio significa tal indicação [Melnyk 2018]. O modo CCM, portanto, é empregado para todas as ações de segurança (exceto em NENHUM) e destina-se a executar autenticação, criptografia ou autenticação e criptografia, conforme mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Processos de segurança pelo padrão IEEE 802.15.4 - edições 2006 e 2011

Atrib. segurança	Confid. dados	Autent. dados	Prot. repetição	Tam. MIC (octetos)
NENHUM	não	não	não	0
MIC-32	não	sim	não	4
MIC-64	não	sim	não	8
MIC-128	não	sim	não	16
ENC	sim	não	opcional	0
ENC-MIC-32	sim	sim	opcional	4
ENC-MIC-64	sim	sim	opcional	8
ENC-MIC-128	sim	sim	opcional	16

2.2.3 Campos Comuns de Aplicação

Os campos mais comuns para utilização das redes SUN são os de serviços de utilidades públicas, como sistemas de energia elétrica, água, gás natural e esgoto [Sum et al. 2017]. Entretanto, a evolução da tecnologia vem ampliando os campos de aplicação, tais como

⁴ Em criptografia, um *nonce* é um número arbitrário que só pode ser usado uma vez.

sistemas de automação e segurança residencial e predial, controles industriais, periféricos de PC, aplicações de sensores médicos e industriais etc. A Figura 2.11 mostra um exemplo de uso típico desta rede.

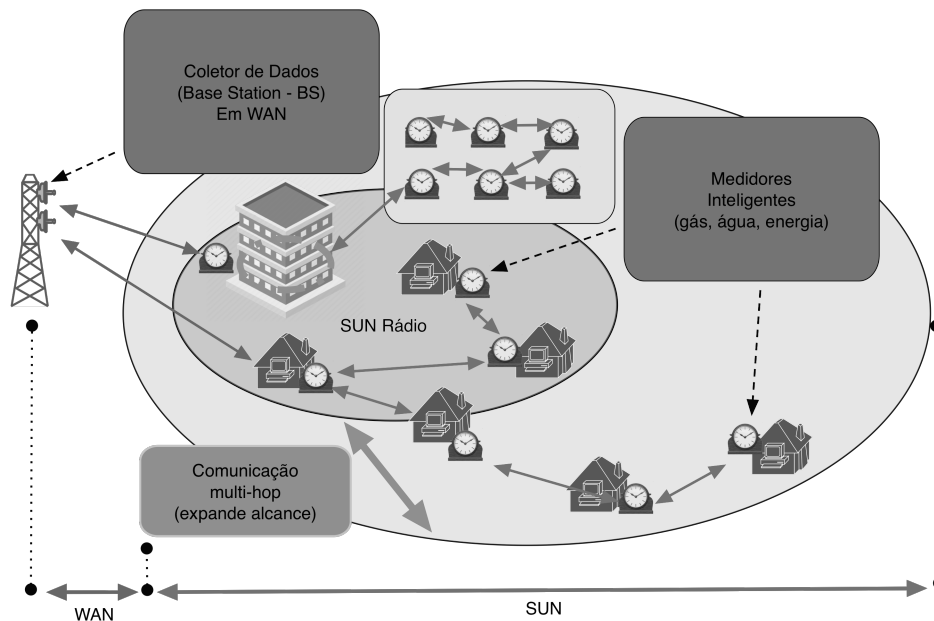


Figura 2.11: Modelo de rede SUN. [Sum et al. 2017].

2.3 Redes Ubíquas Inteligentes Sem Fio (Wi-SUN)

2.3.1 Definições Gerais

Redes ubíquas inteligentes sem fio (Wi-SUN - *Wireless Smart Ubiquitous Network*) são tecnologias de comunicação sem fio projetadas para serviços de utilidades públicas, Cidades Inteligentes e IoT. A Wi-SUN é baseada em vários padrões IEEE, IETF, de órgãos de padronização americanos (ANSI - *American National Standards Institute*) e da associação das indústrias de telecomunicações (TIA - *Telecommunications Industry Association*), que suportam redes LPWAN [Heile et al. 2017].

O objetivo da *Wi-SUN* é criar redes interoperáveis a partir de tecnologias provenientes de vários fornecedores. Para garantir a interoperabilidade, a organização *Wi-SUN Alliance*⁵

⁵www.wi-sun.org

foi formada, a qual consiste em mais de 130 membros, incluindo fornecedores de produtos, fornecedores de *microchips*, empresas de software, serviços públicos, instituições governamentais e universidades. Cada membro colabora para o ecossistema *Wi-SUN*, uma vez que a *Wi-SUN Alliance* definiu programas de testes e certificações para interoperabilidade de vários fornecedores. Esta organização não é um órgão de padrões, mas uma aliança do setor que define perfis de comunicação para redes inteligentes de utilidades que estejam baseadas no padrão IEEE 802.15.4g.

2.3.2 Emenda IEEE 802.15.4g

O IEEE 802.15.4g é uma emenda da norma IEEE 802.15.4 sendo, também, uma especificação de padrão sem fio aberta para redes inteligentes de utilidades. Características significativas foram implementadas no novo padrão, como maiores alcances e taxas de *bits*, bem como a possibilidade de uso em ambientes externos e em maiores distâncias. Essas novas características estimularam a ampliação e possibilidades de uso da tecnologia em diversos domínios.

Anteriormente, com o padrão IEEE 802.15.4, a aplicação principal das tecnologias que implementassem tal padrão eram voltadas para uso em serviços de utilidades públicas, como de água, gás, esgoto etc, conforme foi mencionado anteriormente. Contudo, atualmente, a emenda 802.15.4g permite diversas outras aplicações que são, na verdade, uma ampliação das capacidades do padrão. Exemplos dessas aplicações são Redes Elétricas Inteligentes (REIs), monitoramento de áreas de incêndio, registro de atividades sísmicas, Agricultura Inteligente, Redes de Área de campo (FAN - *Field Area Network*), dentre outros [Muñoz et al. 2018 (i)].

O IEEE 802.15.4g não introduziu mudanças profundas na arquitetura original do IEEE 802.15.4. As mudanças introduzidas se concentraram na camada física do modelo. A Figura 2.12 mostra a arquitetura do padrão o IEEE 802.15.4g.

a) Camada Física

A emenda “g” ampliou algumas características originais do padrão IEEE 802.15.4 que, conforme foi abordado anteriormente, foram originalmente especificadas para comunicações de curta distância e baixa taxa de *bits*. A emenda então as modifica introduzindo possibilida-

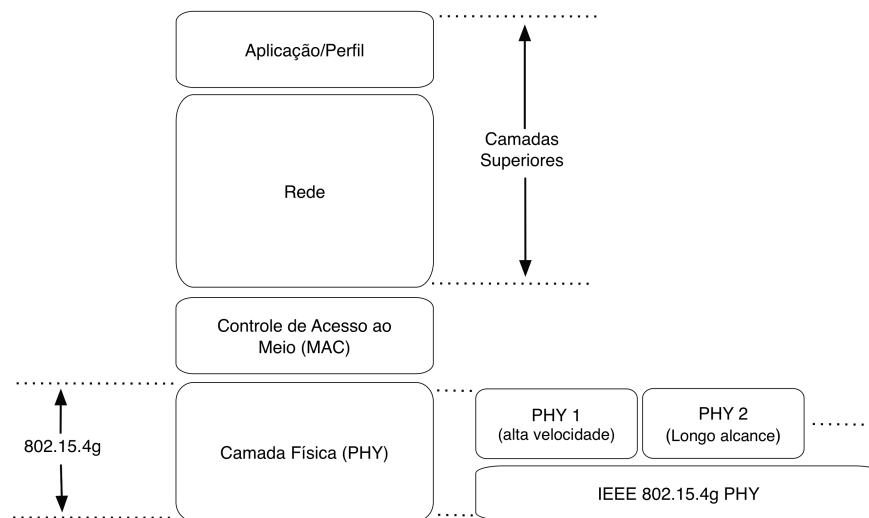


Figura 2.12: Arquitetura do padrão IEEE 802.15.4g.

des de maiores taxas de *bits* e maiores distâncias das comunicações, inclusive, com tamanhos de pacotes de até 2047 *bytes*, suficientes para carregar pacotes completos de IP em um quadro, sem a necessidade de implementação de fragmentação na camada de enlace [Muñoz et al. 2018 (i)].

Com relação às bandas de frequência alocadas para o IEEE 802.15.4g, estas abrangem vários domínios regulatórios, alguns dos quais são aplicáveis globalmente, enquanto outros são específicos da região ⁶. Na Tabela 2.4 são apresentadas as bandas de frequência consideradas no IEEE 802.15.4g.

Tabela 2.4: Bandas de frequência - IEEE 802.15.4g

Banda de frequência	Região
2400 - 2483.5 MHz	Mundo todo
863 - 870 MHz e 870 - 876 MHz	Europa
920 - 928 MHz	Estados Unidos, Canadá e Japão
470 - 510 MHz, 779-787 MHz e 920.5 - 924.5 MHz	China

O padrão IEEE 802.15.4g definiu três tipos de modulações para a camada física, as quais

⁶ A Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) liberou no Brasil o uso da faixa de 900 MHz através da resolução 680/2017.

foram (i) modulação por chaveamento por deslocamento de frequência, (ii) modulação por divisão ortogonal de frequência e (iii) modulação de deslocamento de fase em quadratura de deslocamento [Muñoz et al. 2018 (i)]. Esta última, compartilha as mesmas características constantes no IEEE 802.15.4-2006 [Hanes et al. 2017].

- **FSK:** modulação por chaveamento por deslocamento de frequência (FSK - *Frequency Shift Keying*) é um método de transmissão de sinais digitais onde os dois estados binários, lógica 0 (baixa) e lógica 1 (alta), são representados por uma forma de onda analógica. A lógica 0 é representada por uma onda em uma frequência específica e a lógica 1 é representada por uma onda em uma frequência diferente. A modulação possui baixas taxas de *bits*, que podem variar entre 5 kbps até 400 kbps [Sum et al. 2017]. A Figura 2.13 apresenta um exemplo de modulação FSK.

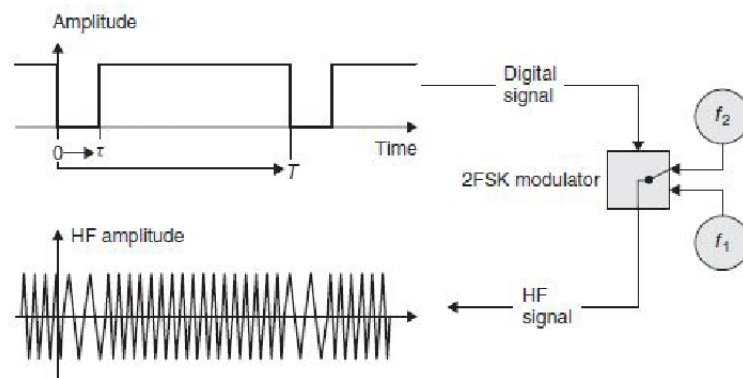


Figura 2.13: Modulação FSK. [Bilic e Ozdemir 2017]

- **OFDM:** modulação por divisão ortogonal de frequência (OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) consiste na divisão de sua banda em múltiplas portadoras ortogonais. As subportadoras não possuem sobreposição de frequências, o que faz com que não haja interferência umas nas outras. Devido a essa característica são chamadas de ortogonais [Muñoz et al. 2018 (i)]. A Figura 2.14 apresenta um exemplo de modulação OFDM.

b) Alcance das Transmissões

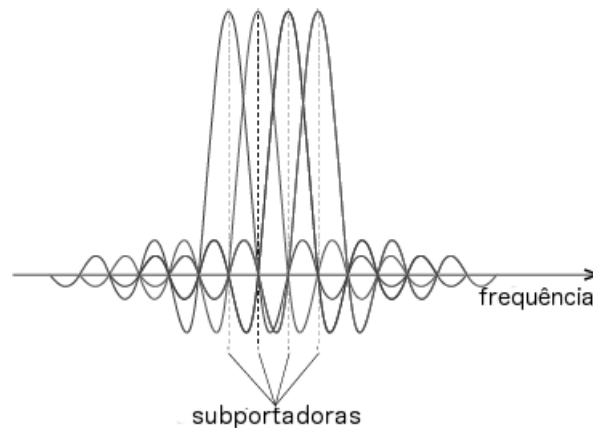


Figura 2.14: Modulação OFDM. [Al-jawhar 2017]

A emenda "g" surge com o objetivo, dentre outros, de atender a demandas de aplicações de comunicações de longa distância, as quais não eram previstas no projeto original do padrão IEEE 802.15.4. Assim, com a possibilidade de maiores distâncias para as comunicações, aumentou-se as possibilidades de aplicações do IEEE 802.15.4g [Chang e Mason 2012].

Nesse sentido, o alcance das transmissões pode variar consideravelmente dependendo de vários fatores, como linha de visão, nível de potência de transmissão, sensibilidade do receptor, interferências externas etc, o que pode vir a ser um desafio. Contudo, se no padrão IEEE 802.15.4 estavam disponíveis transmissões com alcances na ordem de dezenas de metros, na emenda IEEE 802.15.4g é possível se falar em centenas, e, em alguns casos, até mesmo na ordem de milhares de metros [Harada et al. 2017] [Muñoz et al. 2018 (i)].

c) Segurança das Comunicações

O IEEE 802.15.4g herda seus atributos de segurança do IEEE 802.15.4-2006. Portanto, a criptografia é fornecida pelo AES, com chave de até 128 bits, conforme já foi mencionado anteriormente. Em acréscimo ao cabeçalho auxiliar de segurança, definido no IEEE 802.15.4-2006, foi acrescentada também uma confirmação segura e um *Enhanced Beacon*, o que completa a segurança da camada MAC.

O quadro completo é autenticado através do código de integridade de mensagem (MIC - *Message Integrated Code*), localizado no final do quadro. O MIC é um valor único que é calculado com base no conteúdo do quadro. O campo cabeçalho de segurança (*Security He-*

ader), por seu turno, indicado na figura, é composto pelo campo auxiliar de segurança (*Auxiliary Security Field*) e um ou mais elementos de informação (*IE - Information Element*).

A integração dos elementos de informação permite a adoção de recursos de segurança adicionais, como a especificação do protocolo de gerenciamento de chaves (*KMP - Key Management Protocol*, constante no padrão IEEE 802.15.9, que fornece um meio para estabelecer chaves para a segurança de datagramas. A Figura 2.15 mostra um quadro de segurança.

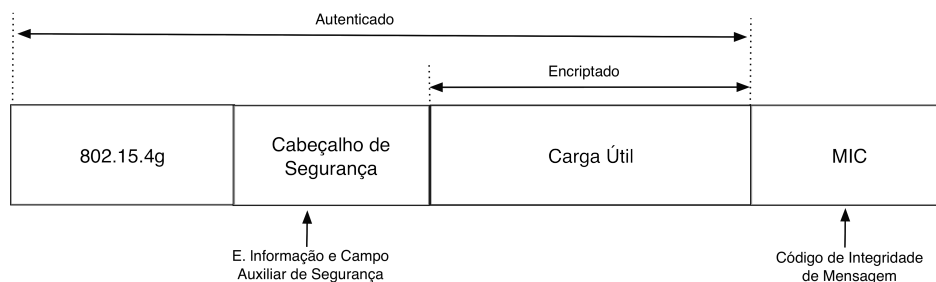


Figura 2.15: Quadro de Segurança da Camada MAC. [Hanes et al. 2017]

2.3.3 6LoWPAN

Diversos fabricantes implementaram o padrão IEEE 802.15.4 em seus produtos que, conforme foi dito, atende a diversas especificações. O IEEE 802.15.4 é amplamente utilizado em aplicações, como as já mencionadas redes utilitárias inteligentes de serviços públicos. Essas aplicações geralmente exigem vários nós de baixo custo se comunicando por vários saltos para cobrir uma grande área geográfica, devendo operar sem supervisão por anos e com baterias. Esses requisitos têm como alvo um conjunto de aplicativos muito diferentes das tecnologias de redes sem fio de área pessoal (WPAN - *Wireless Personal Area Network*), como o *Bluetooth*, que eliminam a fiação de fones de ouvido, controladores de jogos e de dispositivos pessoais. Conseqüentemente, os recursos do IEEE 802.15.4 são mais limitados do que outros WPANs e de redes locais sem fio WLANs (WLAN - *Wireless Local Area Network*), pois eles têm tamanhos de quadro pequenos, reduzida largura de banda e baixa potência de transmissão. Além disso, os microcontroladores normalmente acoplados aos rádios LR-WPAN têm memória e potência de computação limitadas. Essas restrições levaram muitos fornecedores a adotar protocolos proprietários e soluções apenas de enlace,

como o *ZigBee*⁷, por exemplo, presumindo que o IP consumisse muita memória e largura de banda [Culler, Chakrabarti e Infusion 2009].

