



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Informática

Programa de Pós-Graduação em Informática

Avaliação Experimental da Qualidade de Enlace de Redes de
Sensores Sem Fio Industriais em Instalações ao Ar Livre

Emerson Brasil Gomes

João Pessoa, Paraíba, Brasil

Junho de 2019

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Informática
Programa de Pós-Graduação em Informática

Avaliação Experimental da Qualidade de Enlace de Redes de
Sensores Sem Fio Industriais em Instalações ao Ar Livre

Emerson Brasil Gomes

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: Sinais, Sistemas Digitais e Gráficos

Prof. Dr. Iguatemi Eduardo da Fonseca
(Orientador)

Prof. Dr. Ruan Delgado Gomes
(Co-Orientador)

João Pessoa, Paraíba, Brasil

©Emerson Brasil Gomes, 20 de Junho de 2019

**Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação**

G633a Gomes, Emerson Brasil.

Avaliação Experimental da Qualidade de Enlace de Redes de Sensores sem Fio Industriais em Instalações ao Ar Livre / Emerson Brasil Gomes. - João Pessoa, 2019.
102 f. : il.

Orientação: Iguatemi Eduardo da Fonseca.

Coorientação: Ruan Delgado Gomes.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CI.

1. Automação Industrial. 2. Redes de Sensores sem Fio Industriais. 3. Múltiplos Canais. 4. Estimação de Qualidade de Enlace. I. Fonseca, Iguatemi Eduardo da. II. Gomes, Ruan Delgado. III. Título.

UFPB/BC



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

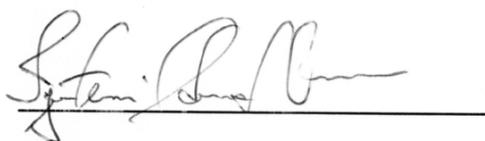


Ata da Sessão Pública de Defesa de Dissertação de Mestrado de Emerson Brasil Gomes, candidato ao título de Mestre em Informática na Área de Sistemas de Computação, realizada em 22 de julho de 2019.

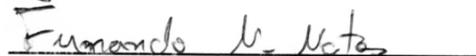
1 Aos vinte e dois dias do mês de julho, do ano de dois mil e dezenove, às dez horas, no
2 Centro de Informática da Universidade Federal da Paraíba, em Mangabeira, reuniram-se os
3 membros da Banca Examinadora constituída para julgar o Trabalho Final do Sr. Emerson
4 Brasil Gomes, vinculado a esta Universidade sob a matrícula nº 20171005941, candidato ao
5 grau de Mestre em Informática, na área de "Sistemas de Computação", na linha de pesquisa
6 "Computação Distribuída", do Programa de Pós-Graduação em Informática, da Universidade
7 Federal da Paraíba. A comissão examinadora foi composta pelos professores: Iguatemi
8 Eduardo da Fonseca (PPGI-UFPB) Orientador e Presidente da Banca, Fernando Menezes
9 Matos (UFPB), Examinador Interno, Reinaldo Cezar de Moraes Gomes (UFCEG), Examinador
10 Externo à Instituição, Ruan Delgado Gomes (IFPB), Examinador Externo à Instituição. Dando
11 início aos trabalhos, o Presidente da Banca cumprimentou os presentes, comunicou aos
12 mesmos a finalidade da reunião e passou a palavra ao candidato para que o mesmo fizesse
13 a exposição oral do trabalho de dissertação intitulado: "Avaliação Experimental da Qualidade
14 de Enlace de Redes de Sensores sem Fio Industriais em Instalações ao Ar Livre". Concluída
15 a exposição, o candidato foi arguido pela Banca Examinadora que emitiu o seguinte parecer:
16 "**aprovado**". Do ocorrido, eu, Claurton de Albuquerque Siebra, Coordenador do Programa
17 de Pós-Graduação em Informática, lavrei a presente ata que vai assinada por mim e pelos
18 membros da banca examinadora. João Pessoa, 22 de julho de 2019.


Prof. Dr. Claurton de Albuquerque Siebra

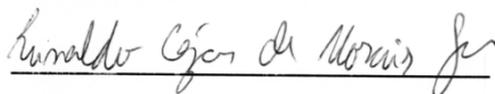
Prof. Dr. Iguatemi Eduardo da Fonseca
Orientador (PPGI-UFPB)



Prof. Dr. Fernando Menezes Matos
Examinador Interno (UFPB)



Prof. Dr. Reinaldo Cezar de Moraes Gomes
Examinador Externo à Instituição (UFCEG)



Prof. Dr. Ruan Delgado Gomes
Examinador Externo à Instituição (IFPB)



Resumo

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) têm como objetivo principal coletar informações sensoriais em uma determinada área, a partir de dispositivos sensores (nós) que têm a capacidade de adquirir, processar e comunicar dados. As RSSF são aplicáveis nos mais variados domínios, incluindo a automação industrial, onde podem ser utilizadas no monitoramento e controle de plantas industriais. Neste campo de aplicação específico existem as RSSF Industriais (RSSFI), que buscam atender a requisitos específicos dos sistemas industriais, tais como comunicação com alta confiabilidade e baixa latência, que podem ser afetados pelas características inerentes à comunicação sem fio. Os sinais eletromagnéticos podem ser atenuados, obstruídos ou propagados por múltiplos caminhos, graças a equipamentos e materiais metálicos presentes em abundância em ambientes industriais. Este trabalho busca estudar experimentalmente as RSSFI instaladas em ambientes industriais ao ar livre. A primeira parte do trabalho consiste na caracterização de duas plantas industriais (uma predominantemente estática e outra predominantemente dinâmica) em relação à qualidade do enlace de rádio em múltiplos canais. Outro objetivo do atual trabalho é validar, por meio de experimento em uma terceira planta industrial ao ar livre, um estimador de qualidade de enlace (*Link Quality Estimator*, LQE) e também um dispositivo (nó sensor LQE), que estima a qualidade de enlaces em tempo real, ambos propostos por Gomes, em 2017. Para garantir uma boa qualidade de serviço nas RSSFI, os resultados obtidos corroboram a importância do uso de protocolos adaptativos que selecionem os canais apropriados para cada enlace, em virtude das variações espaciais e temporais, que afetam a qualidade dos canais.

Palavras-chave: Automação Industrial, Redes de Sensores sem Fio Industriais, Múltiplos Canais, Estimação de Qualidade de Enlace

Abstract

The Wireless Sensor Networks (WSN) have, as the main purpose to gather sensors information, in a pre-defined area, from sensor devices (nodes) that are capable to acquire, process and transmit data. The WSN are applicable in a wide range of fields, including industrial automation, where they can be used for monitoring and control industrial plants. In this application field, there are the Industrial WSN (IWSN) which aim to attend to the specific requirements of the industrial systems, such as communication with high reliability and low latency, which can be affected by the inherent characteristics of wireless communication. Electromagnetic signals can be attenuated, obstructed or propagated through multiple paths, due to hardware and metallic materials, widely used in industrial environments. This work aims to experimentally study the IWSN installed in outdoor industrial environments. The first part of the work consists on the characterization of two industrial plants (one mainly static and another mainly dynamic) with regard to the quality of the radio link in multiple channels. Another objective of the present work is to validate, through an experiment in a third outdoor industrial plant, a Link Quality Estimator (LQE) and also a device (sensor node LQE), which estimates the quality of links in real time, both proposed by Gomes in 2017. In order to guarantee a good quality of service in the IWSN, the obtained results reinforce the importance of the use of adaptive protocols that select the appropriate channels for each link, due to the spatial and temporal variations, which affect the quality of the channels.

Keywords: Industrial Automation, Industrial Wireless Sensor Networks, Multiple Channels, Link Quality Estimation

Dedicatória

Início dos anos 80, Brasília, Distrito Federal. O rock brasileiro prestes a estourar em todo país com os seus expoentes, Legião Urbana, Plebe Rude e Capital Inicial. O movimento pelas “Diretas Já” ganhava as ruas das principais cidades brasileiras. Com esse cenário de fundo, em um final de semana qualquer, vejo meu pai adentrando a nossa casa carregando algumas caixas. Curiosos, eu e meus irmãos, o acompanhamos até o escritório. Lá, pacientemente, ele começa a desencaixar um conjunto de objetos: uma pequena TV preto e branco, um tocador/gravador de fitas cassete e uma caixa branca com um teclado embutido, semelhante ao de uma máquina de escrever. Ele começa a interligar os equipamentos e, ao concluir essa tarefa, anuncia em voz alta: “Este é um computador doméstico!”. Por cima de seus ombros, acompanhei fascinado a digitação de comandos na máquina, para depois ver a tela da TV ser preenchida por várias cópias do meu nome. Dias mais tarde aprendi que aqueles eram comandos de uma linguagem de programação chamada BASIC e que eu precisaria aprendê-la para dominar aquela máquina fascinante. Meus primeiros passos no mundo da computação e programação foram com o DGT-100, equipado com um processador Z-80 a 2,5 MHz e com 16 KBytes de memória RAM (fruto de um período brasileiro conhecido como reserva do mercado de informática), sendo compatível com o TRS-80 Modelo I. Tempos depois, adquirimos um outro microcomputador chamado MC-4000 Exato Pro, compatível com o Apple II. Já dominando a linguagem de programação BASIC, graças aos ensinamentos de meu pai, ansiava por aprofundar meus conhecimentos de programação, desejava dominar a linguagem Assembly. Muitos anos mais tarde, meu pai confessou que os pedidos insistentes de seu filho por aprender Assembly, o incentivou a escrever e publicar pela LTC o seu primeiro livro, “Apple Assembly 6502”, um sucesso de vendas em virtude de seu linguajar acessível e conteúdo didático, que atendeu às expectativas de seu filho e de tantos outros leitores. Agora posso retribuir teu gesto, meu pai, dedicando-te este trabalho realizado na universidade onde dedicaste tantos anos de tua vida acadêmica e profissional.

Dedico esta dissertação à meu pai Hercules Gomes Pimentel (in memoriam).

Agradecimentos

Aos meus pais, Hercules (in memoriam) e Maris-Stella, por tudo que já me ensinaram, me ensinam e me ensinarão. A educação e o amor que me deram é uma dádiva que sempre agradecerei.

A minha esposa Uliana, que já enfrentou e venceu as dificuldades para obtenção do título de mestre e me deu força nos momentos difíceis desta jornada. Agradeço pela paciência durante o tempo em que estive dedicado à realização deste trabalho. Obrigado minha amada.

Ao meu filho Yan, que sempre me apoiou e acompanhou de perto o início deste trabalho, quando estudamos no mesmo prédio do CI da UFPB e conversávamos sobre computação, tecnologia, games e tudo mais. Trilhaste outro caminho acadêmico e saibas que fiquei extremamente orgulhoso por vê-lo concluir, com méritos, essa nova graduação.

Aos meus familiares. Aos meus irmãos, Fábio e Fabiana, que estendem uma mão amiga sempre que preciso. A minha tia Maude e meu tio Altamiro (in memoriam) que desde minha graduação torceram pelo meu sucesso acadêmico. Ao meu primo Diego pelas enriquecedoras discussões sobre o direcionamento do meu mestrado. A todos primos e primas, tios e tias que me incentivaram durante essa fase de minha vida. Ao meu compadre Vinícius Almeida e sua família e ao amigo Edmar Travassos e sua família, por me escutarem discorrer sobre meu trabalho de mestrado e por acreditarem no sucesso final deste desafio.

Ao professor Iguatemi Fonseca, por todo aprendizado que pude assimilar sob sua orientação. Seu convite para cursar uma disciplina ministrada por ti, após minha reprovação em uma tentativa frustrada de aprovação neste mestrado, foi incentivador, pois naquela época eu já tinha desistido de participar de nova seleção.

Ao professor Ruan Gomes, que sempre me apoiou e ajudou durante todas as fases deste trabalho de dissertação. Ser seu primeiro orientando de mestrado é motivo de muito orgulho para mim. Espero que muitos alunos tenham a oportunidade de tê-lo como orientador. Também agradeço por poder utilizar a sua tese de doutorado como principal referência e base para condução de minha pesquisa.

Aos professores do PPGI. Ao professor Gustavo Motta, com o qual pude cursar a disciplina que culminou com o surgimento da versão embrionária desta dissertação. Aos professores Alisson Brito e Fernando Matos pelas valiosas críticas, sugestões e correções do meu trabalho durante a apresentação de qualificação.

Aos alunos do PPGI. Ao José Fagner de Medeiros pelo sucesso no trabalho em conjunto, que contribuiu para nossa aprovação na disciplina de Arquitetura de Computadores.

Aos meus amigos do trabalho. Ao Marcos Lima e Francisco de Assis Marques por estarem sempre preocupados com o andamento do meu trabalho de pesquisa e pelas dicas para montagem e realização de experimentos. Ao Wildner Arcanjo, Geraldo Pereira e Udi-
clebson de Souza, pelo auxílio logístico durante a instalação de sensores e computadores para realização dos experimentos nos ambientes industriais. Ao Alex Gavazzi, pela especial contribuição durante a realização do experimento na planta industrial de carregamento de derivados de petróleo. Ao Domingos Feitosa, pela valiosa ajuda na preparação dos esquemáticos e plantas baixas das áreas industriais e pelas palavras motivantes. Ao Fábio Ferreira, pelo incentivo para que eu concluísse com êxito o mestrado.

A empresa Petrobras, da qual tenho imenso orgulho de compor seu quadro de funcionários. Espero que continue sendo uma empresa que investe fortemente em pesquisa. Os frutos destas pesquisas são colhidos não só pela comunidade acadêmica, como também por toda a sociedade brasileira.

“It is paradoxical, yet true, to say, that the more we know, the more ignorant we become in the absolute sense, for it is only through enlightenment that we become conscious of our limitations. Precisely one of the most gratifying results of intellectual evolution is the continuous opening up of new and greater prospects.”

Nikola Tesla

Conteúdo

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Motivação | 1 |
| 1.2 | Objetivos | 2 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 2 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 3 |
| 1.3 | Proposta de Pesquisa | 3 |
| 1.4 | Estrutura da Dissertação | 4 |
| 2 | Fundamentação Teórica | 5 |
| 2.1 | Redes de Sensores Sem Fio Industriais | 5 |
| 2.1.1 | WirelessHART | 7 |
| 2.1.2 | WIA-PA | 8 |
| 2.1.3 | ISA 100.11a | 10 |
| 2.1.4 | O Padrão IEEE 802.15.4 | 12 |
| 2.1.5 | Camada de Controle de Acesso ao Meio das RSSFI | 16 |
| 2.2 | Estimação de Qualidade de Enlace em RSSFI | 26 |
| 3 | Trabalhos Relacionados | 30 |
| 3.1 | Caracterização de Canais de RSSFI em Ambientes ao Ar Livre | 30 |
| 3.2 | Estimação de Qualidade de Enlace em RSSF | 32 |
| 4 | Avaliação Experimental | 39 |
| 4.1 | Metodologia | 39 |
| 4.1.1 | Protocolo desenvolvido para os Experimentos | 41 |
| 4.2 | Experimento em Estação de Injeção de Água | 43 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2.1 | Plano do Experimento | 43 |
| 4.2.2 | Execução do Experimento | 44 |
| 4.2.3 | Análise dos Resultados | 47 |
| 4.3 | Experimento em Estação de Aquecimento Solar | 50 |
| 4.3.1 | Plano do Experimento | 50 |
| 4.3.2 | Execução do Experimento | 50 |
| 4.3.3 | Análise dos Resultados | 53 |
| 4.4 | Experimento em Estação de Carregamento de Derivados de Petróleo | 59 |
| 4.4.1 | Plano do Experimento | 59 |
| 4.4.2 | Execução do Experimento | 62 |
| 4.4.3 | Análise do Experimento | 63 |
| 4.5 | Conclusões Gerais dos Experimentos | 65 |
| 5 | Conclusão | 68 |
| 5.1 | Considerações Finais | 68 |
| 5.2 | Trabalhos Futuros | 69 |
| 5.3 | Publicações durante o Mestrado | 70 |
| | Referências Bibliográficas | 76 |
| A | | 77 |
| A.1 | Fotos do Experimento em Estação de Injeção de Água | 77 |

Lista de Símbolos

ABMP : *Adaptive and Beacon-Based Multi-Channel Protocol*

AES : *Advanced Encryption Standard*

AFH : *Adaptive Frequency Hopping*

AFS : *Adaptive Frequency Switching*

ASN : *Absolute Slot Number*

BI : *Beacon Interval*

CAP : *Contention Access Period*

CFP : *Contention Free Period*

CIWA : *Chinese Industrial Wireless Alliance*

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

CTP : *Collection Tree Protocol*

DSME : *Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension*

EA-TPGF : *Energy-Aware Two-Phase Geographic Forwarding*

ED : *Energy Detection*

ETX : *Expected Transmission Count*

GTS : *Guaranteed Time Slot*

HART : *Highway Addressable Remote Transducer*

HCF : *Hart Communication Foundation*

HRP : *High Rate Pulse*

IE : *Information Elements*

IEC : *International Electrotechnical Commission*

IEEE : *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

ISA : *International Society of Automation*

ISM : *Industrial, Scientific and Medical*

LECIM : *Low Energy Critical Infrastructure Monitoring*

LLDN : *Low Latency Deterministic Network*

LOS : *Line Of Sight*

LPWAN : *Low Power Wide Area Network*

LQDV : *Link Quality Distance Vector*

LQE : *Link Quality Estimator*

LQEAR : *Link Quality and Energy-Aware Routing*

LQI : *Link Quality Indicator*

LQRRP : *Link Quality Reliable Routing Protocol*

LRP : *Low Rate Pulse*

LVM : *Link Verification Metric*

MAC : *Media Access Control*

NLOS : *Non-Line Of Sight*

OFDM : *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

OQPSK : *Offset Quadrature Phase-Shift Keying*

PAN : *Personal Area Networks*

PAS : *Publicly Available Specification*

PCB : *Printed Circuit Board*

PRR : *Packet Reception Rate*

QOS : *Quality of Service*

RCC : *Rail Communications and Control*

RFID : *Radio Frequency Identification*

RNP : *Requested Number of Packets*

RPL : *Routing Protocol for LowPower and Lossy Networks*

RSSF : *Redes de Sensores sem Fio*

RSSFI : *Redes de Sensores sem Fio Industriais*

RSSI : *Received Signal Strength Indication*

SD : *Superframe Duration*

SFK : *Frequency Shift Keying*

SNR : *Signal to Noise Ratio*

STLE : *Short-Term Link Estimator*

SUN : *Smart Utility Network*

SVM : *Support Vector Machine*

TDMA : *Time Division Multiple Access*

TH : *Timeslot Hopping*

TPC : *Transmission Power Control*

TPGF : *Two-Phase Geographic Forwarding*

TRP : *Taxa de Recebimento de Pacotes*

TSCH : *Time-Slotted Channel Hopping*

TVWS : *Television White Space*

UWB : *Ultra-Wideband*

WCI : *ISA100 Wireless Compliance Institute*

WIA-PA : *Wireless Networks for Industrial Automation - Process Automation*

WMEWMA : *Window Mean with Exponentially Weighted Moving Average*

WPAN : *Wireless Personal Area Networks*

Lista de Figuras

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Elementos de uma rede WirelessHART. | 8 |
| 2.2 | Elementos de uma rede WIA-PA. | 10 |
| 2.3 | Elementos de uma rede ISA100.11a. | 11 |
| 2.4 | Padrões IEEE 802 Wireless e os padrões de RSSFI circulados. | 13 |
| 2.5 | Estrutura <i>superframe</i> do padrão IEEE 802.15.4. | 18 |
| 2.6 | Estrutura <i>superframe</i> do padrão WIA-PA. | 18 |
| 2.7 | Estrutura <i>superframe</i> dos padrões WirelessHART e ISA 100.11a. | 19 |
| 2.8 | TSCH <i>slotframe</i> (esquerda) e <i>timeslot</i> (direita). | 21 |
| 2.9 | Salto de canais do padrão WirelessHART. | 23 |
| 2.10 | Salto de canais pré-programado #1 do padrão ISA 100.11a. | 24 |
| 2.11 | Salto de canais pré-programado #1, com deslocamento (<i>offset</i>), do padrão ISA 100.11a. | 25 |
| 2.12 | Salto de canais lento do padrão ISA 100.11a. | 25 |
| 2.13 | Salto de canais híbrido do Padrão ISA 100.11a. | 26 |
| 2.14 | Taxonomia de LQEs. | 28 |
| 4.1 | MiWi Demo Kit. | 40 |
| 4.2 | 8-bit Wireless Development Kit. | 40 |
| 4.3 | Protótipo de placa LQE. | 40 |
| 4.4 | Transceptor MRF24J40MA 2,4GHz. | 40 |
| 4.5 | Estrutura temporal do <i>slotframe</i> do protocolo. | 42 |
| 4.6 | Estação de Injeção de Água. | 44 |
| 4.7 | Alturas dos nós distribuídos na EIA. | 45 |
| 4.8 | Distâncias dos nós distribuídos na EIA. | 46 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.9 | Variações na qualidade dos canais, para diferentes nós (1º dia de experimentos). | 47 |
| 4.10 | Variações na qualidade dos canais, para diferentes nós (2º dia de experimentos). | 49 |
| 4.11 | Comparação dos resultados entre os dois dias de experimentos. | 49 |
| 4.12 | Estação de aquecimento solar. | 51 |
| 4.13 | Distâncias dos nós distribuídos na Termosolar. | 51 |
| 4.14 | Calhas parabólicas acompanhando o sol. | 52 |
| 4.15 | Potência nos canais 11 e 15 e ângulos das calhas na posição 1. | 53 |
| 4.16 | Potência nos canais 19 e 23 e ângulos das calhas na posição 2. | 54 |
| 4.17 | Potência nos canais 17 e 19 e ângulos das calhas na posição 3. | 55 |
| 4.18 | Canais com melhor potência recebida em intervalos de 1 minuto na posição 1. | 55 |
| 4.19 | Canais com melhor potência recebida em intervalos de 1 minuto na posição 2. | 56 |
| 4.20 | Canais com melhor potência recebida em intervalos de 1 minuto na posição 3. | 56 |
| 4.21 | Comparação entre o melhor canal (23) durante todo tempo e os melhores canais em intervalos de 1 minuto na posição 1. | 57 |
| 4.22 | Comparação entre o melhor canal (23) durante todo tempo e os melhores canais em intervalos de 1 minuto na posição 2. | 58 |
| 4.23 | Comparação entre o melhor canal (17) durante todo tempo e os melhores canais em intervalos de 1 minuto na posição 3. | 58 |
| 4.24 | Estação de carregamento de derivados. | 59 |
| 4.25 | Distâncias e Alturas dos nós. | 60 |
| 4.26 | RSSF com topologia estrela. | 60 |
| 4.27 | 1º dia de experimento (a) Nó 1 (b) Nó 3 - 2º dia de experimento (c) Nó 1 (d) Nó 3. | 64 |
| 4.28 | 2º dia de experimento - Nó 3 - Canal 25 - LQE e Potência do enlace de subida. | 64 |
| 4.29 | 2º dia de experimento - Nó 1 - Canais 22 e 26 - LQE. | 65 |
| 5.1 | RSSF com topologia em árvore. | 70 |
| A.1 | Dr. Ruan D. Gomes (esquerda) e Dr. Iguatemi E. Fonseca (direita) na EIA. | 77 |
| A.2 | Visão do Nó 1 para o coordenador. | 78 |
| A.3 | Visão detrás do Nó 1 para o coordenador. | 78 |
| A.4 | Visão do Nó 1 próximo a instrumentos. | 78 |