Diante disso, surgiu então o IPv6 sobre redes pessoais de baixa potência (6LoWPAN - *IPv6 over low-power personal area networks*), que é uma camada de adaptação⁸ para o transporte eficiente de pacotes IPv6 de ponta a ponta sobre uma camada física IEEE 802.15.4. Assim, quando a tecnologia não é proprietária, as camadas de adaptação são geralmente definidas pela força-tarefa de engenharia da Internet (IETF - *Internet Engineering Task Force*), que é um grupo informal internacional aberto, composto de técnicos, agências, fabricantes, fornecedores e pesquisadores, que se ocupam do desenvolvimento e promoção de padrões para Internet. A Figura 2.16 mostra a camada de adaptação 6LoWPAN.

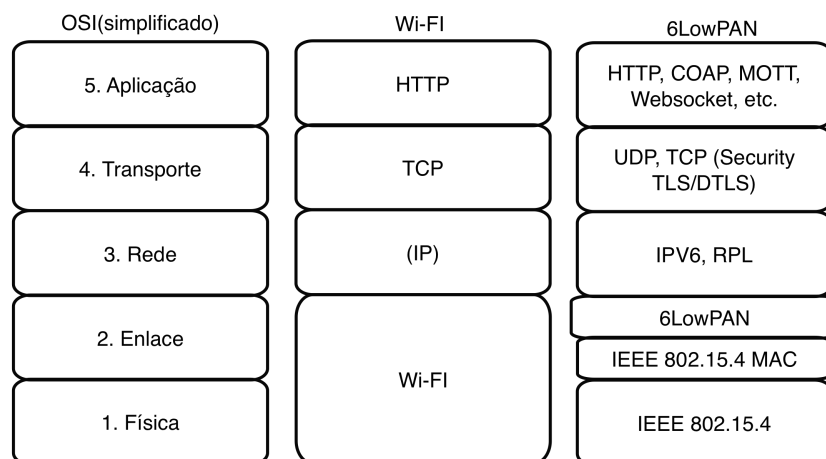


Figura 2.16: Camada de adaptação 6LoWPAN. [Olsson 2014]

Na arquitetura IP, qualquer forma de transporte de pacotes sobre a camada física ou sobre a camada MAC deve ser definida e documentada através das requisições para comentários (RFC - *Request for Comments*), que são publicações do IETF que oficialmente documenta padrões de Internet, especificações, protocolos, procedimentos e outros. Uma das RFCs mais importantes que o grupo de trabalho responsável pelo 6LoWPAN publicou foi a RFC6282, que define como é feita a transmissão dos pacotes IPv6 nas redes IEEE 802.15.4.

⁷ A especificação IEEE 802.15.4 geralmente é associada ao *Zigbee*, mas deve ser vista como uma entidade separada. Foi elaborado por um grupo de trabalho do IEEE como um WPAN de baixa taxa de dados, que descreve as camadas físicas e de enlace de dados que normalmente tratam de aplicativos de monitoramento e controle remotos [Bensky 2019].

⁸ Modelos de encapsulamento de IP dentro de camadas mais baixas são definidos como camadas de adaptação [Hanes et al. 2017].

Neste ponto, é importante mencionar que não existe padronização de camada de adaptação que descreva como transportar pacotes IPV4 sobre o padrão IEEE 802.15.4.

a) Compressão de Cabeçalho

Uma das tarefas mais importantes exercidas pela camada de adaptação 6LoWPAN é a compressão de cabeçalho. Conforme foi visto, a função de tal camada é permitir que pacotes IPV6 possam trafegar pelas camadas do padrão IEEE 802.15.4. Porém, para que isso possa acontecer é necessário haver adaptações para que o transporte dos referidos pacotes IPV6 funcionem corretamente. Uma dessas adaptações diz respeito ao tamanho da carga útil (*payloads*) dos cabeçalhos, que são diferentes tanto no IPV6 quanto no IEEE 802.15.4 [Shelby e Bormann 2011], onde, neste último, o tamanho é mais limitado.

Naturalmente que pacotes maiores poderiam ser enviados através do uso de técnicas de fragmentação e remontagem, porém, o 6LoWPAN se torna mais eficiente se houver o encaixe dos pacotes IPV6 dentro dos pacotes IEEE 802.15.4 [Olsson 2014], o que diminui o número de transmissões. Desta forma, optou-se então pela compressão de cabeçalhos, que é o meio de se conseguir maior eficiência, comprimindo-se os 40 bytes do IPV6 e 8 bytes do UDP em uma combinação de 6 bytes. A Figura 2.17 apresenta o processo de compressão.

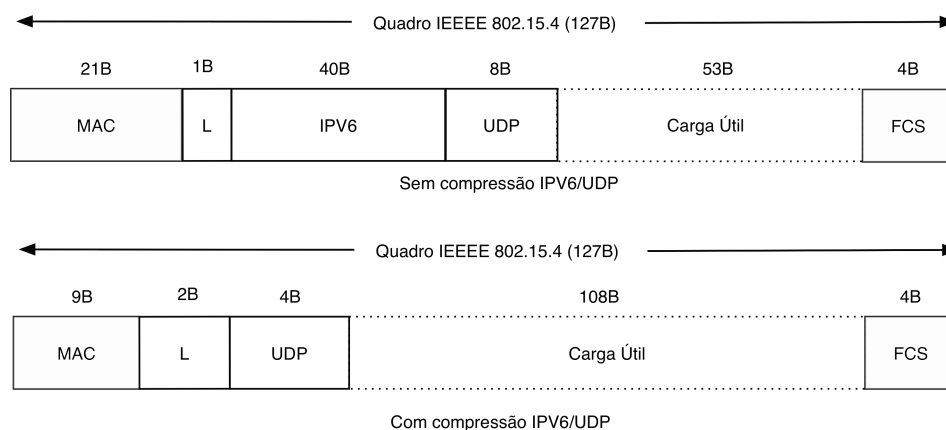


Figura 2.17: Compressão de cabeçalho em 6LoWPAN.[Shelby e Bormann 2011]

b) Fragmentação

A fim de ser possível a transmissão de quadros IPV6 sobre enlaces de rádio IEEE

802.15.4, os quadros do IPV6 devem ser divididos (fragmentados) em várias unidades menores [Olsson 2014]. Isto acontece porque a unidade máxima de transmissão (MTU - *Maximum Transmission Unit*) do IPV6 é de 1280 Bytes, enquanto o MTU do IEEE 802.15.4 é de apenas 127 Bytes. O mecanismo de fragmentação envolve o acréscimo de informações nos cabeçalhos gerados que irão ajudar no processo de remontagem dos fragmentos [Olsson 2014]. Essas informações, ao final desta etapa, são removidas e o pacote IPV6 é restaurado à sua forma original.

Por exemplo, um cabeçalho fragmentado em 6LoWPAN é composto por três campos adicionados no processo de fragmentação: (i) tamanho do datagrama (*datagram size*), (ii) *tag* datagrama (*datagram tag*) e (iii) deslocamento de datagrama (*Datagram Offset*). O primeiro especifica o tamanho total da carga útil não fragmentado. O segundo identifica o conjunto de fragmentos para a carga útil. O último, identifica, dentro de uma carga útil particular, o quão determinado fragmento se encontra distante (em Bytes) do primeiro cabeçalho e dos subsequentes. A Figura 2.18 mostra o processo de fragmentação em 6LoWPAN.

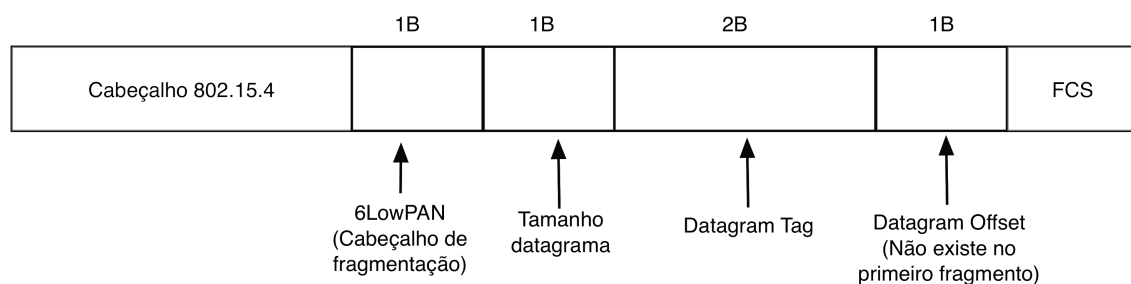


Figura 2.18: Fragmentação de cabeçalho. [Hanes et al. 2017]

A sequência da fragmentação tem forte dependência em relação à técnica de encaminhamento ou roteamento de pacotes, pois, ela irá mudar de acordo com o que for utilizado. Na técnica de encaminhamento em malha, por exemplo, os fragmentos são remontados apenas ao final do seu destino, enquanto que, na técnica em roteamento, os pacotes são remontados ao passar em cada salto [Olsson 2014].

c) Endereçamento em Malha

O objetivo da função de endereçamento de malha 6LoWPAN é encaminhar pacotes por vários saltos. Três campos são definidos para este cabeçalho: (i) limite de saltos, (ii) ende-

reço de origem e (iii) endereço de destino. O limite de saltos para endereçamento de malha fornece um limite superior de quantas vezes o quadro pode ser encaminhado. Cada salto diminui esse valor em 1 unidade à medida que é encaminhado. Quando o valor atinge 0, ele é descartado e não é mais encaminhado [Hanes et al. 2017]. Os campos Endereço de origem e Endereço de destino para endereçamento de malha são endereços IEEE 802.15.4, indicando os pontos finais de um salto de IP. A Figura 2.19 detalha os campos do cabeçalho de endereçamento de malha 6LoWPAN.

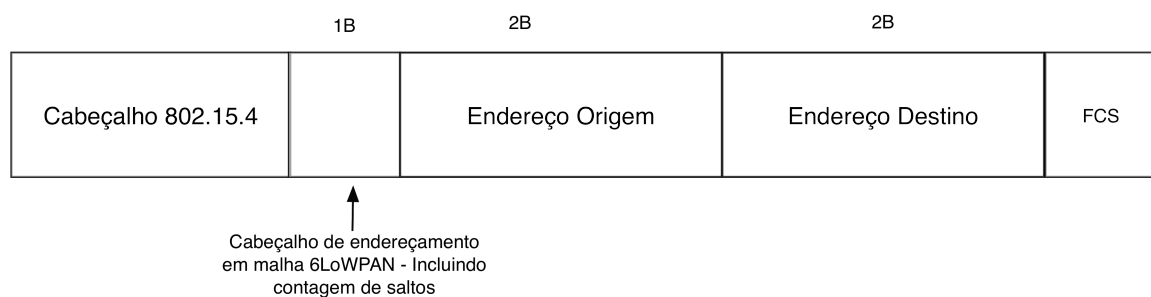


Figura 2.19: Cabeçalho de endereçamento de malha 6LoWPAN. [Hanes et al. 2017]

d) *Mesh-under e route-over*

Duas questões arquiteturais importantes para o 6LoWPAN são como os fatores no nível de enlace informam o roteamento e em que camada o encaminhamento de datagramas ocorre. Tradicionalmente, o roteamento IP ocorre na camada de rede de uma maneira amplamente independente dos enlaces subjacentes que implementam os saltos individuais. O 6LoWPAN, em seu papel de adaptação entre a camada 2 e a camada 3, pode oferecer suporte ao roteamento em qualquer camada [Culler, Chakrabarti e Infusion 2009]. A Figura 2.20 apresenta as duas abordagens.

Com o *mesh-under*, o roteamento de pacotes IP utiliza o cabeçalho de endereçamento de malha 6LoWPAN para rotear e encaminhar pacotes na camada de enlace. O termo *mesh-under* é usado porque vários saltos da camada de enlace podem ser usados para concluir um único salto de IP. Os nós têm uma tabela de encaminhamento da camada 2 que eles consultam para rotear os pacotes para seu destino final na malha. Um *gateway* de borda finaliza o domínio de malha inferior. O *gateway* de borda também deve implementar um mecanismo para efetuar a conversão entre o protocolo da camada 2 e qualquer outro mecanismo de

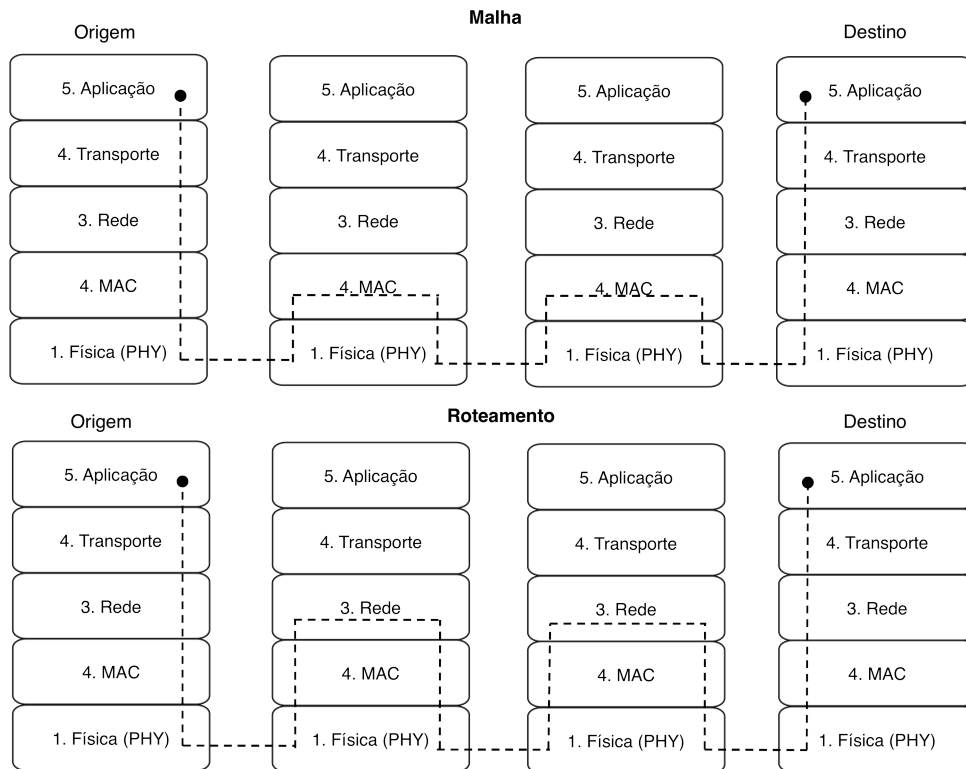


Figura 2.20: Endereçamento em malha inferior e rota. [Olsson 2014]

roteamento IP implementado em camada 3 [Hanes et al. 2017].

Como alternativa, o encaminhamento realiza o roteamento na camada 3, com cada nó servindo como um roteador IP. Podemos vê-lo como uma coleção de escopos locais de enlace sobrepostos, com cada domínio local de enlace definido pela conectividade de rádio inerente. Ao contrário do *mesh-under*, o *route-over* suporta mecanismos de encaminhamento da camada 3 no LoWPAN que podem utilizar os recursos da camada de rede definidos pelo IP, como roteamento IPv6 e ICMPv6 para configuração e gerenciamento. O encaminhamento também permite que os protocolos de roteamento IP abranjam diferentes tecnologias de enlace, permitindo uma melhor integração em redes de mais recursos. Ele também permite que protocolos baseados em IP restrinjam a comunicação IP à cobertura de rádio local, em vez de a um LoWPAN inteiro [Culler, Chakrabarti e Infusion 2009].

Cada uma dessas abordagens é possuidora de características próprias que podem ser interpretadas como vantagens e desvantagens, a depender do contexto de análise. No *mesh-under*, por exemplo, gera-se muito tráfego de rede devido aos fragmentos de pacotes e, por

isso, é indicado para redes menores. Porém, os saltos envolvidos não necessitam da quantidade de processamento que os saltos em *route-over* necessitam. Contudo, nesse último caso, gera-se menos tráfego de rede e diferentes tecnologias e fabricantes podem trocar dados [Olsson 2014].

2.3.4 Campos Comuns de Aplicação

As mudanças inseridas no padrão IEEE 802.15.4 pela emenda "g" ampliaram substancialmente os domínios de aplicação das tecnologias que se baseiam no IEEE 802.15.4g. Aliado a essa questão, os esforços pela interoperabilidade de tecnologias, promovidos pela *Wi-SUN Alliance*⁹, tem resultado em ações positivas em resposta às demandas dessa nova sociedade da informação da atualidade. Nesse sentido, são muitos os domínios de aplicação para tais tecnologias.

a) Redes Elétricas Inteligentes (REI)

Atualmente, está em andamento uma revolução no sistema elétrico, o qual permaneceu praticamente inalterado por mais de 100 anos. Os rápidos avanços na ICT são cada vez mais visíveis e integrados à várias camadas de infraestrutura do setor elétrico, cobrindo todos os aspectos da rede elétrica e suas operações correlatas. Além disso, estão surgindo dispositivos de redes inteligentes cujas interações com a IoT criam novos recursos no monitoramento e gerenciamento da rede elétrica e na interação entre suas partes interessadas. As inovações proporcionadas por tecnologias da informação integradas à rede elétrica e às interações das partes interessadas abriram o caminho para uma Rede Elétrica Inteligente que tira proveito de sofisticadas interações bidirecionais [Tsiatsis et al. 2018], [Rivera, Esposito e Teixeira 2013].

b) Cidades Inteligentes

Cidade Inteligente é uma frase que tem muitos significados e é usada em muitos contextos diferentes. É uma frase usada para cobrir soluções técnicas que abrangem a IoT, *big data* e aprendizado de máquina. No outro extremo, é uma frase usada para representar interações técnicas com os cidadãos e permitir uma melhor integração de objetivos sociais, ambientais, econômicos e políticos em diferentes regiões. Em resumo, a definição de Cidade

⁹<https://wi-sun.org/>

Inteligente é tão complexa quanto a definição de cidade em si - todos os países e regiões do mundo têm diferentes tipos de cidades e essas diferenças refletem os diferentes contextos dos habitantes e os diferentes ambientes em que as cidades se desenvolveram. Desta forma, não há definição universal de cidade e, como resultado, não há conceito universal de cidade inteligente [Tsiatsis et al. 2018].

Porém, em uma perspectiva mais técnica, o termo Cidades Inteligentes pode ser visto como cidades que fazem uso intenso de tecnologia para melhorar o crescimento econômico, bem estar dos moradores, promover sustentabilidade, dentre outros. Para que as Cidades Inteligentes sejam bem sucedidas, é preciso estabelecer uma plataforma de rede que ofereça conectividade confiável e que seja a principal prioridade. Mas, escolher a plataforma de rede certa pode ser um desafio. As cidades podem implantar várias plataformas de uso singular hoje, assim como já fazem para voz e dados. No entanto, a criação e o gerenciamento dessas redes adicionam custos, criam complexidade e inibem a interoperabilidade, o que habilitam *Wi-SUN* como uma das tecnologias propícias para serem empregadas nesta área [Reeves 2018].

c) Redes de Área de Campo

Redes de Área de Campo (FAN - *Field Area Network*) consistem de redes de comunicação que fornecem conectividade a um grande número de dispositivos espalhados ao longo de uma determinada área geográfica. Devido a essa característica, encontra ampla aplicação em diversas áreas, como na área de automação de agricultura [Chhaya et al. 2018], que necessita de diversas informações como condições climáticas, temperatura, umidade do solo, fertilidade etc. Com efeito, *Wi-SUN* vem sendo utilizada neste campo pelo fato de atender bem aos requisitos necessários que podem, inclusive, incluir diversas tecnologias provenientes de diferentes fornecedores para a composição do sistema.

Capítulo 3

ESTUDOS RELACIONADOS

Existem, na atualidade, diversos estudos cujo objeto são os padrões IEEE 802.15.4/4g. Muitos destes estudos se dedicam à avaliação de tecnologias, focando principalmente em questões voltadas a desempenho em diversas situações, estudos de modulações e comparativos entre os padrões IEEE 802.15.4/4g e outras tecnologias, como *LoRa*, por exemplo. Também são encontrados outros estudos voltados à área de confiabilidade, onde se identificam desde a proposição de novas topologias de rede até a proposição de novos modelos de protocolos.

3.1 Estudos de Avaliação de Tecnologias

Estudo na área de desempenho é descrito em [Righetti et al. 2019], ao utilizar modulação FSK e taxas de *bits* de 50 kbps em cenário urbano, semi-rural e rural. Os pesquisadores constataram que no primeiro cenário foram atingidas distâncias de 150 m, no segundo 250 m e no terceiro 800 m. Dessa forma, foi possível para eles avaliar como obstáculos, tais como prédios, árvores, distâncias e outros objetos exercem influência sobre a atenuação das comunicações externas.

Outro estudo de avaliação de desempenho do IEEE 802.15.4/4g/4e em ambientes externos é descrito em [Sum et al. 2017], com protótipos de transceptores com modulação 2GFSK e com potências 14 dBm e 24 dBm a depender das distâncias a serem cobertas e da necessidade de preservação da bateria. Foram verificadas taxas de *bits* e distâncias possíveis de serem atingidas, número de saltos necessários e limites de degradação do sinal ante obstáculos. Os resultados do estudo mostraram que comunicações eram possíveis em distâncias

de 450 m em linha de visão a taxas de *bits* de 50 kbps ou em edificações de concreto com limite de até 20 andares. Os pesquisadores concluíram que a *Wi-SUN* pode ser aplicada em ambientes do mundo real e proporcionar comunicações entre aplicações que tenham requisitos similares, a exemplo de comunicação máquina a máquina (M2M - *Machine-to-Machine*) ou em redes de sensores.

Um estudo minucioso é descrito em [Muñoz et al. 2018 (i)] para investigar se o IEEE 802.15.4g pode de fato ser utilizado em ambientes externos com nível de qualidade adequado. Os pesquisadores realizaram vários experimentos em diferentes cenários, em ambientes com linha de visão, ambientes urbanos e ambientes relevantes para aplicações de agricultura inteligente e aplicações de redes de medição inteligentes. Os pesquisadores avaliaram também todas as 31 configurações de camada física do IEEE 802.15.4g, concluindo que as maiores distâncias cobertas foram provenientes do uso de FSK com FEC (*Forward Error Correction*) e OQPSK. Além disso, os pesquisadores também constataram que OFDM é mais robusto no que diz respeito a interferências externas e efeitos de multipercursos.

Uma avaliação experimental e comparação acerca da robustez do OQPSK-DSSS (*Offset Quadrature Phase Shift Keying-Direct Sequence Spread Spectrum*) e do OFDM contra interferências foi realizado por [Tuset-Peiró et al. 2019], com o objetivo de fornecer uma análise abrangente do impacto que diferentes níveis de interferência produzem nessas modulações, em termos de taxas de entregas de pacotes (PDR - *Packet Delivery Ratio*) resultantes e dependendo do tamanho do pacote transmitido. Os pesquisadores concluíram que OFDM fornece pelo menos 6 dB de proteção adicional, independentemente do tipo de interferência e do comprimento do pacote. Além disso, constatam que OFDM ocupa apenas 1,2 MHz de largura de banda, enquanto o OQPSK-DSSS ocupa 5 MHz, o que resulta em uma eficiência espectral mais alta, que permite implantações mais densas ou negociar eficiência de largura de banda e robustez de interferência, dependendo dos requisitos da aplicação.

Resultados experimentais de um estudo de avaliação de duas tecnologias LPWAN para a conectividade de internet das coisas (IoT - *Internet of Things*), usando abordagem sistêmica, são apresentados em [Prando et al. 2019]. Utilizou-se no ensaio *LoRa* e *Wi-SUN* para efeitos comparativos. Os pesquisadores concluíram que utilizadores devem escolher criteriosamente a tecnologia que desejam utilizar, pois ambas possuem prós e contras, destacando que a tecnologia *LoRa* possui bom desempenho, pois se beneficia de sua largura de banda. Contudo,

segundo os pesquisadores, isto pode vir a ser, em alguns momentos, fator de conflitos com leis e órgãos regulatórios locais. Já a *Wi-SUN*, por sua vez, possui a grande vantagem de ser bastante robusta e bem documentada, além de ser padronizada pela norma aberta IEEE 802.15.4-2015.

Já em [Muñoz et al. 2018 (ii)] é descrito um estudo comparativo do desempenho de duas configurações diferentes de camada física do IEEE 802.15.4g, especificamente OQPSK e OFDM, no contexto de aplicações de automação residencial (*smart building*). Os experimentos foram realizados em ambiente interno, com teto metálico e paredes de concreto e janelas de vidro, com variações de posição dos nós receptores. Os pesquisadores concluíram que o OFDM é recomendado para aplicações de *smart building*, pois apresenta taxas de entregas de pacotes e alcance superiores ao OQPSK operando na banda de 2,4 GHz, especialmente em ambientes sujeitos a problemas de multipercorso e de interferência externa.

3.1.1 Discussão

Os estudos de avaliação de tecnologias guardam, de certa forma, vínculo simbiótico com estudos acerca de desempenho, o qual sempre será um dos objetivos a serem alcançados na construção de grande parte dos sistemas. Logo, conhecer as diversas tecnologias, principalmente em termos de semelhanças e diferenças, bem como desempenho, é primordial para o desenvolvimento científico tecnológico. Naturalmente que esses estudos devem ser executados de forma despida de quaisquer orientações diferentes das puramente técnicas.

Neste sentido, destaca-se o trabalho de [Tuset-Peiró et al. 2019] ao colocar em avaliação as modulações OQPSK-DSSS e OFDM do IEEE 802.15.4g como fatos a serem avaliados. Uma vez que interferências são fatores cruciais, principalmente no ambiente industrial, a relevância do estudo fica destacada. Decorre que os impactos de interferência não se restringem somente à indústria. A própria busca da construção de cidades inteligentes deve levar em consideração tal fator. Inclusive, cumpre destacar o estudo de [Muñoz et al. 2018 (ii)], que segue a mesma linha de investigação de [Tuset-Peiró et al. 2019].

Os estudos de [Prando et al. 2019], por sua vez, fazem comparativos entre diferentes tecnologias. E, da mesma forma, guardam em si sua devida importância, principalmente como meio de guiar o direcionamento da tecnologia adequada à resolução do eventual problema, já que cada tecnologia tem suas idiosincrasias. Destaca-se, no estudo, a proposta de utilização

da abordagem sistêmica, a qual é bastante discutida em [Bertalanffy 1975].

Percebe-se então, pelos estudos, que a avaliação de desempenho é também um processo contínuo que faz parte do desenvolvimento dessas tecnologias que estão em estudo, e que contribuem significativamente tanto do ponto de vista científico quanto de aplicabilidade no setor produtivo.

3.2 Estudos Acerca de Confiabilidade

Em [Tuset-Peiró et al. 2020] é descrita a avaliação de uma rede IEEE 802.15.4g em ambiente industrial, utilizando 11 nós finais e as três modulações definidas no padrão, isto é, FSK (*Frequency Shift Keying*), OQPSK (*Offset quadrature phase-shift keying*) e OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Obteve-se valores de indicadores de intensidade do sinal recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indication*), avaliação de canal livre (CCA - *Clear Channel Assessment*) e taxa de entrega de pacote. Os resultados mostraram muita variabilidade dos valores medidos devido a problemas de multipercurso e interferências externas, o que levou os pesquisadores a concluir que são necessários esquemas adicionais para que as comunicações LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) atendam a requisitos de confiabilidade no ambiente industrial. Na avaliação dos pesquisadores, as modulações por si só não garantem confiabilidade em tais ambientes, o que os leva a introduzirem o conceito de diversidade de modulação, que consiste nas replicações de pacotes utilizando diferentes modulações para atingir altas taxas de entrega, maiores que 99%, o que, segundo o estudo, minimizaria gastos de energia dos nós e atenderia a restrições regulatórias.

Outro estudo área de confiabilidade é encontrado em [Gomes et al. 2019], onde é proposto um novo protocolo para redes industriais de sensores sem fio (IWSN - *Industrial Wireless Sensor Networks*), o qual é denominado de protocolo multicanal adaptável e baseado em *beacon* (ABMP - *Adaptive and Beacon-based Multi-channel Protocol*). O protocolo proposto combina comunicação multicanal, estimativa de qualidade de enlace em tempo real e alocação dinâmica de canal, para lidar com os problemas que afetam a qualidade do enlace em ambientes industriais. Concluem os pesquisadores que a adaptação de canais é uma boa alternativa para se atingir alta confiabilidade na transmissão de pacotes *unicast*, quando a qualidade dos enlaces é continuamente monitorada. Dizem ainda que para pacotes transmi-

tidos em *broadcast*, o uso de salto de frequências *frequency hopping* é uma boa alternativa para lidar com variações espaciais na qualidade do canal. Por fim, dizem ainda que as estruturas de tempo usadas no ABMP permite a implementação de redes com menores atrasos e mais determinismo, o que pode ser útil para aplicações de tempo real.

Nessa mesma linha de confiabilidade encontram-se os trabalhos de [Azman, Panicker e Kashyap 2019; Godoi, Denardin e Barriquello 2019; Ivanov et al. 2018]. O primeiro estudo propõe uma rede de topologia linear simples e uma rede topologia em árvore, usando microcontroladores econômicos habilitados para comunicação sem fio. Os pesquisadores concluem o estudo destacando o potencial da topologia linear e topologias em árvore na aplicação em cidades inteligentes. Ainda, eles afirmam que para o funcionamento ideal das Cidades Inteligentes é essencial o desenvolvimento de infraestruturas de rede adequadas que possam atender às necessidades existentes.

O segundo estudo propõe um protocolo de comunicação denominado μ Net, o qual faz uso de mensagens de reconhecimento em transmissões ponto a ponto afim de reduzir o tamanho do *buffer* de rede e desperdício de energia para, assim, aumentar a confiabilidade da taxa de entrega de pacotes. Os pesquisadores afirmam que apesar de o μ Net ser mais lento em comunicações ponto a ponto, ele é mais confiável em entrega de dados fim a fim em ambientes com interferências do que outros protocolos usados na atualidade, mesmo em comparação com o protocolo de aplicativo restrito (COAP - *Constrained Application Protocol*) onde, afirmam, o protocolo proposto responde melhor que este último.

O terceiro e último estudo, por sua vez, propõe um modelo para calcular a confiabilidade de uma rede de sensores sem fio para o monitoramento de uma rede estatal de transmissão de gás, permitindo o desempenho no nível de probabilidade necessário de uma operação sem falhas até quando um certo número de módulos de sensores sem fio falharem. Os pesquisadores afirmam que o modelo proposto não somente calcula a confiabilidade da rede de transmissão de gás, mas também, devido a importância da indústria de gás, explora outros meios de otimizar o sistema para garantir níveis de confiabilidade.

Por fim, ainda encontramos em [Saeed et al. 2014] o estudo e proposição de uma solução de monitoramento de oleodutos e gasodutos denominado monitoramento confiável de oleodutos e gasodutos (REMONG - *Reliable Monitoring of Oil and Gas Pipelines*), com foco na detecção de vazamentos e comunicação através de rede de sensores sem fio. Concluem os

pesquisadores que o sistema investigado e proposto pode ser utilizado de forma eficiente no domínio em questão, com destaques para a possibilidade de estatísticas acerca da saúde do sistema monitorado.

3.2.1 Discussão

Estudos de confiabilidade tem forte aplicação em qualquer projeto, uma vez que faz parte da área de tolerância a falhas de sistemas. Conforme foi abordado no Capítulo 2, confiabilidade é a probabilidade que um sistema, elemento ou componente tem em desempenhar suas funções prescritas em determinadas condições e em um de intervalo de tempo. O aumento da confiabilidade e os fatores que podem contribuir para esse aumento são intrinsecamente importantes para o conhecimento científico tecnológico.

Os estudos em epígrafe destacam a importância de se realizar avaliações nas mais diversas condições. As diversas variáveis como obstáculos, modulações, interferências, dentre outros, podem exercer forte influência em diversos projetos como, por exemplo, os que se destinam a serem realizados no ambiente industrial. Nestes ambientes, o componente econômico, em grande parte dos casos, está presente, o que torna crítico o sucesso de qualquer projeto. Daí, conhecer previamente efeitos das diversas variáveis apontadas nos estudos também se torna um fim em si mesmo. O estudo de [Tuset-Peiró et al. 2020] revela essa importância, mormente quando afirma que as modulações por si só não garantem confiabilidade nos ambientes industriais.

Em [Gomes et al. 2019] destaca-se a proposição de um novo protocolo (ABMP). Nesse sentido, tal qual [Tuset-Peiró et al. 2020], existe uma constatação de fatos e também uma proposição de ideias para melhoramentos desses fatos, o que é uma contribuição científica. E assim, acontece nos demais estudos apontados.

Alguns dos estudos realizam um tratamento mais teórico do conceito de confiabilidade e de suas implicações em questões mais práticas, como em [Ivanov et al. 2018], voltado para o ambiente industrial. Com efeito, estudos dessa natureza podem ser estendidos para outros campos do conhecimento, como os de REI, por exemplo. De igual forma segue o estudo de [Saeed et al. 2014]. Nesse aspecto, é importante lembrar que a confiabilidade de um sistema tem também um lado econômico, principalmente no setor produtivo, pois o número de paradas de um sistema poderá estar diretamente conectado à lucratividade. Desta forma, a

confiabilidade é parâmetro de grande importância, pois muitos setores creditam seu sucesso aos níveis de confiabilidade atingidos, como a indústria aeronáutica, área de saúde, produção de energia e várias outras.

3.3 Considerações Finais

Pode-se constatar que os temas abordados relacionam-se entre si, não sendo possível dissociá-los, exceto para fins didáticos. Certamente que outros campos de discussão, além dos abordados, como o da segurança, por exemplo, existem e devem ser levados em consideração no propósito de maiores contribuições científicas para o saber atinente à área. Com efeito, é importante mencionar que os pontos discutidos tem forte apelo na fase mais relevante do ciclo de vida dos sistemas, que é a fase de projetos.

A fase de projetos é bastante crítica porque nela são definidas várias questões, como os custos. Então, questões ligadas a desempenho, tecnologia a ser utilizada, confiabilidade, segurança de dados, dentre outros devem, primordialmente, serem abordadas nesta fase. Contudo, não implica que elas não possam ser revisitadas em outras fases. O retorno à temas discutidos faz parte do ciclo de vida dos sistemas, o que é preconizado pela engenharia de software e abordado por [Pressman e Maxim 2016].