| | | |
|------|--|----|
| A.5 | Visão do Nó 2 para o coordenador. | 79 |
| A.6 | Visão detrás do Nó 2 para o coordenador. | 79 |
| A.7 | Visão do Nó 2 próximo a instrumentos. | 79 |
| A.8 | Visão do Nó 3 para o coordenador. | 80 |
| A.9 | Visão detrás do Nó 3 para o coordenador. | 80 |
| A.10 | Visão do Nó 3 próximo a instrumentos. | 80 |
| A.11 | Visão do Nó 4 para o coordenador. | 81 |
| A.12 | Visão detrás do Nó 4 para o coordenador. | 81 |
| A.13 | Visão do Nó 4 próximo a instrumentos. | 81 |
| A.14 | Visão do Nó 5 para o coordenador. | 82 |
| A.15 | Visão detrás do Nó 5 para o coordenador. | 82 |
| A.16 | Visão do Nó 5 próximo a instrumentos. | 82 |
| A.17 | Visão do Nó 6 para o coordenador. | 83 |
| A.18 | Visão detrás do Nó 6 para o coordenador. | 83 |
| A.19 | Visão do Nó 6 próximo a instrumentos. | 83 |
| A.20 | Visão do Nó 7 para o coordenador. | 84 |
| A.21 | Visão detrás do Nó 7 para o coordenador. | 84 |
| A.22 | Visão do Nó 7 próximo a instrumentos. | 84 |
| A.23 | Visão do Nó 8 para o coordenador. | 85 |
| A.24 | Visão detrás do Nó 8 para o coordenador. | 85 |
| A.25 | Visão do Nó 8 próximo a instrumentos. | 85 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Evolução dos Padrões IEC para RSSFI | 7 |
| 2.2 | Evolução do Padrão IEEE 802.15.4 | 15 |

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

As Redes de Sensores sem Fio Industriais (RSSFI), utilizadas na implementação de sistemas de monitoramento e controle, possuem um conjunto de vantagens em relação às redes industriais cabeadas que buscam os mesmos objetivos. Podemos destacar a possibilidade de instalação de sensores sem fio em locais de difícil acesso (onde a utilização da solução cabeada não é prática) ou em locais onde não é viável a instalação de cabos. Além disso também podemos usufruir de maior flexibilidade para acomodar mudanças e expansões da rede de sensores, diminuição da complexidade e das despesas existentes com a infraestrutura de cabeamento e redução dos requisitos de energia (SHAMSI, 2015).

Como o meio de comunicação das redes sem fio não é confiável e as RSSFI exigem comunicação determinística e confiável, um conjunto de desafios devem ser enfrentados para que seja possível a efetiva utilização destas redes. As RSSFI também precisam lidar com características específicas de ambientes industriais, tais como sujeira, poeira, calor, umidade e vibração, que podem prejudicar o funcionamento da rede (EHRlich; WISNIEWSKI; JASPERNEITE, 2018).

Este trabalho trata da discussão sobre os problemas de comunicação de rádio devido à presença de objetos, comumente construídos com materiais metálicos, em ambientes industriais ao ar livre (TANGHE et al., 2008), que podem causar desvanecimento em pequena escala devido à propagação multipercursos (CHEFFENA, 2016). As RSSFI também enfrentam outros desafios relacionados a comunicação, tais como interferência e atenuação dos

sinais transmitidos, como consequência do desvanecimento em larga escala. Ademais, a qualidade dos canais utilizados para comunicação pode variar espacialmente e no tempo, assim o mesmo canal pode apresentar diferentes níveis de qualidade para diferentes nós e diferentes níveis de qualidade ao longo do tempo (QUEIROZ et al., 2017).

De acordo com os problemas acima mencionados, uma RSSFI pode ter seu desempenho geral melhorado ou degradado durante sua operação, uma vez que podem ocorrer mudanças nas características dos canais sem fio. Para lidar com essas variações, alguns mecanismos de diversidade devem ser usados para permitir a alternância de canais ao longo do tempo. Exemplos de tais mecanismos incluem adaptação de canal e salto de canal. Outra abordagem que pode ser usada em conjunto com o salto de canal é o da adoção de uma lista negra, que consiste em identificar canais interferidos que apresentam má qualidade e evitar usá-los na sequência de salto de frequências (ZORBAS; PAPADOPOULOS; DOULIGERIS, 2018).

Para implementar os mecanismos de diversidade de canais, é necessário estimar continuamente a qualidade dos canais utilizados na rede. No entanto, em geral, os padrões não definem como o Estimador de Qualidade de Enlace (*Link Quality Estimator*, LQE) deve ser implementado (GOMES et al., 2017). Portanto, é necessário estudar estratégias para estimar a qualidade do enlace, a fim de melhorar o processo de decisão de alocação de canais, gerando o mínimo de processamento nos nós e de tráfego na rede. Neste contexto, este trabalho descreve avaliações experimentais de RSSFI implantadas em ambientes industriais ao ar livre, de modo a obter informações importantes sobre a qualidade dos canais sem fio definidos pelo padrão 802.15.4 nesses tipos de ambientes, bem como avaliar o desempenho de uma solução específica para estimação de qualidade de enlace em RSSFI, que foi proposta inicialmente em (GOMES et al., 2017).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar a avaliação experimental de RSSFI, especificamente em ambientes industriais ao ar livre, para observar a influência da dinâmica do ambiente na qualidade dos enlaces de rádio em diferentes canais de comunicação e estudar a utilização de estimadores de qualidade de

enlace para melhorar a confiabilidade das RSSFI.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar experimentos de caracterização dos canais em ambiente ao ar livre, predominantemente estático, com pouca movimentação de equipamentos e pessoal. O ambiente escolhido foi uma planta industrial de injeção de água em campos de petróleo;
- Realizar experimentos de caracterização dos canais em ambiente ao ar livre, com movimentação determinística, onde estruturas metálicas denominadas calhas coletoras de energia solar trazem dinamicidade em horários conhecidos. O ambiente escolhido foi uma planta industrial de aquecimento solar de petróleo;
- Realizar experimentos de caracterização dos canais em ambiente ao ar livre, com movimentação não determinística, onde caminhões tanque se movimentam dinamicamente e em horários não específicos. O ambiente escolhido foi uma planta industrial de carregamento de derivados de petróleo;
- Validar ineditamente, em ambiente industrial ao ar livre, o estimador de qualidade de enlace (*Link Quality Estimator*, LQE) descrito por Gomes em sua tese em 2017, implementando-o em um protótipo de Nó sensor LQE, também desenvolvido por Gomes.

1.3 Proposta de Pesquisa

A atual pesquisa, com foco nas camadas física e de enlace das RSSFI, tem como público alvo, pesquisadores e engenheiros que desenvolvem e implementam protocolos de comunicação, em níveis mais baixos das camadas destas redes, como também desenvolvedores e analistas que trabalham com aplicações em níveis mais altos das camadas de rede das RSSFI, pois podem usufruir de informações sobre os enlaces de comunicação e tornar mais confiáveis as aplicações executadas em RSSFI. Este trabalho também contribuirá para melhorar a compreensão da rádio comunicação, nas frequências definidas no padrão IEEE 802.15.4, em ambientes industriais ao ar livre, buscando identificar as principais dificuldades encontradas

e discutindo possíveis soluções, baseadas em estimadores de qualidade de enlace, para os problemas enfrentados.

1.4 Estrutura da Dissertação

- Capítulo 2 - Fundamentação Teórica. Consiste na revisão de textos, artigos, livros e periódicos pertinentes à revisão da literatura que possa embasar, por meio das ideias de outros autores, aspectos teóricos da pesquisa, buscando compreender melhor o fenômeno estudado;
- Capítulo 3 - Trabalhos Relacionados. Lista-se estudos na área do problema específico deste trabalho, destacando-se o que já foi produzido de importante e com resultados obtidos sobre o problema em questão. Foram divididos em duas categorias, sendo uma relacionada à caracterização de canais em RSSFI em ambientes ao ar livre e outra relacionada à estimação de qualidade de enlaces em RSSF;
- Capítulo 4 - Avaliação Experimental. Realização de experimentos que buscam caracterizar o rádio enlace multicanal em ambientes industriais ao ar livre. Três plantas industriais ao ar livre hospedaram os experimentos. Um com características estáticas e os outros com características dinâmicas. No último experimento foram validados um estimador de qualidade de enlace e um Nó LQE propostos por Gomes em 2017;
- Capítulo 5 - Conclusão. Elencada a produção científica durante a realização da dissertação, dentre os quais tivemos artigos publicados e aceitos para publicação, além de capítulo de livro aceito para futura publicação. Os resultados da dissertação são apresentados de forma sucinta e são apresentadas sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Redes de Sensores Sem Fio Industriais

Os sistemas atuais de monitoramento e controle industrial em larga escala consistem de milhares de sensores, controladores e atuadores. Para realizar suas tarefas, é essencial que os dispositivos se comuniquem. No passado, essa comunicação era realizada apenas por sistemas com fio (ponto-a-ponto), que necessitavam de uma grande quantidade de fiação e conectores. Tais elementos introduziam no sistema um grande número de pontos de possíveis falhas, resultando em uma solução pouco confiável. Essas desvantagens resultaram na substituição dos sistemas ponto-a-ponto por redes industriais, conhecidas como *fieldbus networks* (ZAND et al., 2012).

Ao longo das últimas décadas, a indústria desenvolveu uma miríade de protocolos para *fieldbus networks*, por exemplo, Foundation Fieldbus H1, ControlNet, PROFIBUS, CAN. Comparados aos sistemas tradicionais ponto-a-ponto, as *fieldbus networks* permitem maior confiabilidade, visibilidade e também habilitam recursos avançados, tais como, controle distribuído, diagnóstico, segurança e interoperabilidade dos dispositivos. Embora estas tecnologias de redes industriais sejam suficientes para realizar tarefas de monitoramento e controle, a natureza distribuída das futuras aplicações industriais requer uma mudança de paradigma, na qual o foco precisa mudar de operações locais para uma abordagem onde novos benefícios e sinergias são descobertos a partir da interconexão e comunicação entre sistemas ilhados.

As tecnologias sem fio têm o potencial de desempenhar um papel fundamental no monitoramento e controle industrial, pois possuem vantagens fundamentais em relação às redes

com fio convencionais. Além de reduzir o volume dos custos de instalação, a tecnologia sem fio permite a implantação de monitoramento e controle em áreas que não podiam ser atendidas por soluções com fio (por exemplo, equipamentos que se movimentam). Modificações da topologia de rede (em termos de adição ou reorganização de nós) também podem ser facilmente executadas sem incorrer em custos adicionais com cabeamento.