Posteriormente a fase de projetos vem a fase operação dos sistemas. Neste ponto as estratégias de tolerância a falhas se fazem de grande importância, pois, são elas que contribuirão para a confiabilidade do sistema. Existem muitos trabalhos que focam em ideias voltadas a replicação física de recursos, como em [Mohamed e Jawhar 2008], ou em preservação de energia, como em [Hussein, El-Nakib e Kishk 2017], em Redes de Utilidades em topologia linear. A contribuição principal deste trabalho é une essas duas ideias na medida em que são utilizados mecanismos que atuam diretamente nos valores de potência para mitigar falhas, trazendo vantagens como economicidade e preservação de energia.

Capítulo 4

MECANISMO PARA ADAPTAÇÃO DINÂMICA DE POTÊNCIA E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Diversas situações do cotidiano exigem que no projeto de uma determinada rede de utilidades se efetue a escolha de uma topologia mais adequada para a disposição física e funcionalidade dos diversos nós sensores de acordo, principalmente, com a situação específica em que se está trabalhando. Uma dessas topologias, que é bastante utilizada, é a topologia linear, cuja principal característica é a distribuição física dos nós sensores através de uma forma linear, podendo se estender de uma distância de centenas de metros a centenas de quilômetros [Varshney, Kumar e Swaroop 2018].

Nesta topologia, um nó é conectado ao outro diretamente. Portanto, a mensagem é enviada para o próximo nó e depois para o próximo e assim por diante, até atingir o destino final. Os dispositivos sem fio das redes de utilidades já trazem em si funcionalidades que dispensam a necessidade de transmissores e receptores duplicados, pois o mesmo equipamento pode trocar mensagens com quaisquer dos nós vizinhos, o que contribui, inclusive, para um projeto menos oneroso.

Existem diversos campos de aplicações para redes de utilidades em topologia linear, tais como monitoramento de linhas de transmissão em Redes Elétricas Inteligentes (REIs), monitoramento de gasodutos e oleodutos, monitoramento de estradas férreas (*railways*) [Varshney, Kumar e Swaroop 2018], dentre outros. A Figura 4.1 apresenta um exemplo de rede de

utilidades em topologia linear.

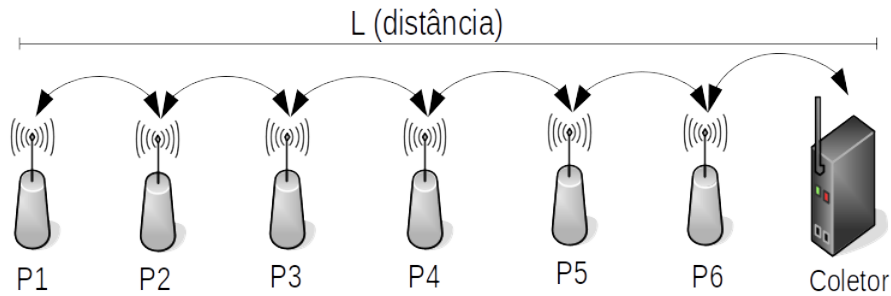


Figura 4.1: Topologia linear.

4.1 Estudo de Caso

Percebe-se, pela própria natureza da topologia linear, que existe grande interdependência entre os nós da rede, devido ao fluxo de informações necessariamente transitar por n nós que estejam entre o remetente e o coletor. Nesta disposição, a eventual falha em nós intermediários pode vir a comprometer a entrega satisfatória de mensagens, pois interrompe o caminho das mensagens. A Figura 4.2 representa a situação apontada.

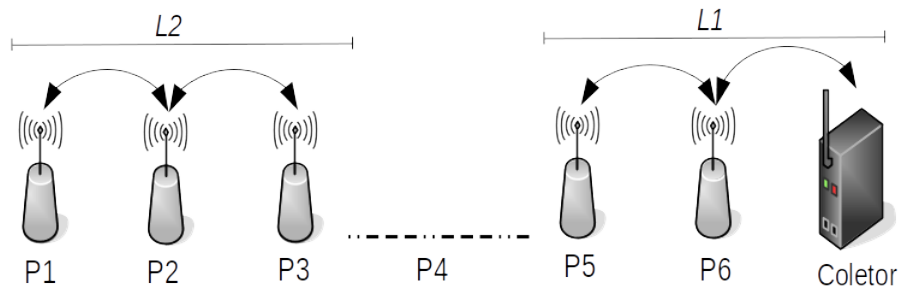


Figura 4.2: Topologia linear interrompida.

É possível constatar, pelo exemplo, que o nó P4 apresentou problemas, interrompendo assim todo o fluxo de informações entre os segmentos L2 e L1. A duplicação física de dispositivos por nó poderia ser uma solução para contornar situações desta natureza, uma vez que a falha em um dispositivo seria suprida pelo outro. Contudo, os custos de projeto se elevariam, uma vez que tal solução implicaria em utilização de mais dispositivos físicos.

Decorre então que é primordial a elaboração de mecanismos que estejam preparados para situações de falhas e que possam promover a sua recuperação em nós intermediários, de tal forma que não se venha a aumentar em demasiado os custos e ao mesmo tempo mantenha o funcionamento da estrutura com uma confiabilidade adequada, escolhendo a menor potência que apresente desempenho adequado no momento, visando garantir o funcionamento da rede, ao mesmo tempo em que tenta-se não provocar grande aumento no consumo de energia dos nós.

4.2 Mecanismo de Adaptação Dinâmica de Potência

A interrupção do fluxo de informações em uma rede de utilidades em topologia linear requer um mecanismo que esteja preparado para a recuperação de falhas em nós intermediários. Tendo como requisitos básicos a necessidade de manter a confiabilidade da rede em níveis satisfatórios e a eficiência energética, além de não se elevar custos mediante duplicação de dispositivos, uma solução adequada seria a adaptação dinâmica de potências de nós. Na medida em que a comunicação com algum nó da rede viesse a apresentar falhas, os nós vizinhos detectariam a falha de comunicação através de métricas de qualidade, tais como ARR (*ACK Reception Ratio*), definido como a razão entre o número de ACKs recebidos com sucesso e o número de pacotes transmitidos em um dado intervalo de tempo, e também do indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI - *Received signal strength indication*) e iniciariam o processo de recuperação através da adaptação dinâmica de suas potências de operação que, no caso, seria a elevação das mesmas a um nível em que fosse possível sobrepor o nó defeituoso, restabelecendo assim o fluxo de informações interrompido com qualidade aceitável. A Figura 4.3 ilustra o processo.

Considerando então, na situação apresentada, que se os nós P3 e P5 adaptassem suas potências de operação para níveis mais elevados, a comunicação entre os trechos L2 e L1 poderia ser recuperada. Cumpre mencionar que os nós P3 e P5 deveriam também efetuar o processo inverso de adaptação da potência ante a reposição (ou recuperação) do nó defeituoso que, na ilustração mencionada, é o P4.

Deve-se considerar na situação exemplo duas condições: a primeira diz respeito às funções dos nós de apenas encaminhar o fluxo de informações. Nesse caso não haverá maiores

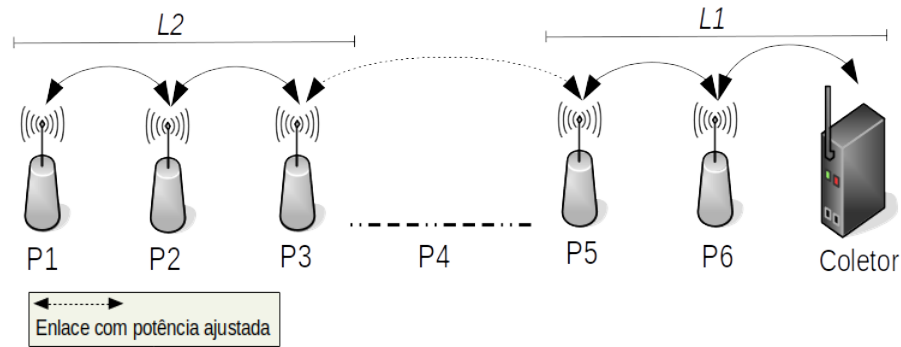


Figura 4.3: Topologia linear restabelecida.

efeitos negativos, pois cada nó é apenas encaminhador de mensagens. A segunda situação, por sua vez, acontece quando o nó, além de ser um encaminhador de informações, também é um produtor delas. Para esses casos, ao final, pelo menos uma leitura deixará de ser efetuada, que é a do nó defeituoso. Porém, o restante que estiver em bom funcionamento irá ter as suas informações consumidas adequadamente.

4.3 Avaliação Experimental

Nesta parte do trabalho é descrito o conjunto de experimentos realizados em uma rede experimental Wi-SUN/802.15.4g em topologia linear em ambiente aberto, composta por:

- nós sensores para a geração dos pacotes de rede;
- *gateway* para encaminhamento dos pacotes gerados pelos nós sensores; e
- banco de dados de séries temporais para armazenamento de informações e posterior análise dos pacotes.

A montagem prática de uma rede de testes serviu para avaliação do comportamento da mesma em ambiente realístico e para a coleta de dados, de modo que orientaram o desenvolvimento do mecanismo de adaptação de potência. Neste sentido, a avaliação de medidas de potências de transmissão, taxas de entregas de pacotes (PDR - *Packet Delivery Rate* e intensidade de sinal recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indication*) foram métricas importantes para as análises.

4.3.1 Cenário Utilizado

O cenário de realização do experimento, conforme mostra a Figura 4.4 e Figura 4.5, foi o Campus I da Universidade Federal da Paraíba (UFPB)¹. O experimento consistiu na construção de uma rede Wi-SUN/802.15.4g com topologia linear, composta de quatro nós, sendo três nós sensores, produtores de informação, e um *gateway*. Os nós sensores foram instalados em postes de energia em altura aproximada de 3 metros em relação ao solo. O *gateway* foi instalado no interior da Superintendência de TI da UFPB. As distâncias aproximadas entre os nós podem ser conferidas nas figuras apresentadas. Outras fotos do cenário adotado neste trabalho podem ser encontradas no apêndice deste trabalho.



Figura 4.4: Rede Wi-SUN/802.15.4g em topologia linear.

4.3.2 Material Utilizado

Os hardwares utilizados na construção dos nós da rede 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,

¹www.ufpb.br



Figura 4.5: Planta baixa do cenário.

no qual não foi utilizado o mini computador, uma vez que ele não recebia pacotes, apenas transmitia. Detalhes dos componentes de *hardware* são descritos 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, operando a 48 MHz. O kit possui um conjunto de recursos periféricos que inclui um controlador exclusivo de sensor de potência ultra baixa. Este controlador de sensor é ideal para interface de sensores externos e para coletar dados analógicos e digitais de forma autônoma enquanto o restante do sistema está no modo de suspensão. É destinado a aplicações sem fio que exigem baixo consumo de energia e longo alcance de comunicação. Permite também 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, implementando, portanto, o padrão IEEE 802.15.4g. A Figura 4.6 mostra a placa utilizada.
- **Raspberry Pi 3:** O Raspberry Pi é um minicomputador de baixo custo com dimensões aproximadas as de um cartão de crédito, cuja criação teve como objetivo inicial o emprego em áreas didáticas de ensino de ciência da computação. Pela sua capacidade de interagir com o mundo exterior, tem sido usado em uma ampla variedade de projetos, que vão desde a IoT até usos mais especializados, como estações meteorológicas. O equipamento possui como sistema operacional uma distribuição Linux customizada e conhecida como *Raspbian*. A Figura 4.7 mostra o minicomputador.



Figura 4.6: Nó montado com CC1310.

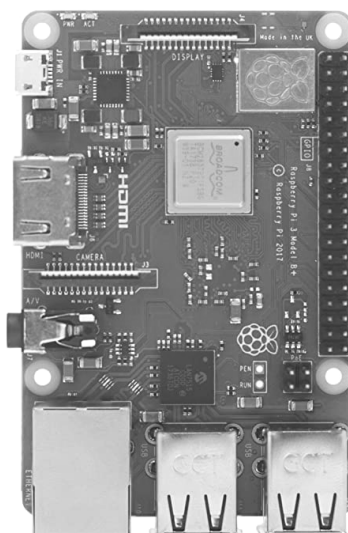


Figura 4.7: Minicomputador Raspberry PI.[raspberrypi.org]

Foram também utilizados softwares que serviram para programação dos kits utilizados, scripts de coleta dos dados escritos na linguagem *Python*, bem como para a construção de um banco de dados, usando o sistema gerenciador de bancos de dados de séries temporais *InfluxDB* para o armazenamento dos dados coletados. Seguem detalhes:

- **Code Composer Studio (CCSTUDIO):** O CCSTUDIO é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE - *Integrated Development Environment*) que suporta o vasto catálogo de microcontroladores e processadores embarcados da *Texas Instruments*. O

CCSTUDIO compreende um conjunto de ferramentas usadas para desenvolver e depurar aplicativos incorporados. Ele inclui um compilador C/C++ otimizado, editor de código-fonte, ambiente de criação de projeto, depurador, criador de perfil e outros recursos. A IDE intuitivo fornece uma interface única que conduz o usuário por cada etapa do fluxo de desenvolvimento das aplicações.

- **Scripts Python:** Foram construídos scripts em Python tendo como finalidade gravar tanto os dados dos nós quanto de encaminhar os dados do *gateway* para o armazenamento no banco de dados.
- **InfluxDB:** É um banco de dados de séries temporais e de código aberto escrito na linguagem Go. Ele foi otimizado para armazenamento e recuperação rápida de dados. Além disso, oferece alta disponibilidade de dados de séries temporais utilizadas em áreas de monitoramento, métricas de aplicativos, dados de sensores de IoT em tempo real. Também possui recursos de gravação e consulta com uma interface de linha de comando, uma API HTTP integrada, um conjunto de bibliotecas clientes (por exemplo, Go, Java e JavaScript) e plug-ins para formatos de dados comuns, como Telegraf, Graphite, Collectd e OpenTSDB .

4.3.3 Execução do Experimento

A execução do experimento consistiu das etapas que partiram da escolha do cenário adequado, montagem física da Rede e Utilidades de teste Wi-SUN/802.15.4g até a coleta dos dados gerados pelos nós. Os nós 1, 2 e 3 foram configurados para gerar um novo pacote a cada 30 segundos. Na aplicação implementada, cada pacote é transmitido separadamente nas potências de 5 dBm, 8 dBm, 11 dBm e 14 dBm. O valor da potência usada na transmissão de cada réplica do pacote é armazenado no *payload* e essa informação também é gravada nos arquivos de registro, localizados nos nós intermediários, e no banco de dados (no caso da recepção pelo *gateway*).

Foi elaborado um esquema temporal simplificado para evitar colisões onde cada nó que envia/repassa um pacote aguarda por um intervalo de até 500ms determinado de forma aleatória e somado ao tempo total que aguardou anteriormente. Cada nó da rede somente encaminhava pacotes de nós que estivessem mais distantes do *gateway*. Por exemplo, o nó 2

somente encaminhava pacotes vindos do nó 3. O nó 1, por sua vez, encaminhava apenas pacotes advindos dos nós 3 e 2. Esse funcionamento foi assim idealizado para permitir o estudo das transmissões dos nós mais distantes do *gateway* e ao mesmo tempo evitar a geração de informações sem importância para o estudo.

Os valores gravados no banco de dados e nos arquivos de cada nó² foram de RSSI, destino final do pacote, origem do pacote, número de sequência do pacote e potência de transmissão. Especificamente, cada pacote recebeu o mesmo número de sequência para todas as potências em que era transmitido. Por meio dos valores de sequência gravados e conhecendo-se previamente os valores de quantidades de pacotes transmitidos em uma determinada potência, foi possível fazer os devidos cálculos de taxas de entregas de pacotes e RSSI médio.

A coleta de dados se deu em duas etapas, executadas em momentos diferentes. Na primeira etapa, foram coletados dados por aproximadamente 7 horas. Na segunda, foram coletados dados por cerca de 21 horas.

4.3.4 Resultados e Discussão

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados dos experimentos obtidos a partir dos dados provenientes da rede de testes. Inicialmente, observa-se na Tabela 4.1, bem como na Figura 4.8, os valores de PDR coletados para cada enlace e potência empregados.

Tabela 4.1: Taxa de entrega de pacotes.

Enlace/potência	5 dBm	8 dBm	11 dBm	14 dBm
3→2	81%	92%	95%	96%
3→1	1%	1%	0%	0%
2→1	2%	11%	28%	46%
3→G	0%	0%	2%	12%
2→G	42%	66%	63%	88%
1→G	87%	98%	98%	98%

²Os arquivos podem ser encontrados em um repositório público <https://github.com/GComPI-IFPB/WiSun-Linear-Traces>.

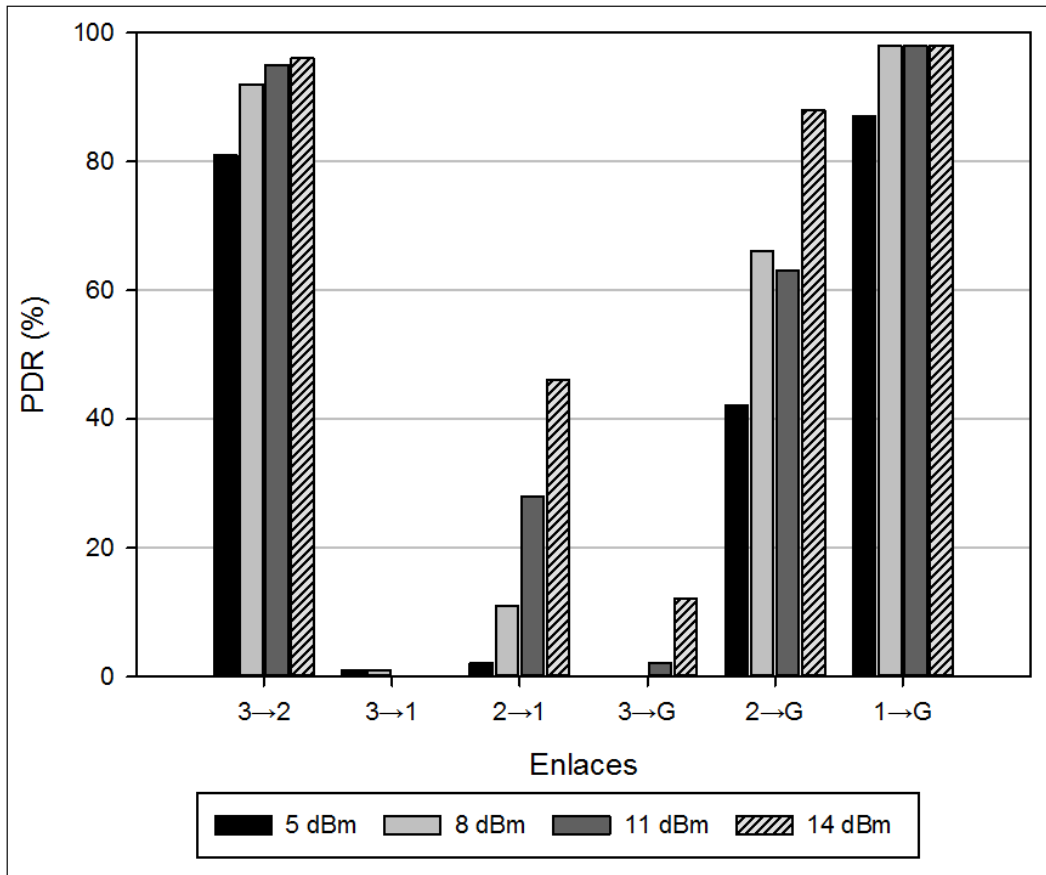


Figura 4.8: Valores de taxas de entrega de pacotes.

Pode-se observar que o nó 3 tem dificuldades em se comunicar diretamente com o *gateway*, uma vez que tal nó estava 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%. Mesmo aumentando-se o valor de potência para o máximo disponível de 14 dBm, o melhor valor de PDR ficou em torno de 11%. O RSSI, para este enlace, indica baixa qualidade, conforme pode ser visto na Tabela 4.2 e na Figura 4.9. Assim, no cenário e na topologia considerados, pode-se concluir que estando o nó a uma distância de 167 m, é possível sobrepor os nós 2 e 1 utilizando a potência de 14 dBm, porém, com qualidade baixa.

Por outro lado, o nó 2, mesmo estando a 124 m do *gateway*, consegue se comunicar com este diretamente na potência de 5 dBm, sobrepondo o nó 1. O nó 1, estando mais próximo do *gateway*, obteve resultados satisfatórios (PDR > 90% nas potências acima de 5 dBm),

Tabela 4.2: Valores de RSSI médios e Desvio Padrão (σ).

Enlace/potência	5 dBm	σ	8 dBm	σ	11 dBm	σ	14 dBm	σ
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

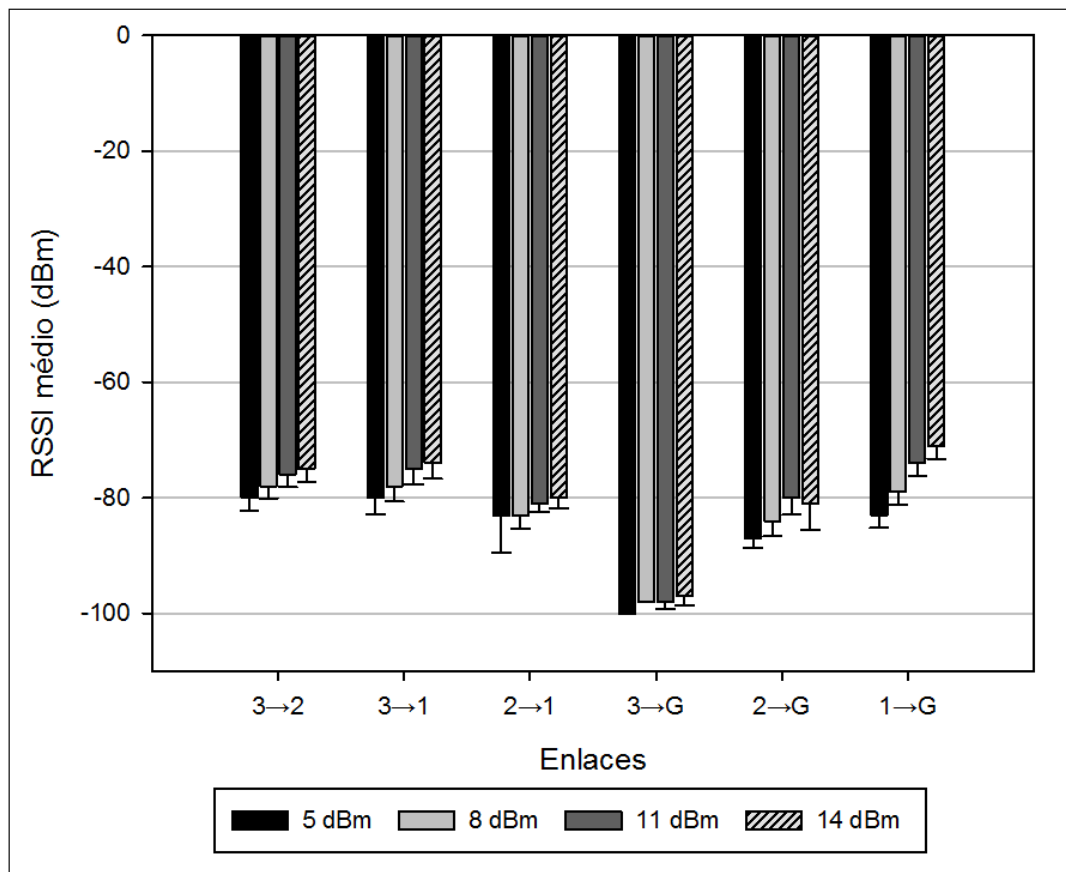


Figura 4.9: Níveis de RSSI (médio).

conforme já era esperado e pode ser observado nos gráficos, que inclusive demonstram a tendência de melhora da qualidade da comunicação a medida que se aumenta a potência.

Destaca-se que as comunicações diretas entre o nó 3 e *gateway* (sobreponto o nó 2 e

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. Atribui-se esse acontecimento a 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. No entanto, esse acontecimento apontado, a despeito de ter sido inesperado, serve para ilustrar que mesmo as comunicações do nó 3 e nó 2 com o nó 1 tendo sido prejudicadas, as comunicações daqueles nós (nó 3 e nó 2) com o *gateway* aconteceram, sobrepondo os nós intermediários.

Conforme exposto, os resultados apresentados até este ponto foram resultados gerais acerca das comunicações na rede em estudo. Ou seja, foi analisado o comportamento da rede de modo geral em termos de PDR e RSSI, conforme os gráficos apresentados mostraram, bem como também foram analisadas as comunicações diretas entre nós e vizinhos e os mais distantes.

4.4 Simulação Realista

Com o objetivo de avaliar a proposta do mecanismo de adaptação de potência, foi desenvolvido um simulador em Python, baseado no trabalho de [Gomes, Tuset-Peiró e Vilajosana 2020]. Diferentemente do trabalho dos pesquisadores, que tem foco no conceito de diversidade de modulação e utiliza um conjunto de dados de cálculos de PDR para diferentes modulações e nós a cada 5 minutos, neste trabalho, utiliza-se um conjunto de dados de cálculos de PDR para cada 10 minutos para diferentes enlaces e potências, porém se diferencia também do trabalho dos pesquisadores por explorar a adaptação de potência e não Diversidade de Modulação. Mas, da mesma forma que o trabalho dos pesquisadores, o simulador construído, baseado no PDR, determina se cada pacote transmitido e o seu reconhecimento é entregue com sucesso ou não. Quando um pacote de reconhecimento não é recebido, seja pela falha na transmissão do pacote ou na falha de recepção do ACK, o nó pode retransmitir o mesmo pacote de acordo com um número previamente estabelecido e permitido para efetuar novas tentativas de entrega. Ainda seguindo a metodologia descrita em [Gomes, Tuset-Peiró e Vilajosana 2020], neste trabalho também se destaca que como no conjunto de dados os pa-

cotes são transmitidos sem reconhecimentos, nas simulações os valores calculados do PDR também são usados para determinar o PDR das transmissões dos pacotes ACK. Logo, as seguintes suposições são feitas: (i) os PDRs das duas direções dos links são iguais, o que significa que os links são simétricos; (ii) os pacotes adicionais gerados pelo uso do reconhecimento não causam influência significativa no valor de PDR, pois a ocupação geral do canal é baixa. Com efeito, não se espera alto impacto no desempenho causado pela auto interferência, mesmo com os pacotes de reconhecimento adicionais necessários para a estratégia de seleção de potência. Além disso, usando o reconhecimento, o número de retransmissões pode ser reduzido, uma vez que nenhuma retransmissão cega é feita.

4.4.1 Estratégias para Seleção de Potência de Transmissão

O mecanismo de adaptação de potência deve utilizar estratégias que objetivem executar a seleção da potência de transmissão adequada. Essas estratégias de seleção de potência avaliam métricas, dentro de uma janela ω de tempo, que servem de base para a tomada de decisão pelo algoritmo. Neste trabalho foram construídas duas estratégias baseadas em métricas diferentes³, uma baseada em decisão por PDR e outra baseada em decisão por ARR, o qual se define como sendo a razão entre o número de ACKs recebidos com sucesso pelo número de pacotes transmitidos em um determinado intervalo.

O primeiro algoritmo construído para o simulador, com decisão de seleção de potência baseada em PDR, denominado *AP4-Best*, procura selecionar a menor potência que conseguir ser igual ou superar um limiar t de PDR, que é um parâmetro de avaliação das regras de funcionamento do mecanismo de adaptação de potência e cujo valor utilizado neste trabalho foi o de $t=0.9$, uma vez que um PDR de 90% na camada física fornece um PDR médio na camada de aplicação de 99% e 99,9% ao usar 2 e 3 tentativas de transmissão (nas simulações deste trabalho foram utilizadas 5 retransmissões), respectivamente [Gomes, Tuset-Peiró e Vilajosana 2020]. Este comportamento do algoritmo foi modelado desta forma por dois motivos principais: (i) estabelecer o PDR adequado (de acordo com t); (ii) procurar manter a eficiência energética.

Foi prevista também a possibilidade da existência de situações em que nenhuma das potências viesse a conseguir atingir um PDR cujo valor fosse igual ou superasse o valor

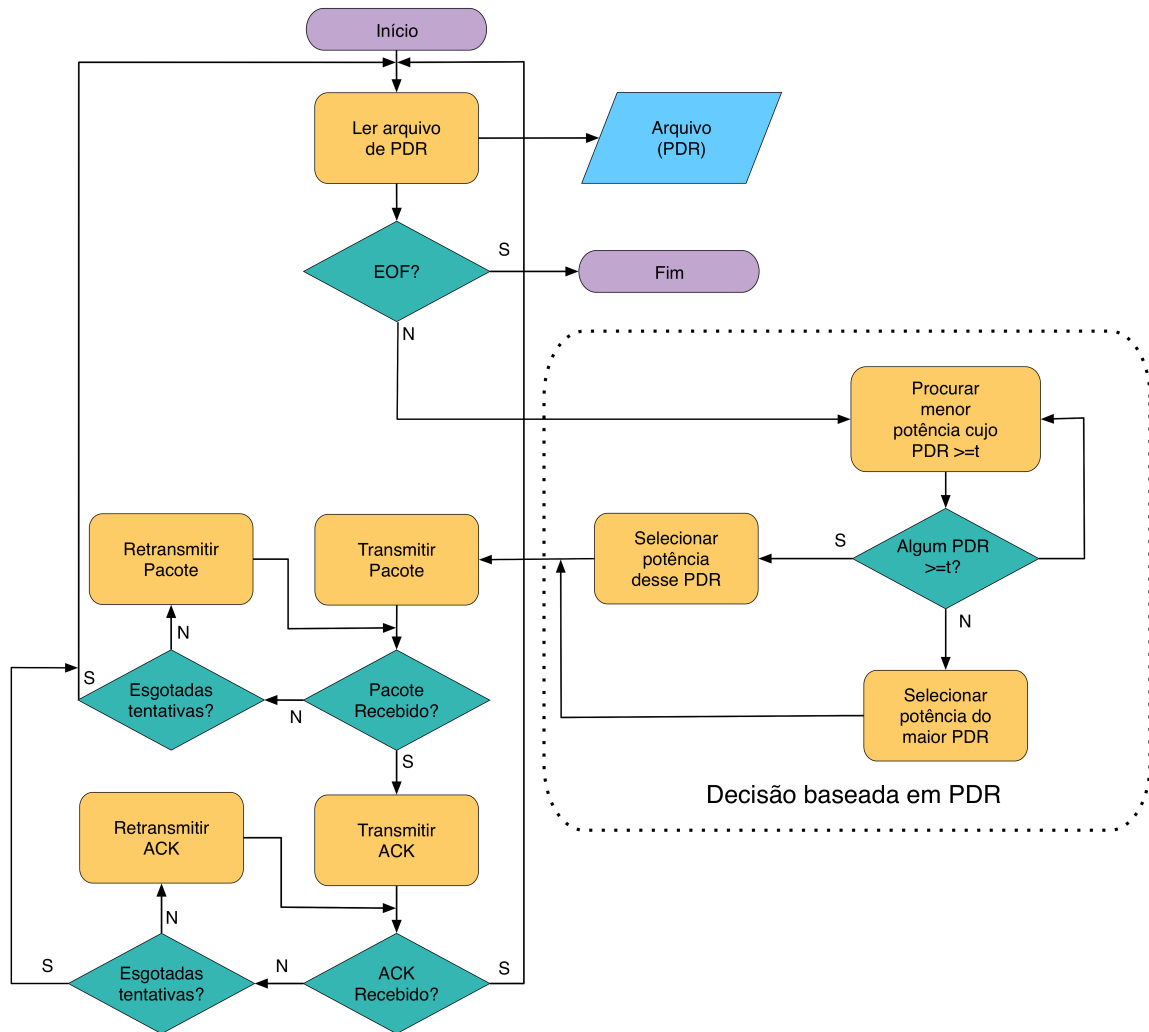
³Os trabalhos estão em repositório público https://github.com/fredsaraiva/sun_802.15.4g

de t . Para estes casos, especificamente, o comportamento previsto para o algoritmo foi o de selecionar a potência cujo PDR fosse máximo em comparação aos valores de PDR das respectivas outras potências.

Cumprir mencionar que a estratégia em estudo, isto é, com métrica baseada em PDR, tem difícil aplicação em cenários práticos, pois a decisão depende de um longo histórico de valores de PDR, que devem ser guardados e consultados, para assim o algoritmo decidir qual seria a melhor potência a atender os requisitos de t . Além disso, é uma estratégia que deixa ao encargo do nó receptor a decisão de adaptar potência, o que pode levar a avaliações imprecisas de enlaces ociosos [Baccour et al. 2012]. Assim, a estratégia tem um valor maior, neste estudo, para conhecimentos teóricos. A Figura 4.10 apresenta o fluxograma do algoritmo.

Em razão das questões anteriormente abordadas a respeito da estratégia que utiliza como métrica os valores de PDR, um segundo algoritmo, que utiliza como métricas valores de ARR, foi construído para o simulador. Tal algoritmo foi denominado de *AP4-ARR*. Os valores de ARR são calculados para uma determinada potência com base apenas nos pacotes transmitidos usando essa potência específica. Ao contrário do *AP4-Best*, o *AP4-ARR* não necessita de armazenar históricos de valores de ARR a serem posteriormente consultados, bastando, apenas, o cálculo do valor da métrica dentro da janela ω . Assim, é possível a utilização dessa estratégia em cenários práticos. A Figura 4.11 apresenta o fluxograma do algoritmo.

O comportamento do *AP4-ARR* é sempre procurar aumentar gradativamente a potência atualmente em uso sempre que os valores de ARR se localizarem abaixo de um limiar t estabelecido de ARR. Assim, se durante a operação do nó o valor de ARR desce abaixo de t , o *AP4-ARR* aumenta a potência até que o valor de ARR fique igual ou maior que t . Por outro lado, sempre que o ARR se mantém superando o valor de t em um intervalo de tempo estabelecido, o *AP4-ARR* procura diminuir gradativamente a potência até um valor de potência mínima que proporciona o valor de ARR igual ou superior a t . Esse comportamento foi assim estabelecido para procurar se manter a eficiência energética dos nós impedindo que os mesmos operem desnecessariamente com valores de potência acima do necessário.