Por meio de uma maior escalabilidade, as RSSFI também podem executar algoritmos colaborativos (por exemplo, para monitoramento de vibração de equipamentos). Os sistemas sem fio também exigem menos manutenção, uma vez que, ao contrário de suas contrapartes com fio, não são propensos a danos ocasionados por corrosão ou desgaste. Assim, essa combinação única de aumento de escalabilidade e robustez através do uso mecanismos distribuídos, tornam as RSSFI uma boa opção para o desenvolvimento futuro das aplicações industriais que requerem processamento fino, flexível, robusto, com baixo custo e pouca manutenção (ZAND et al., 2012).

Devido a características e desafios técnicos únicos, o desenvolvimento das RSSFI requer uma combinação de especializações em várias disciplinas diferentes. Em primeiro lugar, experiência industrial e conhecimento específico do problema são necessários para o domínio da aplicação. Em segundo lugar, *expertise* em tecnologia de sensores é essencial para compreender completamente os problemas associados à calibração de sensores, transdutores com ruído e relógio dessincronizado. Terceiro, conhecimento do ambiente de propagação é necessário para abordar os desafios de comunicação e problemas de interferência de rádio frequência no ambiente industrial. Finalmente, é necessário conhecimento em redes para entender as arquiteturas hierárquicas da rede e integrar redes de diferentes tipos, necessárias para fornecer arquiteturas flexíveis e escaláveis para aplicações heterogêneas da indústria (GUNGOR; HANCKE et al., 2009).

Segundo Wang e Jiang, no ano de 2010, pesquisas foram realizadas no meio industrial para descobrir quais os principais empecilhos para a adoção potencial das RSSFI. Os resultados apontaram que a confiabilidade dos dados é classificada como a principal preocupação para a adoção de RSSFI. A segunda preocupação é a falta de padronização, pois é arriscado para qualquer empresa implantar RSSFI em larga escala, a menos que sejam apoiadas por padrões amplamente aceitos a nível internacional. Para atender tais necessidades, foram padronizados internacionalmente, pelo IEC, o WirelessHART (IEC 62591), o WIA-PA (IEC

62601) e o ISA 100.11a (IEC 62734). Na Tabela 2.1 é mostrado um resumo da evolução dos padrões definidos pela IEC para as RSSFI, com detalhes tais como: data de lançamento, nome do padrão, código do padrão, número da edição, situação atual (status) e previsão de encerramento da validade do padrão (estabilidade).

2.1.1 WirelessHART

É uma especificação da tecnologia de RSSFI, que é baseada no protocolo de comunicação *Highway Addressable Remote Transducer* (HART) da *Hart Communication Foundation* (HCF). Em 2004, a HCF anunciou a criação de um grupo de trabalho para desenvolvimento do padrão WirelessHART, que culminou, em 2007, com a aprovação formal da especificação do protocolo pelos membros do HCF (LIANG et al., 2011).

Evolução do Padrão IEC 62591

O WirelessHART tornou-se uma *Publicly Available Specification* (PAS) em 2009, com o código IEC PAS 62591:2009. Em 2010, o WirelessHART teve sua aprovação final pela IEC, tornando-se o primeiro padrão internacional de RSSFI, com o código IEC 62591:2010. Finalmente, em 2016, foi publicada a segunda edição do padrão, com o código IEC 62591:2016 e com estabilidade até o final de 2022 (IEC62591, 2016).

Arquitetura de Rede do Padrão IEC 62591

Os elementos básicos em uma rede WirelessHART (Figura 2.1) incluem: dispositivos de campo (*field devices*); ponte de ligação (*gateway*); pontos de acesso (*access points*); geren-

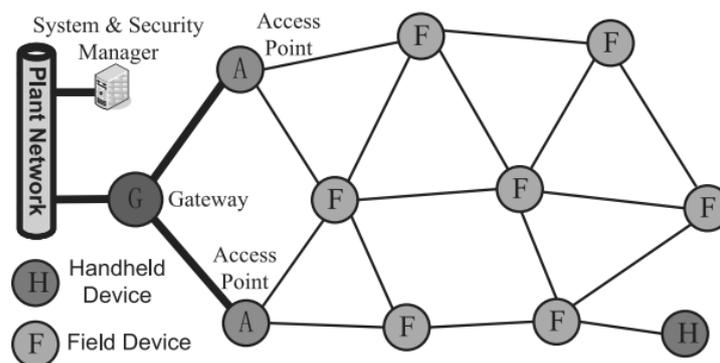
Tabela 2.1: Evolução dos Padrões IEC para RSSFI

| Lançamento | Nome | Código do Padrão | Edição | Status | Estabilidade |
|------------|--------------|--------------------|--------|-------------|--------------|
| 12/01/2009 | WIA-PA | IEC PAS 62601:2009 | 1.0 | Substituído | - |
| 22/01/2009 | WirelessHART | IEC PAS 62591:2009 | 1.0 | Substituído | - |
| 27/04/2010 | WirelessHART | IEC 62591:2010 | 1.0 | Revisado | - |
| 29/11/2011 | WIA-PA | IEC 62601:2011 | 1.0 | Revisado | - |
| 26/03/2012 | ISA 100.11a | IEC PAS 62734:2012 | 1.0 | Substituído | - |
| 28/10/2014 | ISA 100.11a | IEC 62734:2014 | 1.0 | Válido | 2019 |
| 09/12/2015 | WIA-PA | IEC 62601:2015 | 2.0 | Válido | 2022 |
| 30/03/2016 | WirelessHART | IEC 62591:2016 | 2.0 | Válido | 2022 |

tes de rede e de segurança (*system and security manager*); e dispositivos portáteis (*handheld devices*). Os dispositivos de campo, que estão localizados na planta industrial, ligados diretamente aos equipamentos do processo, possuem funcionalidade completa com capacidade de roteamento. Tais dispositivos de campo são organizados em topologia de rede do tipo estrela ou malha. No entanto, a topologia em estrela não é recomendada pelo padrão. Já o ponto de acesso serve para interconectar os dispositivos de campo à ponte de ligação, que é configurada pelo gerenciador de rede, utilizando-se de comandos HART para realizar tal tarefa. O gerenciador de rede ainda é responsável pelo gerenciamento das tabelas de roteamento, diagnóstico de problemas, agendamento e gerenciamento das comunicações entre os dispositivos restantes da rede.

Figura 2.1: Elementos de uma rede WirelessHART.

Fonte: Wang e Jiang, 2016.



As redes WirelessHART podem incluir vários gerenciadores de rede por questões de redundância, no entanto, apenas um deve estar ativo por vez. O gerente de segurança colabora com o gerente de rede buscando evitar invasões e ataques contra a rede, gerando chaves de sessão, chaves de acesso e chaves de rede. Cada gerente de segurança pode colaborar com vários gerentes de rede responsáveis pela distribuição das chaves para os dispositivos de campo. (WANG; JIANG, 2016)(CHRISTIN; MOGRE; HOLLICK, 2010).

2.1.2 WIA-PA

É uma de arquitetura de sistema de comunicação de RSSFI que foi desenvolvida inicialmente pela Aliança Industrial Sem Fio Chinesa (*Chinese Industrial Wireless Alliance, CIWA*) com o objetivo de padronizar requisitos de automação de processos sem fio. Em 2007, a CIWA

foi criada por um grupo de mais de 10 universidades, institutos e empresas, sendo capitaneado pelo Instituto Shenyang de Automação (*Shenyang Institute of Automation*), responsável pela criação do padrão WIA-PA (*Wireless Networks for Industrial Automation - Process Automation*). (LIANG et al., 2011)

Evolução do Padrão IEC 62601

WIA-PA tornou-se uma PAS em 2009, com o código IEC PAS 62601:2009. Em 2011, o WIA-PA foi aprovado pela IEC sob o código IEC 62601:2011. Em 2015 aconteceu a publicação da segunda edição do padrão, com o código IEC 62601:2015 e com estabilidade até o final de 2022 (IEC62601, 2015).

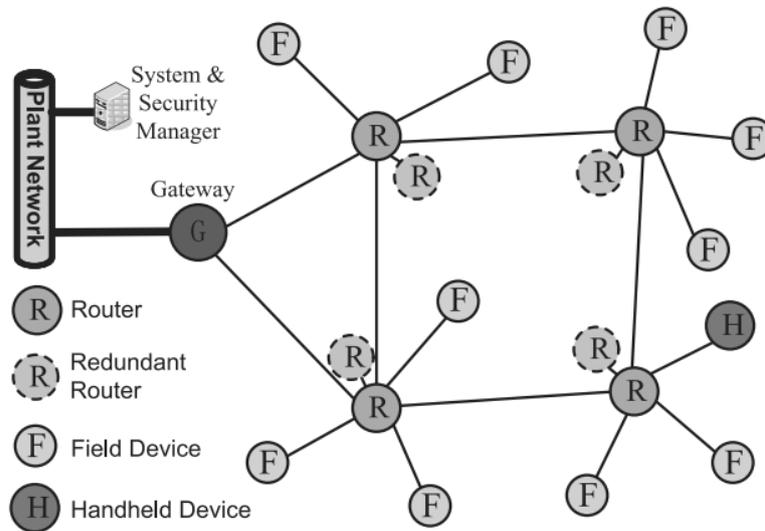
Arquitetura de Rede do Padrão IEC 62601

Uma rede WIA-PA típica segue uma topologia de rede hierárquica, que consiste na união da topologia estrela com a topologia em malha. O primeiro nível da rede possui uma topologia em malha, que consiste em roteadores e pontes de ligação, enquanto o segundo nível é uma topologia em estrela, composta de roteadores e dispositivos de campo e dispositivos portáteis. Uma rede WIA-PA consiste em cinco tipos de dispositivos: gerentes de rede e segurança (*system and security manager*); ponte de ligação (*gateway*); dispositivos de roteamento (*routers*); dispositivos de campo (*field devices*); e dispositivos portáteis (*handheld devices*), conforme Figura 2.2.

Na sub-rede estrela, os dispositivos de roteamento desempenham o papel de nós centrais, também conhecidos como mestres de grupo (*cluster heads*). Já os dispositivos de campo e portáteis atuam como membros de grupo (*cluster members*), coletando dados de campo e enviando diretamente para os mestres de grupo. Os dispositivos de campo e portáteis não têm capacidade de roteamento, e só podem se comunicar com os seus próprios mestres de grupo. O mestre de grupo é responsável pela construção e monitoramento da rede estrela e considerando sua posição chave nesta sub-rede, a utilização de redundância para mestres de grupos é altamente recomendada, para que possam atuar em caso de defeito no mestre de grupo. (WANG; JIANG, 2016) (IEC62601, 2015).

Figura 2.2: Elementos de uma rede WIA-PA.

Fonte: Wang e Jiang, 2016.



2.1.3 ISA 100.11a

É um padrão de RSSFI proposto pela Sociedade Internacional de Automação (*International Society of Automation*, ISA). Em 2005 a ISA montou um grupo conhecido por ISA100 que iniciou o processo de padronização de uma tecnologia de RSSFI. Em 2009, a ISA criou o Instituto de Conformidade Sem Fio ISA100 (*ISA100 Wireless Compliance Institute*, WCI) para se responsabilizar pelo desenvolvimento do padrão. Ainda em 2009 foi oficialmente lançado o padrão ISA100.11a (LIANG et al., 2011).

Evolução do Padrão IEC 62734

Em 2012 o ISA100.11a tornou-se PAS, com o código IEC PAS 62734:2012 e no ano de 2014 foi aprovado oficialmente pela IEC, com o código IEC 62734:2014. Atualmente o padrão está com o status de trabalho em progresso (*Work in Progress*) com previsão de publicação de atualização, para o ano de 2019 (IEC62734, 2014).