Figura 4.10: Algoritmo *AP4-Best*.

4.4.2 Resultados e Discussão

Foi realizada também uma outra análise sobre os dados coletados da rede de testes, cujos resultados serviram posteriormente de entrada para o *AP4-Best*. O objetivo foi o de verificar variações temporais de PDR durante janelas de tempo pré determinadas de 10 minutos, e testar a implementação da adaptação de potências no simulador baseadas nos valores de PDR. Como previamente se sabia que a cada minuto são produzidos dois pacotes, logo foi possível concluir com segurança que a janela de tempo analisada de 10 minutos correspondia a quantidade de análise de 20 pacotes por janela. Nesse sentido, verificou-se os valores de PDR em cada janela de tempo para cada enlace e para cada potência em questão. Os

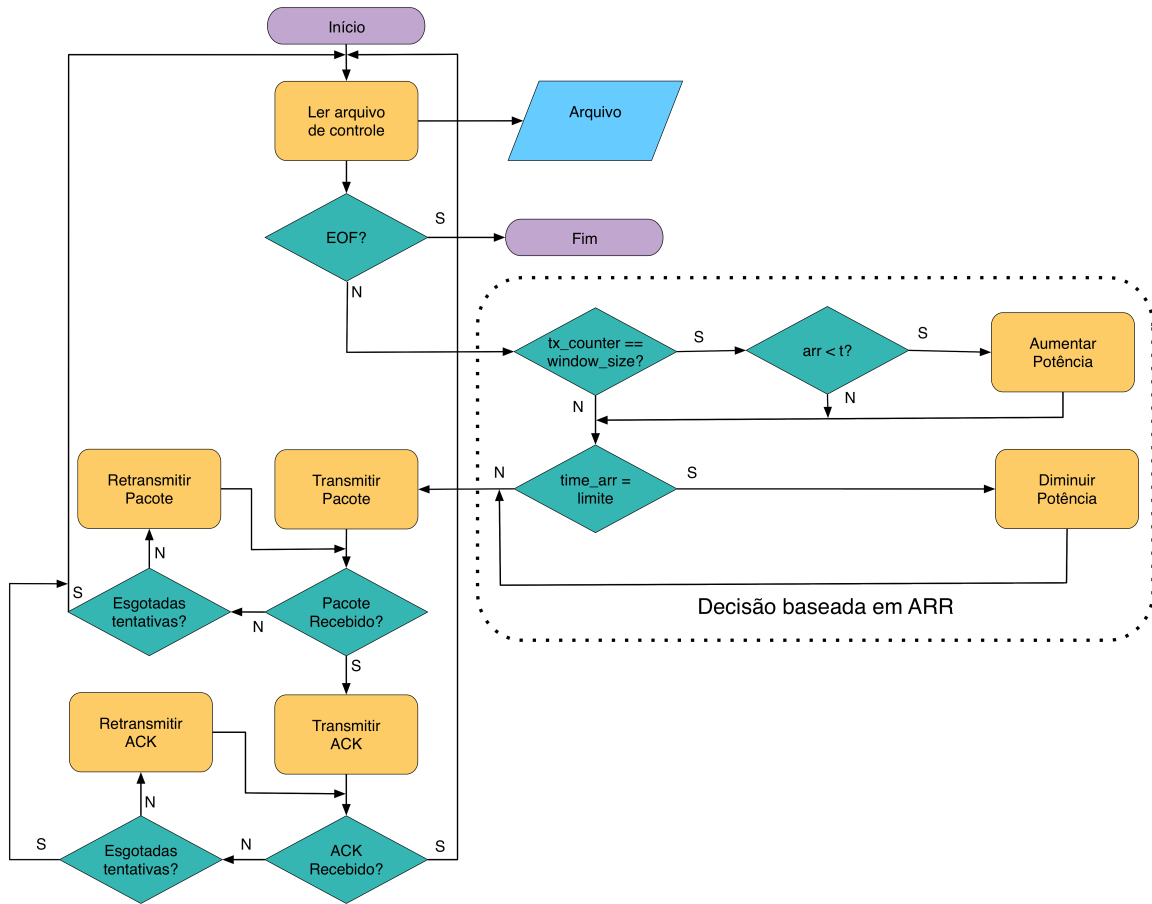


Figura 4.11: Algoritmo AP4-ARR.

resultados mostraram que ocorreram, no experimento realizado, importantes variações do PDR ao longo do período de transmissão considerado, como ocorreu, por exemplo, no enlace do nó 3 para o nó 2, conforme a Figura 4.12 mostra.

Podemos observar que mesmo sendo nós vizinhos, ocorrem variações importantes nos valores de PDR para os diferentes valores de potência. Em seguida, relacionado a Figura 4.13, podemos perceber a dificuldade de comunicação do nó 2 com o nó 1. Mas, isto se deve ao já anteriormente mencionado problema que atingiu o nó 1, que foi o resultado de sua instalação. Com efeito, o enlace 3→1 não gerou resultados que pudessem ser registrados. Assim, não foi apresentado.

As variações temporais ocorridas nas comunicações entre o nó 3 e o *gateway* são mostradas na Figura 4.14. Porém, devido à distância em que os referidos nós se encontravam,

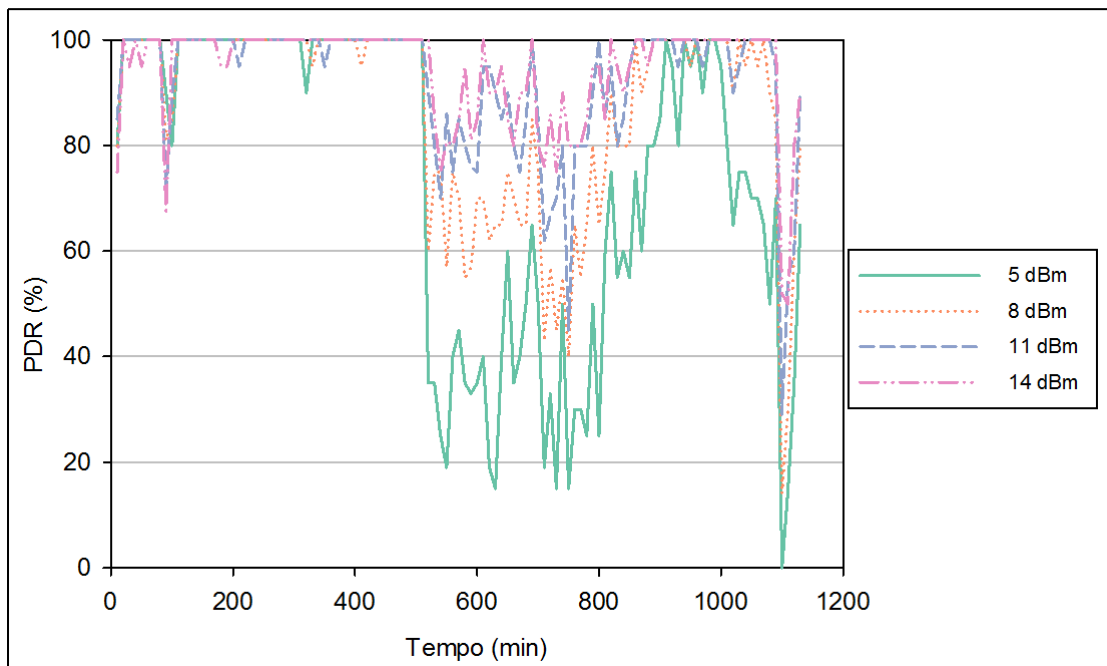


Figura 4.12: Variação temporal do PDR para o enlace 3→2.

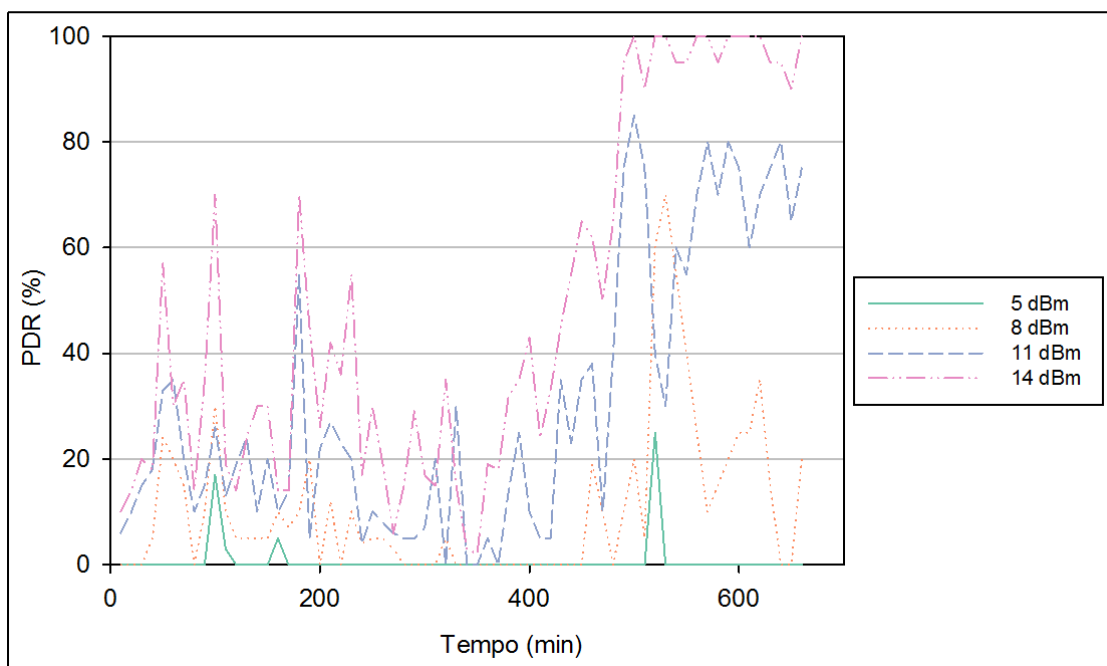


Figura 4.13: Variação temporal do PDR para o enlace 2→1.

conforme foi dito anteriormente, as comunicações foram de baixa qualidade, com PDR máximo ao redor de 50% para a potência de 14 dBm, em algumas janelas analisadas.

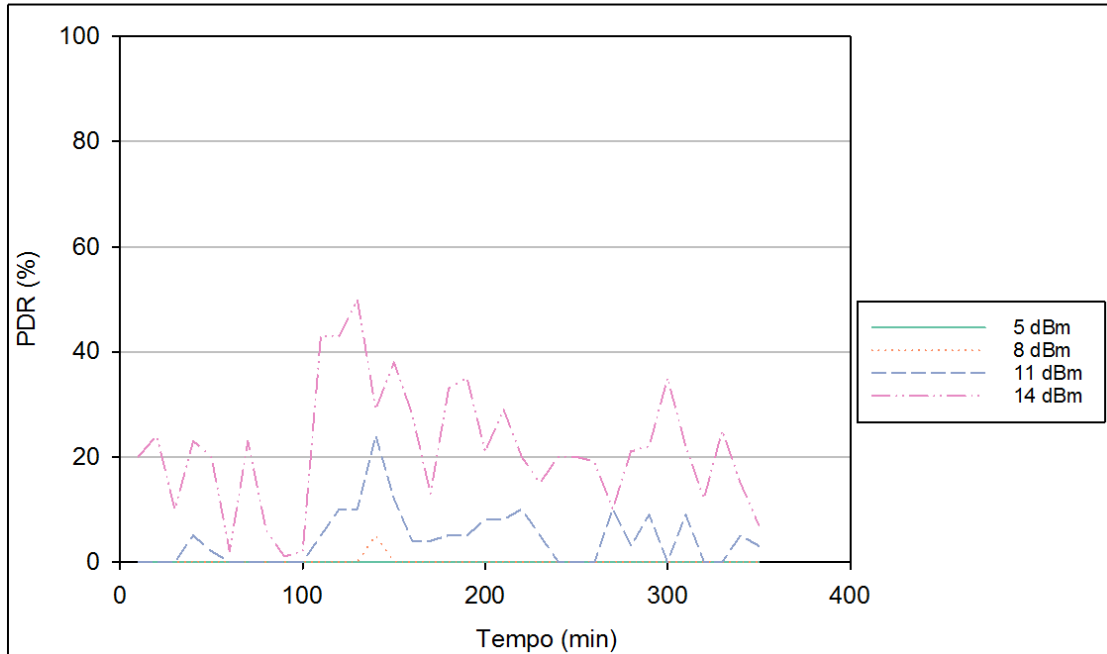


Figura 4.14: Variação temporal do PDR para o enlace 3→G.

Na Figura 4.15, observam-se acentuadas variações temporais do PDR principalmente nas potências mais baixas (5 dBm e 8 dBm). Os melhores resultados para este enlace ocorreram na potência de 14 dBm. Pode-se perceber que durante o período de observações, em parte do intervalo, é notória a degradação do sinal, o que pode também indicar interferência externa proveniente de fonte desconhecida.

Já na Figura 4.16, vemos as comunicações que ocorreram entre os nós 1 e *gateway*. Como esperado, observam-se boas qualidades de comunicações entre estes nós, devido principalmente a distância entre eles e posição de instalação do nó. Os melhores resultados (PDR > 90%), na maior parte do tempo, foram para as potências de 8 dBm, 11 dBm e 14 dBm.

Conforme foi mencionado no início desta seção, os resultados da análise de variações temporais de PDR serviram de entrada para o *AP4-Best*. Os resultados do simulador foram obtidos a partir da média dos valores de PDR de 10 repetições da simulação para cada enlace e cada potência fixadas em seus valores e com 5 retransmissões e $t=0.9$. Ou seja, para as potências de 5 dBm, 8 dBm, 11 dBm e 14 dBm foram executadas 10 repetições da simulação

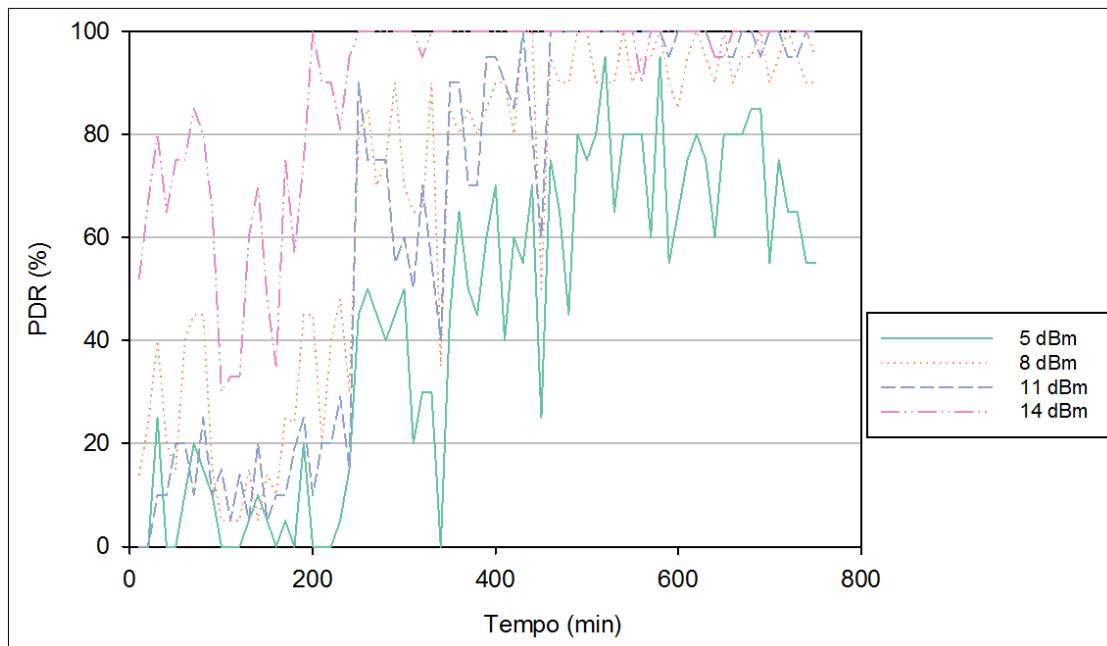


Figura 4.15: Variação temporal do PDR para o enlace 2→G.