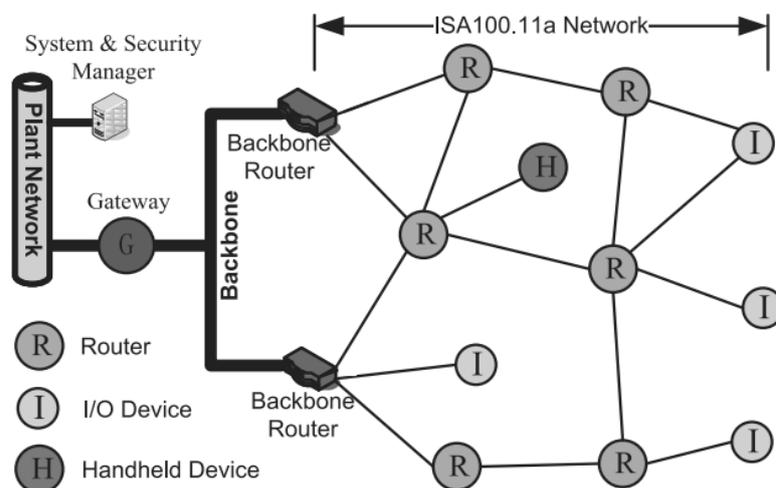
Arquitetura de rede do Padrão IEC 62734

Na Figura 2.3 é exibida a estrutura de uma rede ISA100.11a. Neste tipo de rede duas classes principais de dispositivos são definidas: dispositivos de campo e dispositivos de infraestrutura. Dispositivos de campo incluem três tipos: dispositivos de roteamento, cujas ca-

pacidades de roteamento podem ser desativadas para otimizar o desempenho do sistema (diminuindo a latência de mensagem ou o consumo de energia); dispositivos de entrada e saída (E/S), que são dispositivos com função reduzida e sem capacidade de roteamento e propagação do relógio, mas que fornecem ou utilizam dados de outros dispositivos (por exemplo, sensores de campo ou atuadores). Um propósito original para definir esse tipo de dispositivo seria a busca de requisitos de menor complexidade com potencial de baixo consumo de energia; e dispositivos portáteis, que são tratados como dispositivos de campo sem roteamento.

Figura 2.3: Elementos de uma rede ISA100.11a.

Fonte: Wang e Jiang, 2016.



De acordo com o padrão, estes dispositivos de campo formam sub-redes ilimitadas. A quantidade total de dispositivos em toda a rede não é limitada, no entanto, a quantidade de dispositivos por sub-rede é restrita, pelo espaço de endereçamento, a 30 mil dispositivos. A segunda classe, os dispositivos de infraestrutura, consistem de roteadores principais (*backbone routers*), pontes de ligação (*gateways*) e gerentes de sistemas e segurança (*system and security managers*). Roteadores principais (*backbone routers*) também podem atuar como roteadores intermediários (*proxys*) para essas redes. (WANG; JIANG, 2016)(CHRISTIN; MOGRE; HOLLICK, 2010).

2.1.4 O Padrão IEEE 802.15.4

Motivado pelas crescentes demandas por redes que unissem os requisitos de baixo consumo de energia e de baixo custo, o Comitê de Novos Padrões (*New Standards Committee*, NES-COM) do IEEE, criou oficialmente, em dezembro de 2000, um grupo de trabalho conhecido por *Task Group 4* (TG4), dentro de um grupo maior, o 802.15, que trabalha desenvolvendo padrões para as redes sem fio de alcance pessoal (*Wireless Personal Area Networks*, WPAN), ou redes sem fio de curta distância. O TG4 tinha como objetivo principal desenvolver um novo padrão de WPAN, com baixa taxa de transmissão, ou seja, uma *Low-Rate* WPAN (LR-WPAN). Assim, foi dado o primeiro passo para o que culminaria na criação do padrão IEEE 802.15.4, que fornece conectividade sem fio, com baixa complexidade, baixo custo, baixo consumo de energia e baixa taxa de transferência de dados entre dispositivos portáteis, fixos ou móveis. Podemos afirmar que o padrão é apropriado para quando o consumo de energia é uma questão importante e onde trocas infrequentes de pequenos pacotes de dados é suficiente para atender as necessidades. É importante frisar que o TG4 teve como escopo de projeto apenas a especificação das camadas físicas e de controle de acesso ao meio, assim, está fora da definição do padrão IEEE 802.15.4 quaisquer outras camadas da rede (GUTIERREZ et al., 2001).

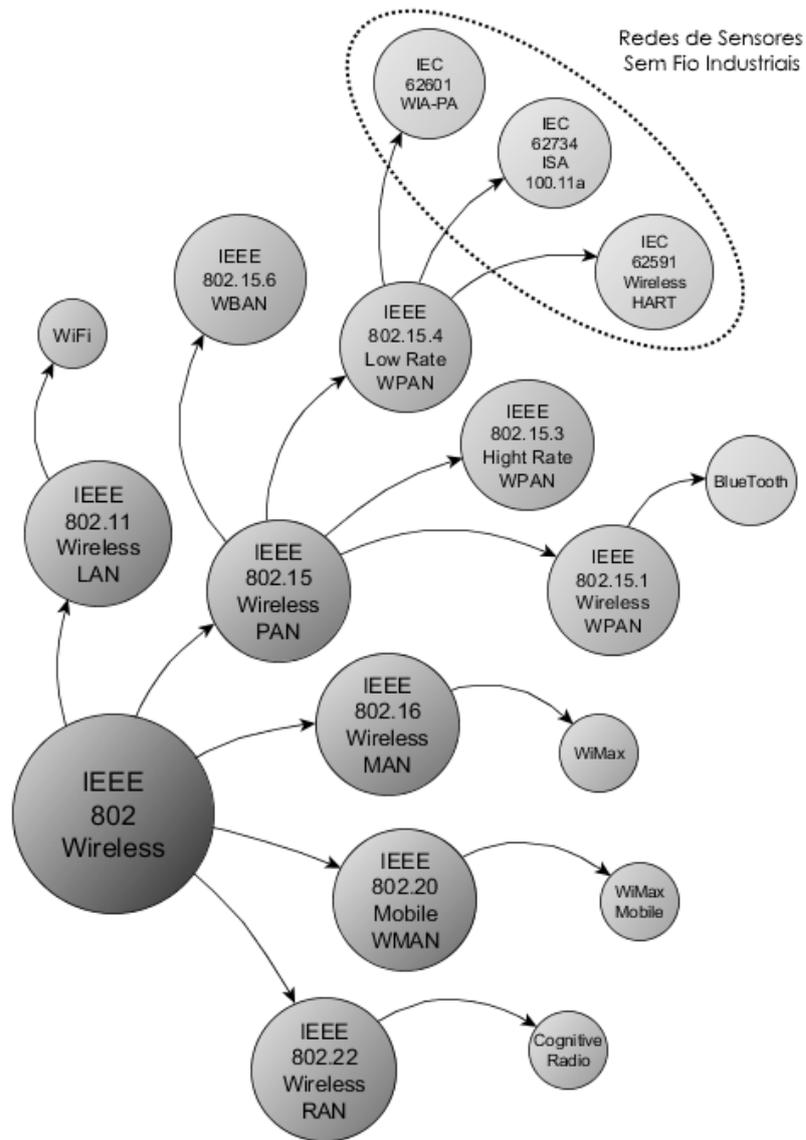
Os padrões de RSSFI apresentados são baseados nas camadas física e de controle de acesso ao meio (nesta camada não completamente em alguns casos, como descrito a seguir) do padrão IEEE 802.15.4. Todos os padrões IEC para RSSFI, nas suas versões atualmente válidas, fazem referência à revisão 2011 do padrão IEEE 802.15.4. (IEC62591, 2016) (IEC62601, 2015) (IEC62734, 2014).

Na Figura 2.4 é exibida uma visão geral dos padrões mais importantes que pertencem à família IEEE 802 Wireless. Circulados por linha tracejada, aparecem os três padrões para RSSFI padronizados internacionalmente pela IEC.

Camada Física do IEEE 802.15.4-2003

A camada física do IEEE 802.15.4-2003 opera na banda de 2,4 GHz, bem como nas bandas de 868 MHz e 915 MHz na Europa e América do Norte, respectivamente. A banda de frequência de 2,4 GHz é dividida em 16 canais com uma taxa máxima de transferência de

Figura 2.4: Padrões IEEE 802 Wireless e os padrões de RSSFI circulados.



Autor: Emerson Brasil Gomes, 2018

dados de 250 *kbit/s* nominal por canal, separados por um intervalo de 5 MHz, enquanto a banda de 915 MHz é dividida em 10 canais com uma taxa máxima de transferência de dados de 40 *kbit/s* cada. Um único canal é definido na banda de frequência de 868 MHz e apresenta uma taxa máxima de transferência de dados de 20 *kbit/s*. Como a banda de frequência de 2,4 GHz pode ser utilizada livremente em todo o mundo, com exceção do canal 26 que não tem o seu uso permitido em alguns países, e dado o fato que os padrões WirelessHART, WIA-PA e ISA100.11a são padrões internacionais, todos os três escolheram utilizar apenas a banda de frequência de 2,4 GHz. Assim o ISA100.11a e WIA-PA utilizam 16 canais da banda, enquanto o WirelessHART utiliza 15 canais (a utilização do canal 26 não é permitida no padrão). (WANG; JIANG, 2016) (CHRISTIN; MOGRE; HOLLICK, 2010).

Evolução do Padrão IEEE 802.15.4

A Tabela 2.2 contempla todas as publicações relacionadas ao padrão IEEE 802.15.4. As publicações estão divididas por tipo (base, emenda ou correção) e por status (ativo, esboço ou inativo). A seguir, é detalhado como aconteceu a evolução do padrão. O padrão inicial, IEEE 802.15.4-2003, definiu duas camadas físicas, operando em diferentes faixas de frequência e apenas uma camada de acesso ao meio. Após a versão inicial, três revisões foram liberadas.

Em 2006, a primeira revisão liberada adicionou mais duas opções de camadas físicas. A camada de acesso ao meio permaneceu compatível com a versão inicial, mas adicionou novas opções e uma variedade de aprimoramentos, incluindo os seguintes: suporte a uma base de tempo compartilhada com um mecanismo de marcação de tempo; suporte para agendamento de *beacons*; sincronização de mensagens de broadcast em redes de área pessoal (*Personal Area Networks*, PANs) habilitadas para utilização de *beacons* e aprimoramentos de segurança.

Em 2011, a norma foi mais uma vez revisada e passou a incluir três alterações aprovadas após a revisão de 2006. Este esforço acrescentou mais quatro opções de camadas físicas junto com uma nova característica da camada de acesso ao meio, para estimação de distâncias entre nós. Além disso, a organização do padrão foi alterada de modo que cada camada física passou a ter uma seção separada enquanto a camada de acesso ao meio foi dividida em: descrição funcional, especificação de interface e especificação de segurança.

A atual versão base da norma (IEEE 802.15.4-2015), foi criada para reunir as alterações

aprovadas após a revisão de 2011 e engloba seis alterações na camada física e uma alteração na camada de acesso ao meio, além de retificações e esclarecimentos.