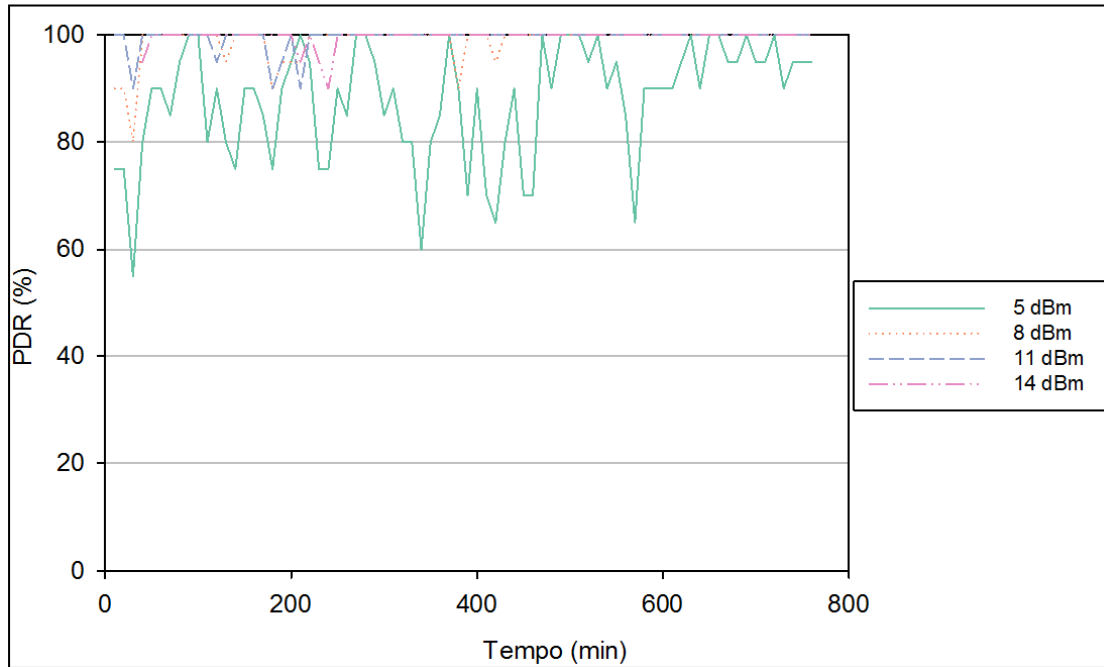


Figura 4.16: Variação temporal do PDR para o enlace 1→G.

com cada uma dessas potências fixadas, isto é, com a adaptação de potências desabilitada. Além disso, foram executadas 10 repetições para cada enlace com a adaptação de potências habilitada no *AP4-Best* e também foi calculado o valor médio de PDR. Os resultados das simulações são apresentados na Figura 4.17.

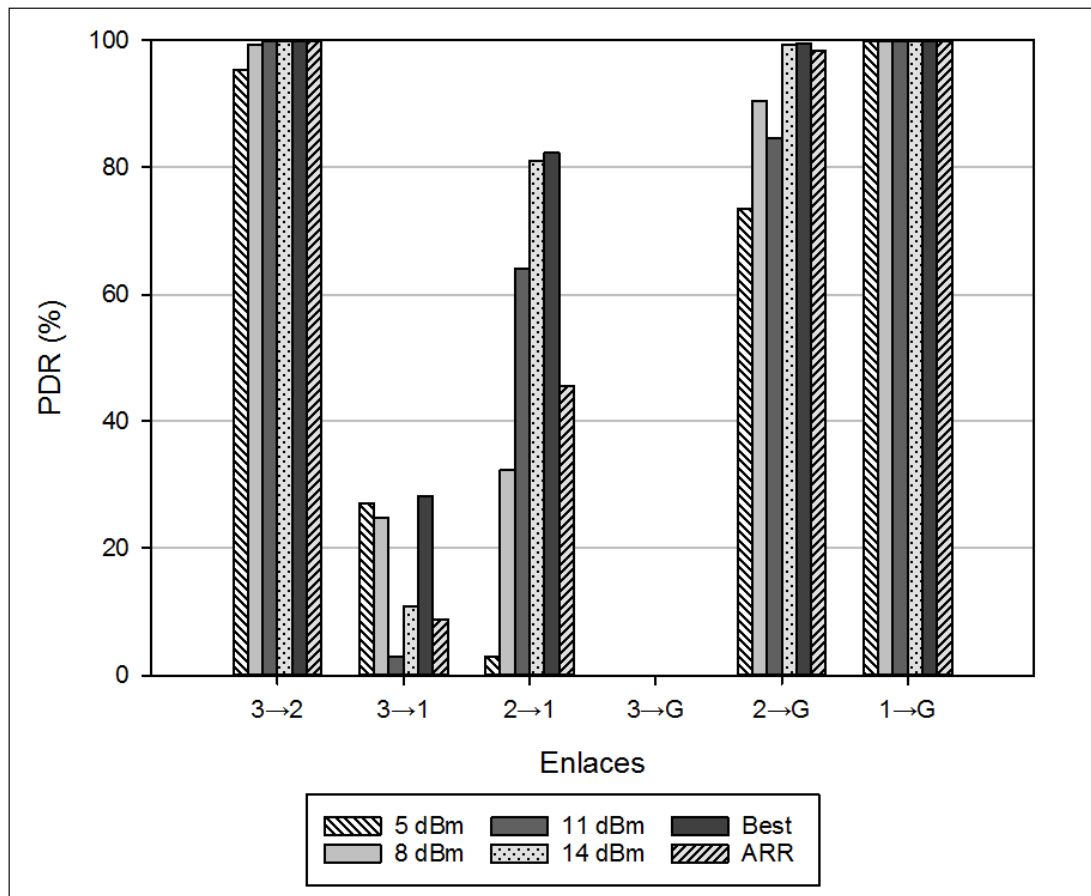


Figura 4.17: Valores médios de PDR.

Pode-se verificar pelo gráfico que a utilização de retransmissões proporciona melhora nas comunicações, conforme se pode constatar em comparação com os resultados apresentados na Figura 4.8. Além disso, observa-se em todos os enlaces que o algoritmo *AP4-Best* além de beneficiar as comunicações com adaptação de potência, gera resultados de PDR satisfatórios, que são iguais ou melhores que os resultados obtidos com o uso de potências fixas.

O mesmo procedimento utilizado na simulação do *AP4-Best* foi empregado na simulação do *AP4-ARR*, com 5 retransmissões e limiar de ARR $t=0.9$. Os resultados, apresentados

também na Figura 4.17 mostram valores médios de PDR semelhantes aos obtidos na simulação do *AP4-Best* para a maioria dos enlaces ($3 \rightarrow 2$, $3 \rightarrow G$, $2 \rightarrow G$ e $1 \rightarrow G$). A exceção coube aos enlaces $3 \rightarrow 1$ e $2 \rightarrow 1$. Isto se deve ao fato de que no *AP4-Best* o critério de escolha da potência quando nenhum valor de PDR atinge o limiar t é pelo maior valor de PDR de todas as potências, o que proporciona melhoras em alguns casos. Todavia, no *AP4-ARR* o critério de escolha da potência é o ARR.

Foram analisados também os comportamentos das potências de transmissão nos algoritmos *AP4-Best* e *AP4-ARR*. Utilizou-se como exemplo para a análise os enlaces $2 \rightarrow G$ e $1 \rightarrow G$. A Figura 4.18 mostra o comportamentos do nó nas duas respectivas estratégias no enlace $2 \rightarrow G$.

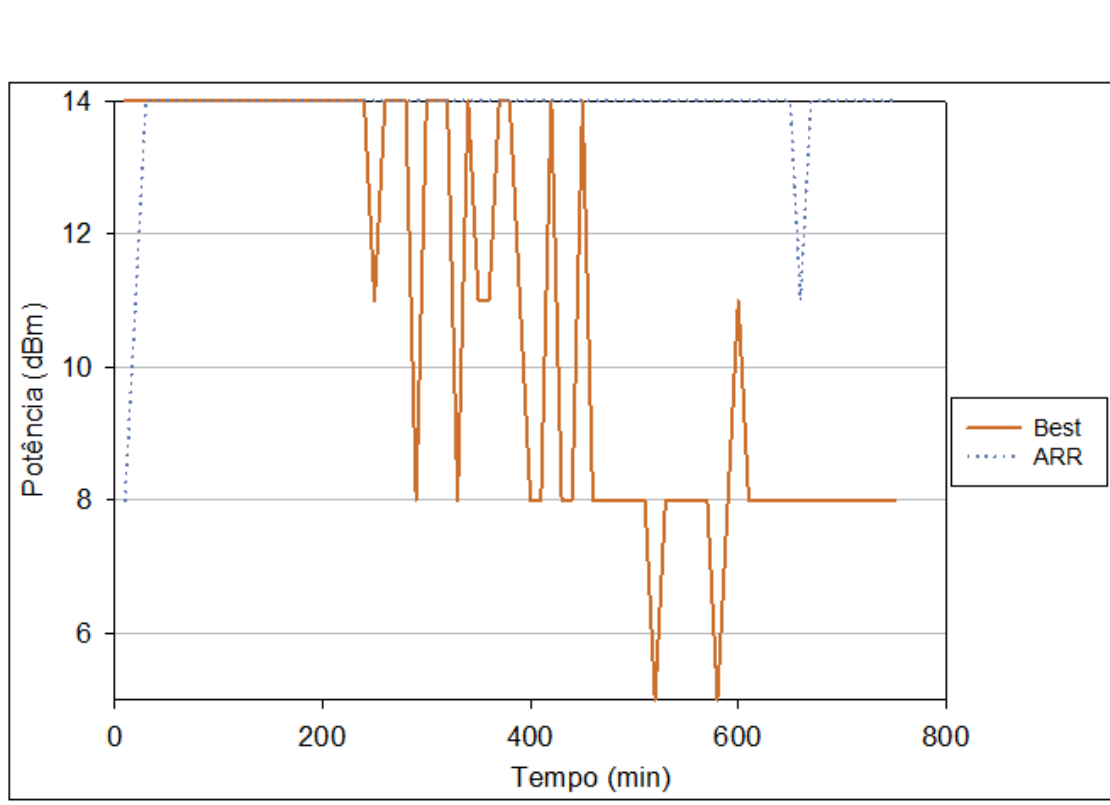


Figura 4.18: Potência de transmissão do nó 2 para o enlace $2 \rightarrow G$.

Pode-se perceber que estão presentes no gráfico muitas atividades de seleção de potência no intervalo observado. Atribui-se tal comportamento ao fato de que o *AP4-Best* tem como critério de escolha a menor potência a conseguir superar limiar t de PDR ou, caso nenhuma potência consiga superar o limiar, a escolha recai sobre a potência que tiver o maior valor de

PDR. Assim, se os valores de PDR variarem muito, o valor de potência acompanhará essa variação. Observando a Figura 4.17, para o enlace 2→G pode-se perceber que as potências que tiveram melhor desempenho e conseguiram superar o limiar utilizado ($=0.9$) de PDR foram as de 8 dBm e 14 dBm. Então, é esperado que para esse enlace 2→G o *AP4-Best* faça com que o nó passe mais tempo operando nesses valores de potência, o que pode ser constatado no gráfico. Com efeito, pode-se esperar o mesmo comportamento do *AP4-ARR* para o enlace 2→G. Cumpre lembrar que o enlace 2→G está sobrepondo o nó 1, o que faz com que espere-se que o nó opere nos maiores valores de potência, quais sejam 11 dBm e 14 dBm, devido a adaptação de potência, esteja o nó operando com o algoritmo *AP4-Best* ou *AP4-ARR*.

Por outro lado, observando-se novamente o enlace 1→G na Figura 4.17, percebe-se que as quatro potências de 5 dBm, 8 dBm, 11 dBm e 14 dBm tiveram desempenhos semelhantes. Para este enlace é esperado que tanto o algoritmo *AP4-Best* quanto o algoritmo *AP4-ARR* faça com que o nó tenda a operar na maior parte do tempo observado em potências menores, tais como 5 dBm e 8 dBm, o que pode ser verificado na Figura 4.19.

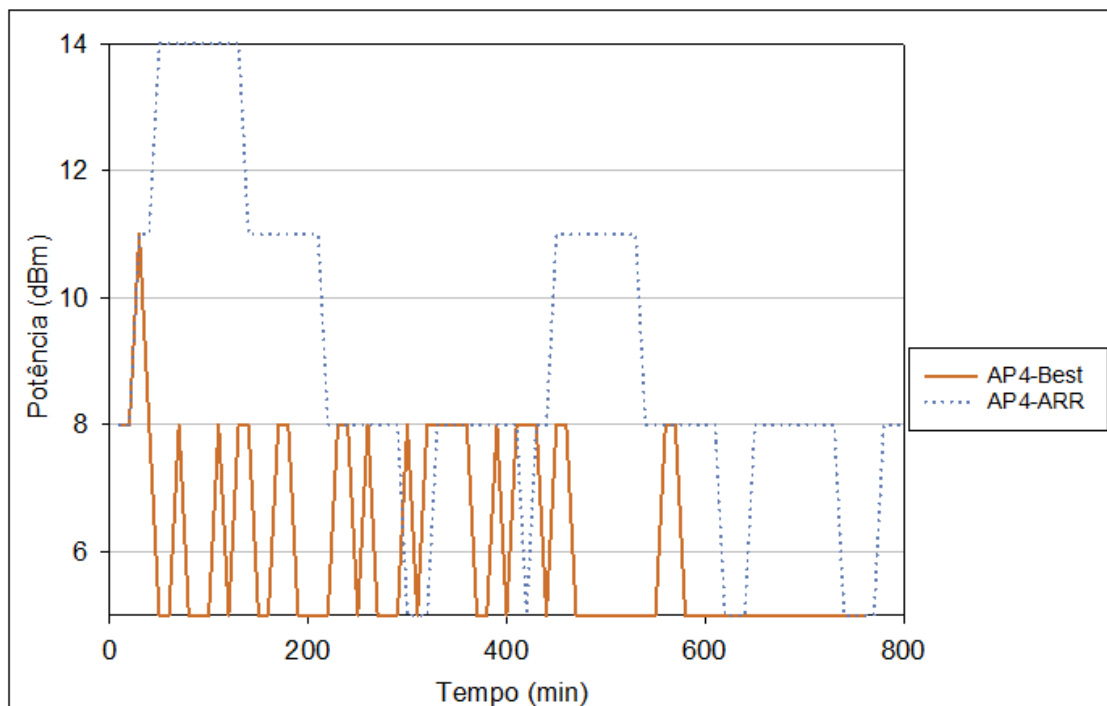


Figura 4.19: Potência de transmissão do nó 1 para o enlace 1→G.

Por fim, é importante destacar que o alcance médio obtido nas comunicações durante os experimentos práticos foi menor do que o observado em outros estudos semelhantes. Atribui-se essa ocorrência ao fato de se ter utilizado na montagem dos nós a antena PCB dos kits, as quais tem ganho de 3 dBi em 868 MHz. Além disso, os nós ficaram fechados dentro de caixas e por trás dos postes de concreto, o que também contribui para a atenuação do sinal. Uma forma de melhorar as comunicações seria reposicionar os nós nos postes, em alturas maiores, pois estariam menos susceptíveis a obstáculos. Além disso, fazer uso de antenas omni direcionais externas de maior ganho.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as recomendações, as sugestões para trabalhos futuros e as considerações finais, que podem ser verificados a partir da proposta e dos resultados apresentados no decorrer deste trabalho.

5.1 Síntese dos Resultados

O primeiros resultados deste trabalho foram obtidos a partir de dados de PDR, RSSI e potência coletados de uma rede de testes Wi-Sun/802.15.4g construída para auxiliar o estudos. Foram observadas as comunicações diretas tanto entre nós vizinhos quanto entre nós mais distantes e constatadas as distâncias que permitiam a sobreposição de nós.

Seguindo, foram realizados estudos de variação temporal dos sinais de PDR para todas as potências e enlaces envolvidos. Observou-se com os resultados que ocorreram variações no sinal de PDR nos diversos enlaces. Alguns enlaces com variações mais acentuadas, outros menos. A partir de então, elaborou-se duas estratégias baseadas em métricas de PDR e ARR para implementar o mecanismo de adaptação de potência.

As duas estratégias foram submetidas ao uso em simulador. Verificou-se que os resultados gerados por ambas as abordagens foram satisfatórios. Porém, também se discutiu que das duas estratégias formuladas, a que teria aplicação no campo prático seria a *AP4-ARR*

Por fim, foram avaliados, em simulações, os comportamentos, em termos de potências, de

dois nós em operação em enlaces distintos. Os resultados desta avaliação foram apresentados e discutidos.

5.2 Considerações Finais

A utilização de tecnologias de IoT e Redes de Utilidades em diversos campos de aplicações vem se tornando cada vez maior ao longo dos anos, o que torna necessário a elaboração de estratégias na área de tolerância a falhas que minimizem os efeitos de falhas provocados por dispositivos dessas redes. O mecanismo de adaptação de potência é uma proposta de recuperação de falhas que visa minimizar os efeitos de mau funcionamento que uma rede de utilidades em topologia linear pode apresentar ante a falha de nós intermediários.

Este trabalho teve por objetivo a formulação de estratégias de recuperação de falhas que não elevam custos econômicos e permitem que os demais nós de uma Rede de Utilidades em topologia linear continuem funcionando, mesmo que a confiabilidade geral não seja a mesma da situação pré falha, mas que permite que a rede continue funcionando com qualidade aceitável.

Nos domínios apresentados, os resultados apresentados na avaliação experimental demonstraram que o mecanismo de adaptação de potência é uma estratégia viável de tolerância a falhas em Redes de Utilidades em topologia linear. Os experimentos sugerem que a adaptação de potência de um determinado nó é uma forma de sobrepor algum outro nó intermediário que vier a apresentar problemas e, com isso, aumentar a confiabilidade de uma rede Wi-SUN/802.15.4g.