Tabela 2.2: Evolução do Padrão IEEE 802.15.4

| Código do Padrão | Lançamento | Status | Tipo |
|--------------------|------------|---------|----------|
| 802.15.4-2003 | 2003-10-01 | Inativo | Base |
| 802.15.4a-2007 | 2007-08-31 | Inativo | Emenda |
| 802.15.4-2006 | 2006-09-07 | Inativo | Base |
| 802.15.4c-2009 | 2009-04-17 | Inativo | Emenda |
| 802.15.4d-2009 | 2009-04-17 | Inativo | Emenda |
| 802.15.4-2011 | 2011-09-05 | Inativo | Base |
| 802.15.4e-2012 | 2012-04-16 | Inativo | Emenda |
| 802.15.4f-2012 | 2012-04-20 | Inativo | Emenda |
| 802.15.4g-2012 | 2012-04-27 | Inativo | Emenda |
| 802.15.4j-2013 | 2013-02-27 | Inativo | Emenda |
| 802.15.4k-2013 | 2013-08-14 | Inativo | Emenda |
| 802.15.4m-2014 | 2014-04-30 | Inativo | Emenda |
| 802.15.4n-2016 | 2016-04-29 | Ativo | Emenda |
| 802.15.4p-2014 | 2014-05-05 | Inativo | Emenda |
| 802.15.4q-2016 | 2016-04-29 | Ativo | Emenda |
| 802.15.4s-2018 | 2018-06-27 | Ativo | Emenda |
| 802.15.4t-2017 | 2017-04-14 | Ativo | Emenda |
| 802.15.4u-2016 | 2017-02-10 | Ativo | Emenda |
| 802.15.4-2015 | 2016-04-22 | Ativo | Base |
| 802.15.4-2015 Cor1 | 2018-07-09 | Ativo | Correção |
| 802.15.4v-2017 | 2017-06-30 | Ativo | Emenda |
| 802.15.4x-2019 | 2019-03-21 | Ativo | Emenda |
| 802.15.4w | - | Esboço | Emenda |
| 802.15.4y | - | Esboço | Emenda |
| 802.15.4z | - | Esboço | Emenda |
| 802.15.4md | - | Esboço | Base |

Os recursos adicionados pelas emendas incluem os seguintes: formatos de quadros aprimorados, mantendo compatibilidade com versões anteriores; elementos de informação (*Information Elements*, IEs); agilidade de canais; opções estendidas de *superframes*; mecanismos de baixo consumo de energia; um *frame* de reconhecimento aprimorado que pode transportar dados e ser protegido; acesso priorizado a canais; uma variedade de novas opções de modulação, codificação e faixas de frequência na camada física, para suportar uma ampla variedade de aplicações, incluindo identificação por radiofrequência (*radio frequency identification*, RFID), redes inteligentes de serviços públicos (*smart utility networks*, SUNs),

operação na faixa branca de televisão (*television white space*, TVWS), monitoramento de infraestrutura crítica com baixo consumo de energia (*low-energy critical infrastructure monitoring*, LECIM) e comunicações e controle ferroviários (*rail communications and control*, RCC).

O trabalho de elaboração de uma nova versão base da norma está sendo conduzido pelo *Task Group* 4md (TG4md), com o objetivo de corrigir erros, inconsistências e ambiguidades. Além disso, já existem sete emendas completas (802.15.4n, 802.15.4q, 802.15.4s, 802.15.4t, 802.15.4u, 802.15.4v e 802.15.4x) que deverão ser incorporadas na nova versão base. Este conjunto de emendas fornecem juntas seis novas opções de camadas físicas e dois novos aprimoramentos da camada de acesso ao meio, um dos quais com recursos de medições de qualidade das faixas de frequências em uso, além de definição de métricas de desempenho, tais como taxa de erro de entrega e recebimento de pacotes, atraso na entrega e recebimento de pacotes, etc.

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

2.1.5 Camada de Controle de Acesso ao Meio das RSSFI

Os comitês de padronização para os padrões WirelessHART, WIA-PA e ISA100.11a, na época do desenvolvimento destes, acabaram chegando a uma mesma conclusão em relação

à camada de controle de acesso ao meio do padrão IEEE 802.15.4: A referida camada não atenderia às necessidades das aplicações industriais e assim resolveram adotar diferentes estratégias para lidar com essa limitação. O padrão WIA-PA optou por evitar grandes modificações na estrutura já existente enquanto os padrões ISA100.11a e WirelessHART seguiram caminho oposto, optando por construir uma nova camada de controle de acesso ao meio.

O comitê responsável pelo padrão WIA-PA evitou qualquer modificação na camada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control*, MAC) do padrão IEEE 802.15.4, adotando-a diretamente em vez de definir sua própria camada MAC. Para atender aos rigorosos requisitos das aplicações industriais (por exemplo, confiabilidade, baixa latência e economia de energia), o padrão WIA-PA teve que definir um protocolo de subcamada de enlace de dados baseado no MAC do padrão IEEE 802.15.4, com algumas características adicionais. Esta camada de enlace de dados adicional inclui algumas funções novas, tais como o salto de frequência (*frequency hopping*), agregação e desagregação de pacotes e sincronização de tempo. Em contraste com a abordagem do padrão WIA-PA, os padrões WirelessHART e ISA100.11a consideraram que algumas funções da camada MAC do IEEE 802.15.4 resultariam em problemas no desempenho de seus sistemas em ambientes industriais e, portanto, preferiram alterá-la adicionando suas próprias funções, tais como, salto de canal (*channel hopping*), temporização do espaço de comunicação (*slot timing communication*) e TDMA/CSMA com sincronização de tempo (WANG; JIANG, 2016).

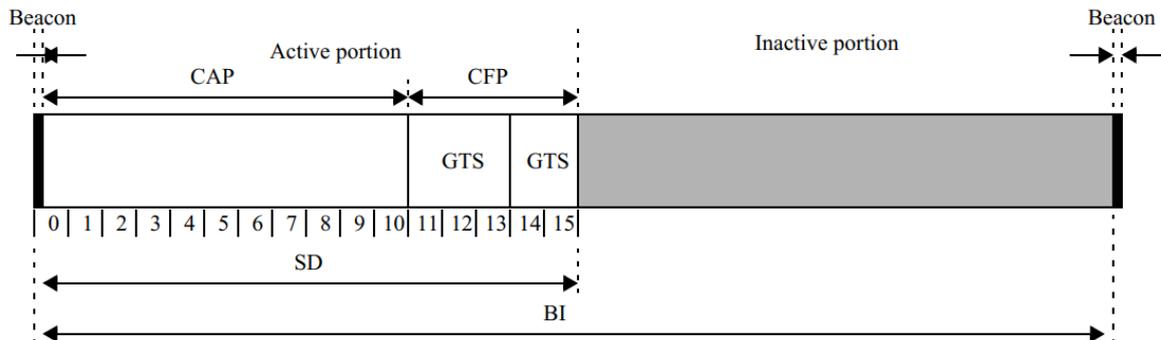
Estrutura Superframe

A estrutura *superframe* é utilizada para gerenciar o acesso aos canais. Tanto o *superframe* do padrão IEEE 802.15.4, Figura 2.5, quanto o *superframe* do padrão WIA-PA, Figura 2.6, compartilham características semelhantes, enquanto a estrutura *superframe* do WirelessHART tem mais características em comum com o *superframe* do padrão ISA100.11a.

Na Figura 2.5 é possível verificar um exemplo de estrutura *superframe* em uma rede habilitada para *beacons* que será analisada a seguir. Redes que utilizam *beacons* apresentam a estrutura *superframe* delimitada por dois *beacons* e esse intervalo é denominado *Beacon Interval* (BI). O BI é dividido em duas partes: a inicial, denominada período ativo (*Active Portion*) e a final, denominada período inativo (*Inactive Portion*), na qual o coordenador

Figura 2.5: Estrutura *superframe* do padrão IEEE 802.15.4.

Fonte: IEEE802.15.4-2015.

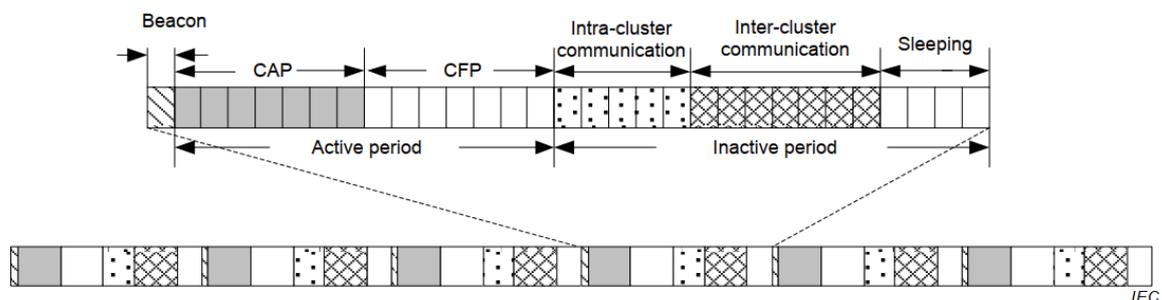


pode entrar em um modo de baixo consumo de energia (IEEE802.15.4-2015, 2015). No caso específico do padrão WIA-PA, além do modo de baixo consumo de energia (*sleeping*), o período inativo também é utilizado para realizar comunicações *intra-cluster* e *inter-cluster*, como pode ser visto na Figura 2.6 (WANG; JIANG, 2016).

O período ativo também pode ser chamado de *Superframe Duration* (SD) e é composto pelo período de acesso por contenção (*Contention Access Period*, CAP) e pelo período livre de contenção (*Contention Free Period*, CFP). Durante o CAP, um algoritmo com divisão de tempo em janelas (*Slotted*), de acesso múltiplo com verificação de portadora com prevenção de colisão (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* - CSMA-CA) é usado para acesso ao canal, enquanto que durante o CFP utiliza-se um algoritmo de divisão de tempo com acesso múltiplo (*Time Division Multiple Access*, TDMA) em no máximo 7 janelas de tempo garantido (*Guaranteed Time Slots*, GTSs), pré-atribuídas a nós individuais (GUGLIELMO; BRIENZA; ANASTASI, 2016).

Figura 2.6: Estrutura *superframe* do padrão WIA-PA.

Fonte: IEC62601, 2015.

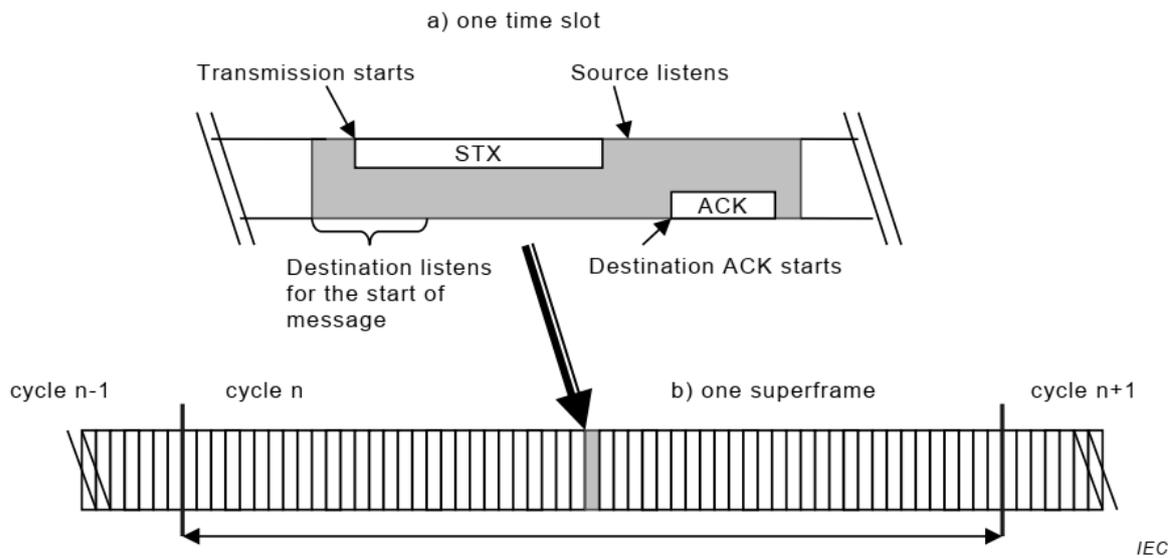


A estrutura de *superframe* dos padrões WirelessHART e ISA 100.11a está representada

na Figura 2.7, que é uma coleção de repetidas janelas de tempo (*timeslots*). O *superframe* no padrão WirelessHART é uma coleção distinta de intervalos de tempo exatos de 10 ms, enquanto o *superframe* no padrão ISA100.11a é constituído de intervalos de tempo de 10 ms ou de 12 ms (IEC62734, 2014).

Figura 2.7: Estrutura *superframe* dos padrões WirelessHART e ISA 100.11a.

Fonte: IEC62591, 2016.



Beaconing

O *beacon* é uma mensagem com formato específico que é utilizada para sincronizar os dispositivos de rede, identificar a rede e descrever a estrutura do *superframe*. Uma diferença significativa entre os quatro padrões é quanto ao suporte, ou não, para utilização de *beacons*. Em uma rede habilitada para *beacon*, tais como nos padrões IEEE 802.15.4 ou WIA-PA, o coordenador da rede envia um *beacon* em *broadcast*, isto é, o coordenador transmite o *beacon* para todos os receptores simultaneamente, para divulgar sua existência e qualquer dispositivo que deseja se conectar a tal rede, recebe o *beacon* com informação sobre a existência da rede e seu identificador (ID). Um dispositivo existente relatará um conflito se receber um *beacon* com o mesmo *Personal Area Network* (PAN) ID, mas com um endereço incorreto do coordenador. No entanto, uma rede não habilitada para *beacon*, tais como nos padrões WirelessHART ou ISA100.11a, não tem capacidade de enviar ou entender *beacons* e, portanto, não pode perceber a existência de outras redes habilitadas para *beacon* (WANG; JIANG,

2016).

Salto de Frequência ou Salto de Canal e Adaptação de Canal

O salto de frequência ou salto de canal é um método no qual o canal é comutado de acordo com uma sequência predefinida de canais e é usado no modo DSME, no modo *Time Slotted Channel Hopping* (TSCH) da emenda 802.15.4e do padrão 802.15.4-2011(IEEE802.15.4-2011, 2011), bem como em outros padrões para RSSFI reconhecidos internacionalmente pela Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission*, IEC): WirelessHART (IEC62591, 2016), WIA-PA (IEC62601, 2015) e ISA 100.11a (IEC62734, 2014). O salto de frequência é uma eficaz técnica para reduzir a interferência de outros dispositivos próximos que operam na mesma banda de frequência. Ele também fornece um nível de robustez para mitigar efeitos das interferências por multi-caminhos. Infelizmente, o salto de frequência também aumenta a complexidade dos protocolos e as dificuldades para desenvolvimento dos mesmos (GUGLIELMO; BRIENZA; ANASTASI, 2016).

A adaptação de canal é um método no qual o canal de um enlace não é alterado a menos que sua qualidade caia abaixo de um determinado limiar. Foi proposto, por exemplo, no modo *Deterministic and Synchronous Multichannel Extension* (DSME) da emenda IEEE 802.15.4e do padrão 802.15.4-2011 (GUGLIELMO; BRIENZA; ANASTASI, 2016).

Salto de Frequência no Padrão IEEE 802.15.4 (2003, 2006 e 2011)

Até o surgimento da emenda IEEE 802.15.4e-2012 e sua consolidação no padrão IEEE 802.15.4-2015, a camada MAC do padrão IEEE 802.15.4 utilizava apenas um canal de comunicação e não disponibilizava nenhum mecanismo de salto de frequência integrado para mitigar o efeito negativo de interferências e desvanecimento multi-caminho. Portanto, era uma rede sujeita a instabilidades frequentes (GUGLIELMO; BRIENZA; ANASTASI, 2016). Na seção a seguir discutiremos uma das principais soluções implementadas pela emenda IEEE 802.15.4e de 2012.

Salto de Frequência no Modo TSCH da Emenda IEEE 802.15.4e-2012

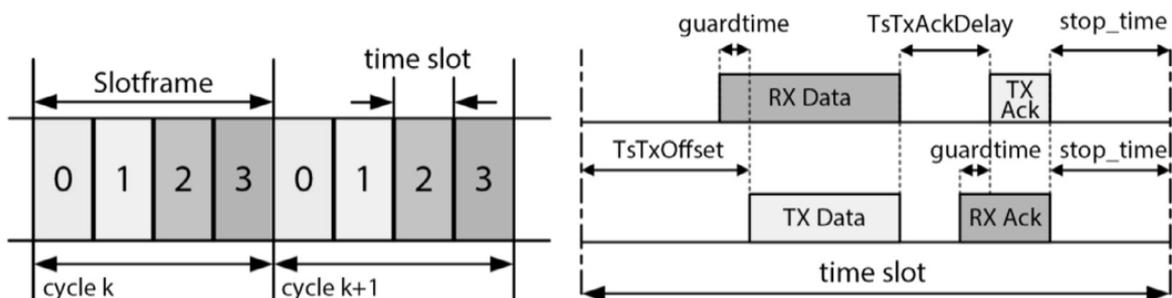
O modo TSCH destina-se principalmente ao suporte de aplicações de automação, com foco no monitoramento de equipamentos e processos. Segmentos típicos do domínio de aplicação

do TSCH incluem a indústria de petróleo e gás, alimentos e bebidas, produtos químicos, produtos farmacêuticos, tratamento de água, produção de energia e controle do clima. (GUGLIELMO; BRIENZA; ANASTASI, 2016).

No modo TSCH, o conceito do *superframe* é substituído pelo conceito de *slotframe*. O *slotframe* é uma coleção de janelas de tempo (*timeslots*) que se repetem no tempo. Cada *timeslot* é uma oportunidade para um dispositivo enviar ou receber um único quadro e, opcionalmente, receber ou transmitir uma confirmação para esse quadro. O número de *timeslots* em um determinado *slotframe* determina com que frequência cada *timeslot* se repete, definindo, assim, um agendamento de comunicação para os nós que usam os *timeslots*. Na parte à esquerda da Figura 2.8, é exibido um *slotframe* com 4 *timeslots*. Cada *timeslot* permite que um Nó envie um quadro (*frame*) de dados e receba a confirmação (*acknowledge*) relacionada à este envio, como pode ser visualizado na parte à direita da Figura 2.8 (IEEE802.15.4-2015, 2015).

Figura 2.8: TSCH *slotframe* (esquerda) e *timeslot* (direita).

Fonte: Guglielmo, Brienza e Anastasi, 2016.



O TSCH combina acesso com intervalos de tempo aos recursos de multicanal e de salto de canal. O acesso com intervalos de tempo aumenta a taxa de transferência que pode ser alcançada, eliminando a colisão entre nós concorrentes e fornecendo latência determinística para as aplicações. O recurso multicanal permite que mais nós se comuniquem ao mesmo tempo, ou seja, no mesmo *timeslot*, usando diferentes canais e aumentando a capacidade da rede. Já o salto de canal atenua os efeitos da interferência e desvanecimento multi-caminhos, melhorando assim a confiabilidade da comunicação. Resumidamente, o TSCH proporciona maior capacidade de rede, alta confiabilidade e latência previsível, enquanto mantém ciclos de trabalho muito baixos, ou seja, energeticamente eficientes, graças ao modo de acesso

com intervalo de tempo. O TSCH também é independente de topologia de rede, podendo ser utilizado em redes do tipo estrela, árvore, malha parcial ou total (GUGLIELMO; BRIENZA; ANASTASI, 2016).

Uma das principais características do TSCH é a comunicação multicanal, baseada no salto de canal. Inicialmente, 16 canais diferentes estão disponíveis para comunicação. Cada canal é identificado por um *ChannelOffset*, ou seja, um valor inteiro no intervalo $[0, 15]$. No entanto, algumas destas frequências podem estar na lista negra (por comunicação de baixa qualidade) e, portanto, o número total de canais $N_{channels}$ disponíveis para salto de canal pode ser inferior a 16. No modo TSCH, um enlace é definido como uma comunicação entre nós, formado pelo par de informações de um intervalo de tempo *timeslot* e de um deslocamento do canal *Channel Offset*. Portanto, um enlace de comunicação entre nós pode ser especificado pelo *timeslot* n e pelo *Channel Offset* no formato $[n, Channel Offset]$. A frequência f a ser utilizada para comunicação em um intervalo de tempo (*timeslot*) qualquer do *slotframe* é derivado da seguinte equação:

$$f = F[(ASN + ChannelOffset) \bmod N_{channels}] \quad (2.1)$$

Na Equação 2.1, o *Absolute Slot Number* (ASN), ou número do slot absoluto, é definido como o número total de intervalos de tempo decorridos desde a inicialização da rede e \bmod é o operador de módulo. O ASN é incrementado globalmente na rede, a cada *timeslot*, e é usado pelos nós como contador de *timeslot*. A função F pode ser implementada como uma tabela de mapeamento entre canais lógicos e canais físicos. Graças ao mecanismo multicanal, várias comunicações simultâneas podem ocorrer no mesmo intervalo de tempo, desde que usem diferentes canais. Além disso, a Equação 2.1 implementa o mecanismo salto de canal, retornando frequências diferentes para o mesmo enlace, a cada *timeslot* (GUGLIELMO; BRIENZA; ANASTASI, 2016).

Salto de Frequência no Padrão WirelessHART

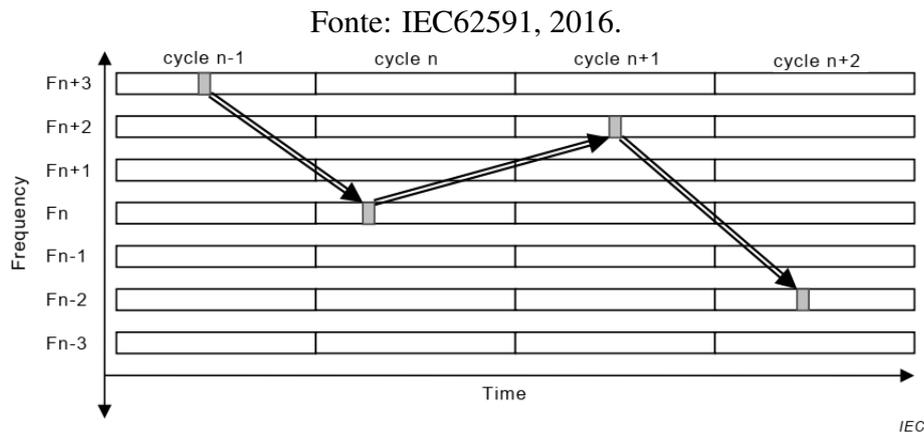
Um exemplo típico de salto de frequência é o *slotted hopping*, Figura 2.9, que é usado em redes WirelessHART. Para evitar interferências, todas as janelas de tempo (*timeslots*) podem acomodar no máximo k transmissões simultâneas, em que k é o número de canais usados. Em

tempo de execução, cada par emissor e receptor muda para o mesmo canal para se comunicar. O padrão calcula a sequência de salto de canal baseado na seguinte fórmula:

$$\text{LogicalChannel} = (\text{ASN} + \text{ChannelOffset}) \bmod k \quad (2.2)$$

Na Equação 2.2, o número absoluto da janela (*Absolute Slot Number*, ASN) indica o número de janelas (*slots*) acumulado desde o momento em que a rede foi inicializada. O operador mod calcula o resto da divisão e k representa o número de canais utilizados. O deslocamento de canal (*ChannelOffset*) é atribuído pelo escalonador durante o cálculo do agendamento de transmissão ($0 \leq \text{ChannelOffset} \leq k - 1$). Ele garante que nenhuma transmissão, em uma mesma janela (*slot*), utilizará um canal já atribuído a outra transmissão. Os nós, emissor e receptor, em seguida mapeiam um canal lógico para um canal físico usando uma tabela de mapeamento (GUNATILAKA; SHA; LU, 2017).