5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Em relação ao desenvolvimento de trabalhos futuros, este estudo fornece algumas opções no que diz respeito a continuidade do desenvolvimento de estratégias inseridas no campo de tolerância a falhas que visem melhorar a confiabilidade de Redes de Utilidades:

- **Implementação prática:** Apesar de a estratégia *AP4-ARR* ter sido construída a partir de conhecimentos obtidos de dados de uma rede de estudos real, e ter sido submetida a

diversas simulações, é necessária a sua implementação prática em nós para se estudar o seu comportamento em um ambiente de operação real e verificar os resultados.

- **Combinação de estratégias:** A combinação da estratégia *AP4-ARR* com outras, como a diversidade de modulação, por exemplo, pode gerar benefícios no desempenho das redes em estudo. Esses benefícios podem vir a contribuir, inclusive, para o uso das duas estratégias no ambiente industrial.
- **Desempenho energético:** Existem alguns aspectos que ainda não foram abordados, que são os relacionados ao desempenho energético de nós com a utilização do *AP4-ARR*. Além disso, a combinação do uso de energia solar para recarregar as baterias dos nós, combinado com a estratégia formulada, pode vir a ser fator que contribua para maximizar ainda mais o tempo de operação da rede.
- **Desempenho de modulações:** Outro aspecto que pode ser avaliado em trabalhos futuros é o desempenho do *AP4-ARR* quando submetido a diferentes modulações, tais como OQPSK e OFDM.

Bibliografia

- [Al-jawhar 2017]AL-JAWHAR, Y. *An implementation of peak to average power ratio reduction for multicarrier system (orthogonal frequency division multiplexing)*. Tese (Doutorado), 11 2017.
- [Azman, Panicker e Kashyap 2019]AZMAN, M.; PANICKER, J. G.; KASHYAP, R. Wireless daisy chain and tree topology networks for smart cities. In: IEEE. *2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*. [S.l.], 2019. p. 1–6.
- [Baccour et al. 2012]BACCOUR, N. et al. Radio link quality estimation in wireless sensor networks: A survey. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, ACM New York, NY, USA, v. 8, n. 4, p. 1–33, 2012.
- [Bensky 2019]BENSKY, A. *Short-range wireless communication*. [S.l.]: Newnes, 2019.
- [Bertalanffy 1975]BERTALANFFY, L. V. *Teoria geral dos sistemas*. [S.l.]: Vozes Petrópolis, 1975.
- [Bilic e Ozdemir 2017]BILIC, G.; OZDEMIR, S. The influence of the carrier frequency on the applications and the rfid general system characteristics. In: . [S.l.: s.n.], 2017.
- [Blommers 1998]BLOMMERS, J. *Architecting enterprise solutions with UNIX networking*. [S.l.]: Prentice Hall PTR, 1998.
- [Chang e Mason 2012]CHANG, K.-H.; MASON, B. The ieee 802.15. 4g standard for smart metering utility networks. In: IEEE. *2012 IEEE Third international conference on smart grid communications (SmartGridComm)*. [S.l.], 2012. p. 476–480.

- [Chhaya et al. 2018]CHHAYA, L. et al. Iot-based implementation of field area network using smart grid communication infrastructure. *Smart Cities*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 1, n. 1, p. 176–189, 2018.
- [Cochennec 2002]COCHENNEC, J.-Y. Activities on next-generation networks under global information infrastructure in itu-t. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 40, n. 7, p. 98–101, 2002.
- [Culler, Chakrabarti e Infusion 2009]CULLER, D.; CHAKRABARTI, S.; INFUSION, I. 6lowpan: Incorporating ieee 802.15. 4 into the ip architecture. *White paper*, 2009.
- [Davoody-Beni et al. 2019]DAVOODY-BENI, Z. et al. Application of iot in smart grid: Challenges and solutions. In: IEEE. *2019 5th Iranian Conference on Signal Processing and Intelligent Systems (ICSPIS)*. [S.l.], 2019. p. 1–8.
- [Gerônimo et al. 2018]GERÔNIMO, M. da S. et al. O impacto de um sistema de informação nos processos produtivos: um estudo de caso em um laboratório de análises clínicas de uma instituição de ensino superior privada. *Sistemas & Gestão*, v. 13, n. 1, p. 107–117, 2018.
- [Godoi, Denardin e Barriuello 2019]GODOI, F. N.; DENARDIN, G. W.; BARRIUELLO, C. H. Reliability enhancement of packet delivery in multi-hop wireless sensor network. *Computer Networks*, Elsevier, v. 153, p. 86–91, 2019.
- [Gomes et al. 2019]GOMES, R. D. et al. Adaptive and beacon-based multi-channel protocol for industrial wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, Elsevier, v. 132, p. 22–39, 2019.
- [Gomes, Tuset-Peiró e Vilajosana 2020]GOMES, R. D.; TUSET-PEIRÓ, P.; VILAJOSANA, X. Improving link reliability of ieee 802.15. 4g sun networks with adaptive modulation diversity. Preprints, 2020.
- [Gutiérrez 2007]GUTIÉRREZ, J. A. On the use of ieee std. 802.15. 4 to enable wireless sensor networks in building automation. *International Journal of Wireless Information Networks*, Springer, v. 14, n. 4, p. 295–301, 2007.
- [Hanes et al. 2017]HANES, D. et al. *IoT fundamentals: Networking technologies, protocols, and use cases for the internet of things*. [S.l.]: Cisco Press, 2017.

- [Harada et al. 2017]HARADA, H. et al. Ieee 802.15. 4g based wi-sun communication systems. *IEICE Transactions on Communications*, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, v. 100, n. 7, p. 1032–1043, 2017.
- [Heile et al. 2017]HEILE, B. et al. Wi-sun fan overview. *draft-heile-lpwan-wisun-overview-00, Internet-Draft, IETF*, 2017.
- [Howitt e Gutierrez 2003]HOWITT, I.; GUTIERREZ, J. A. Ieee 802.15. 4 low rate-wireless personal area network coexistence issues. In: IEEE. *2003 IEEE Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003*. [S.l.], 2003. v. 3, p. 1481–1486.
- [Hussein, El-Nakib e Kishk 2017]HUSSEIN, A.; EL-NAKIB, A.; KISHK, S. Energy-efficient linear wireless sensor networks applications in pipelines monitoring and control. *Energy*, v. 1, p. 6, 2017.
- [Ivanov et al. 2018]IVANOV, O. et al. Model for calculating the reliability of a wireless sensor telecommunication system for monitoring the gas transmission network state. In: IEEE. *2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. [S.l.], 2018. p. 1–5.
- [Knauth 2008]KNAUTH, S. Implementation of an ieee 802.15. 4 transceiver with a software-defined radio setup. *Proceedings of the embedded world 2008 Conference, Nuremberg, Germany*, 02 2008.
- [Koren e Krishna 2010]KOREN, I.; KRISHNA, C. M. *Fault-tolerant systems*. [S.l.]: Elsevier, 2010.
- [Kurose e Ross 2013]KUROSE, J.; ROSS, K. *Redes de computadores e a internet: uma abordagem top-down*. Pearson Education do Brasil LTDA, 2013. ISBN 9788543014432. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=raZtQwAACAAJ>>.
- [Lee, Lee e Rhee 2014]LEE, C. S.; LEE, G. M.; RHEE, W. S. Smart ubiquitous networks for future telecommunication environments. *Computer Standards & Interfaces*, Elsevier, v. 36, n. 2, p. 412–422, 2014.

- [Mahdiraji e Abas 2010]MAHDIRAJI, G. A.; ABAS, A. F. Advanced modulation formats and multiplexing techniques for optical telecommunication systems. In: _____. [S.l.: s.n.], 2010. ISBN 978-953-307-072-8.
- [Matsubara et al. 2013]MATSUBARA, D. et al. Toward future networks: A viewpoint from itu-t. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 51, n. 3, p. 112–118, 2013.
- [Melnyk 2018]MELNYK, V. Security architecture technical investigation for ieee 802.15. 4 low-rate wireless personal area networks. *Scientific-Technical Journal “Advances in Cyber-Physical Systems*, v. 1, n. 2, p. 103–118, 2018.
- [Mochizuki et al. 2016]MOCHIZUKI, K. et al. Development and field experiment of wide area wi-sun system based on ieee 802.15. 4g. In: IEEE. *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. [S.l.], 2016. p. 76–81.
- [Mohamed e Jawhar 2008]MOHAMED, N.; JAWHAR, I. A fault tolerant wired/wireless sensor network architecture for monitoring pipeline infrastructures. In: IEEE. *2008 Second International Conference on Sensor Technologies and Applications (sensorcomm 2008)*. [S.l.], 2008. p. 179–184.
- [Muñoz et al. 2018 (i)]MUÑOZ, J. et al. Evaluation of ieee802. 15.4 g for environmental observations. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 10, p. 3468, 2018 (i).
- [Muñoz et al. 2018 (ii)]MUÑOZ, J. et al. Overview of ieee802. 15.4 g ofdm and its applicability to smart building applications. In: IEEE. *2018 Wireless Days (WD)*. [S.l.], 2018 (ii). p. 123–130.
- [Olsson 2014]OLSSON, J. 6lowpan demystified. *Texas Instruments*, v. 13, 2014.
- [Omale 2018]OMALE, G. Gartner identifies top 10 strategic iot technologies and trends. *Gartner website*, 2018.
- [Papadimitratos, Mishra e Rosenburgh 2005]PAPADIMITRATOS, P.; MISHRA, A.; ROSENBURGH, D. A cross-layer design approach to enhance 802.15.4. In: . [S.l.: s.n.], 2005. p. 1719 – 1726 Vol. 3.

- [Prando et al. 2019]PRANDO, L. R. et al. Experimental performance comparison of emerging low power wide area networking (lpwan) technologies for iot. In: IEEE. *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. [S.l.], 2019. p. 905–908.
- [Pressman e Maxim 2016]PRESSMAN, R.; MAXIM, B. *Engenharia de Software-8ª Edição*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016.
- [Reeves 2018]REEVES, D. How to create a smart city: Future-proofed cities that foster growth and innovation. *IEEE Electrification Magazine*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 34–41, 2018.
- [Righetti et al. 2019]RIGHETTI, F. et al. Performance measurements of iee 802.15. 4g wireless networks. In: IEEE. *2019 IEEE 20th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"(WoWMoM)*. [S.l.], 2019. p. 1–6.
- [Rivera, Esposito e Teixeira 2013]RIVERA, R.; ESPOSITO, A. S.; TEIXEIRA, I. Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. *Revista do BNDES*, v. 40, p. 43–83, 2013.
- [Saeed et al. 2014]SAEED, H. et al. Reliable monitoring of oil and gas pipelines using wireless sensor network (wsn)—remong. In: IEEE. *2014 9th International Conference on System of Systems Engineering (SOSE)*. [S.l.], 2014. p. 230–235.
- [Salam e Shah 2019]SALAM, A.; SHAH, S. Internet of things in smart agriculture: Enabling technologies. In: IEEE. *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. [S.l.], 2019. p. 692–695.
- [Saleem, Ullah e Kwak 2010]SALEEM, S.; ULLAH, S.; KWAK, K. S. Towards security issues and solutions in wireless body area networks. In: IEEE. *INC2010: 6th International Conference on Networked Computing*. [S.l.], 2010. p. 1–4.
- [Shahinzadeh et al. 2019]SHAHINZADEH, H. et al. Iot architecture for smart grids. In: IEEE. *2019 International Conference on Protection and Automation of Power System (IPAPS)*. [S.l.], 2019. p. 22–30.
- [Shelby e Bormann 2011]SHELBY, Z.; BORMANN, C. *6LoWPAN: The wireless embedded Internet*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

- [Sinaceur 2014]SINACEUR, H. B. Facets and levels of mathematical abstraction. *Philosophia Scientiæ. Travaux d'histoire et de philosophie des sciences*, Université Nancy 2, n. 18-1, p. 81–112, 2014.
- [Standard 2003]STANDARD, I. Ieee standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-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 (lr-wpans). *IEEE Std 802.15. 4-2003*, 2003.
- [Sum et al. 2017]SUM, C.-S. et al. Experimental performance evaluation of multihop ieee 802.15. 4/4g/4e smart utility networks in outdoor environment. *Wireless Communications and Mobile Computing*, Hindawi, v. 2017, 2017.
- [Tanenbaum 2003]TANENBAUM, A. S. *Redes de computadores Quarta edição*. Rio de Janeiro: Campus, 2003. 945 p. ISBN 85-352-1185-3.
- [Tsiatsis et al. 2018]TSIATSI, V. et al. *Internet of Things: technologies and applications for a new age of intelligence*. [S.l.]: Academic Press, 2018.
- [Tuset-Peiró et al. 2020]TUSET-PEIRÓ, P. et al. Evaluating ieee 802.15. 4g sun for dependable low-power wireless communications in industrial scenarios. *Sensors (available on Preprints)*, v. 20, 2020.
- [Tuset-Peiró et al. 2019]TUSET-PEIRÓ, P. et al. Experimental interference robustness evaluation of ieee 802.15. 4-2015 oqpsk-dsss and sun-ofdm physical layers for industrial communications. *Electronics*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 9, p. 1045, 2019.
- [Varshney, Kumar e Swaroop 2018]VARSHNEY, S.; KUMAR, C.; SWAROOP, A. Leach based hierarchical routing protocol for monitoring of over-ground pipelines using linear wireless sensor networks. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 125, p. 208–214, 2018.
- [Veneri e Capasso 2018]VENERI, G.; CAPASSO, A. *Hands-on Industrial Internet of Things: Create a Powerful Industrial IoT Infrastructure Using Industry 4.0*. [S.l.]: Packt Publishing Ltd, 2018.

[Verma e Singh 2018]VERMA, N.; SINGH, D. Data redundancy implications in wireless sensor networks. *Procedia computer science*, Elsevier, v. 132, p. 1210–1217, 2018.

[Verri 2010]VERRI, L. B. *A Confiabilidade Prática Na Administração Da Engenharia*. [S.l.]: Clube de Autores, 2010.

[Weber 2003]WEBER, T. S. Tolerância a falhas: conceitos e exemplos. *Apostila do Programa de Pós-Graduação–Instituto de Informática-UFRGS. Porto Alegre*, p. 24, 2003.

Apêndice A

Apêndice A

A.1 Fotos do Experimento

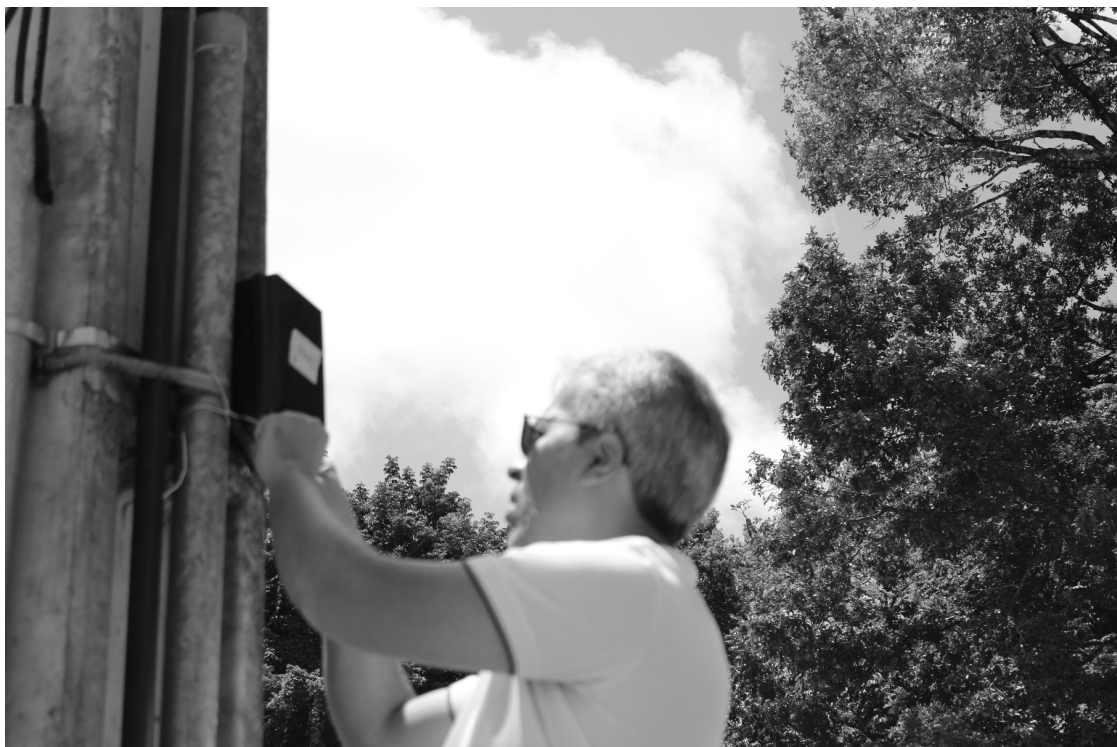


Figura A.1: Instalação do Nó.



Figura A.2: Equipe do Projeto.



Figura A.3: Nós Prontos para Instalação.