Figura 2.9: Salto de canais do padrão WirelessHART.



Salto de Frequência no Padrão ISA 100.11a

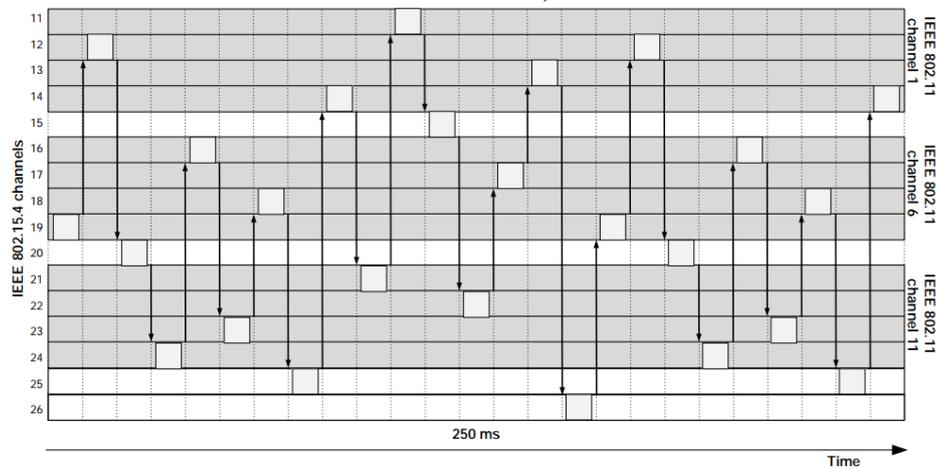
O princípio fundamental do salto de frequência (*slotted hopping*) no padrão ISA 100.11a é o mesmo do padrão WirelessHART, exceto que, de acordo com o padrão ISA 100.11a, cada dispositivo da rede define o canal a ser utilizado através de um padrão predefinido, que fornece uma sequência específica de canais que cada dispositivo deve seguir ao mudar sua frequência de comunicação. Para minimizar colisões com pacotes de outras redes sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11, cinco padrões de salto de frequência pré-programados são recomendados pelo padrão ISA100.11a, e ficam armazenados em cada dispositivo de campo

de uma rede padrão ISA 100.11a (WANG; JIANG, 2016).

O principal objetivo dos primeiros quatro padrões é permitir a coexistência de redes do padrão ISA 100.11a com redes do padrão IEEE 802.11. No padrão #1 temos a seguinte sequência de canais: 19, 12, 20, 24, 16, 23, 18, 25, 14, 21, 11, 15, 22, 17 e 13. Na Figura 2.10 é mostrado que pelo menos três canais separam cada salto, evitando assim que dois saltos consecutivos encontrem o mesmo canal do padrão IEEE 802.11.

Figura 2.10: Salto de canais pré-programado #1 do padrão ISA 100.11a.

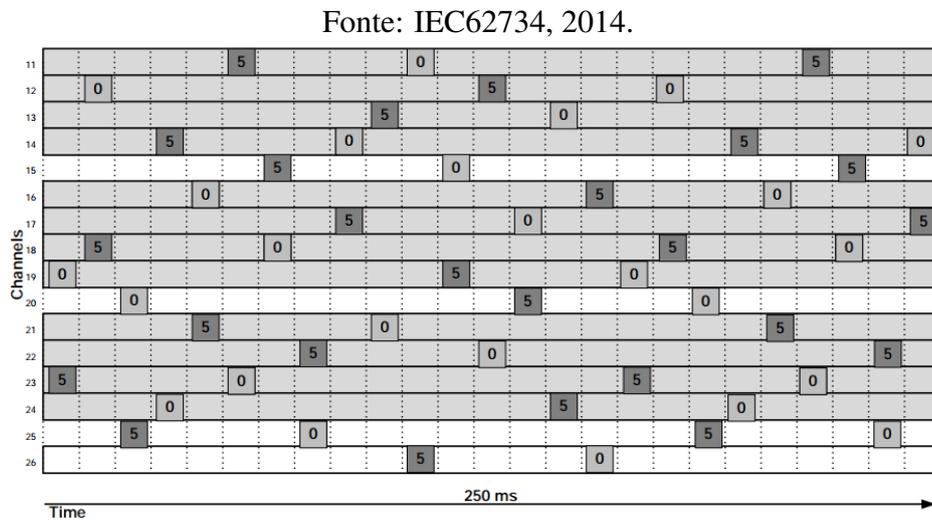
Fonte: IEC62734, 2014.



Cada padrão de salto de canal pode ser combinado com um deslocamento (*offset*) no padrão de salto. Se o deslocamento do padrão de salto é zero, então o padrão base de salto de canal é usado. Se, por exemplo, o deslocamento do padrão de salto for cinco, o padrão será deslocado cinco canais para esquerda. A sequência a seguir representa um deslocamento de valor cinco no padrão #1: 23, 18, 25, 14, 21, 11, 15, 22, 17, 13, 26, 19, 12, 20, 24 e 16. A Figura 2.11 mostra dois grupos de saltos, um com deslocamento zero e outro com deslocamento cinco, sendo utilizados em conjunto e sem competir pelo mesmo canal ao mesmo tempo (IEC62734, 2014).

O padrão #2 segue a ordem inversa do padrão #1. Os padrões de salto #3 e #4 são destinados principalmente a evitar interferências do padrão IEEE 802.11, pois sabendo que as três escolhas mais comuns de canais do padrão IEEE 802.11, na banda de 2,4 GHz, são os canais 1, 6 e 11, os canais escolhidos para o padrão #3 são os canais 15, 20 e 25 do padrão 802.15.4, pois estes não se sobrepõem as escolhas comuns dos canais IEEE 802.11. O padrão #4 segue a ordem inversa do padrão #3. Finalmente, o padrão de salto #5, é uma sequência

Figura 2.11: Salto de canais pré-programado #1, com deslocamento (*offset*), do padrão ISA 100.11a.



em ordem crescente de todos os canais do padrão 802.15.4 e pode ser utilizado para facilitar a coexistência com uma rede padrão WirelessHART. Todos esses padrões de salto concedem aos dispositivos do ISA 100.11a um nível mais alto de imunidade à interferência de dispositivos IEEE 802.11. Em resumo, a sequência de saltos de canal no padrão WirelessHART depende da mudança no ASN, enquanto o padrão ISA 100.11a utiliza padrões predefinidos para saltar de canal. Isso dá aos canais do padrão WirelessHART um maior grau de aleatoriedade, enquanto o padrão ISA 100.11a apresenta melhor desempenho sob interferência de IEEE 802.11 (IEC62734, 2014).

O padrão ISA 100.11a também suporta as técnicas adicionais conhecidas como salto lento (*slow hopping*) e salto híbrido (*hybrid hopping*). O salto lento, Figura 2.12, envolve o agrupamento de uma coleção de janelas de tempo (*timeslots*) contíguos em um único canal, com períodos de salto configuráveis entre 100 ms e 400 ms por salto. O salto híbrido, Figura 2.13, combina os períodos de saltos padrão (#1, #2, #3, #4 ou #5) com períodos de saltos lentos (IEC62734, 2014).

Figura 2.12: Salto de canais lento do padrão ISA 100.11a.

Fonte: IEC62734, 2014.

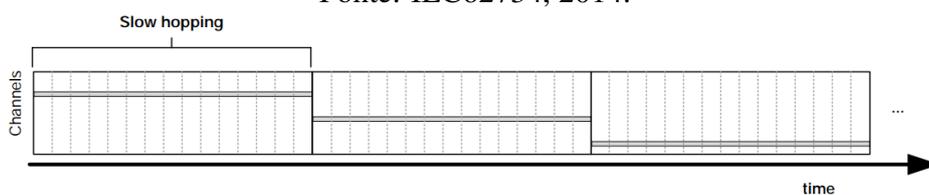
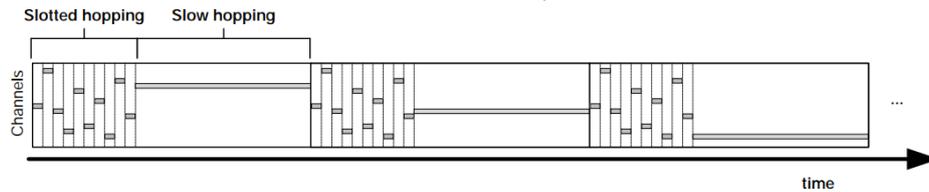


Figura 2.13: Salto de canais híbrido do Padrão ISA 100.11a.

Fonte: IEC62734, 2014.



Salto de Frequência no Padrão WIA-PA

O WIA-PA usa três mecanismos para salto de frequência, visando aumentar sua confiança e a taxa de transmissão geral da rede: Comutação adaptável de frequência (*Adaptive Frequency Switching*, AFS), Salto adaptável de frequência (*Adaptive Frequency Hopping*, AFH) e Salto de janela de tempo (*Timeslot Hopping*, TH). Durante o *beacon* e os períodos ativos (incluindo CAP e CFP) no *superframe* do padrão WIA-PA, as comunicações ocorrem no mesmo canal e caso este canal sofra forte interferência, o mecanismo AFS irá efetuar a troca de canal. O AFH é usado na comunicação *intra-cluster* do período inativo para alternar aleatoriamente os canais de comunicação para cada *timeslot* do *superframe* do padrão WIA-PA, com base na qualidade do canal. Durante o período *inter-cluster*, o salto TH é usado para alterar o canal de comunicação para cada *timeslot* no *superframe* do padrão WIA-PA, de acordo com uma sequência de salto definida pelo gerente da rede (IEC62601, 2015).

2.2 Estimação de Qualidade de Enlace em RSSFI

A estimação da qualidade de enlace é o processo de avaliar uma métrica, uma expressão matemática, dentro de uma janela de tempo, para quantificar a qualidade de enlace de comunicação sem fio (HUGHES et al., 2017). A métrica gerada é conhecida como sendo um estimador de qualidade de enlace (*Link Quality Estimator*, LQE). O objetivo deste mecanismo é estimar a qualidade de um enlace com base em várias propriedades que podem ser medidas no enlace, tais como: taxa de entrega de pacotes, assimetria do enlace, estabilidade do enlace, qualidade dos canais, ocupação dos canais, etc. Não existe uma definição padrão para qualidade do enlace, nem uma unidade de medida padrão para a métrica, que pode ser uma descrição qualitativa ou quantitativa sobre o enlace.

A medida da qualidade de enlace é de grande utilidade para definir de que forma o enlace será utilizado e que aplicações poderão ser usadas no mesmo. Assim, a estimação da qualidade de enlace sem fio é um bloco fundamental na construção de uma gama de mecanismos de otimização de protocolos de rede e outras aplicações de camadas superiores. Estas aplicações e protocolos requerem estimativas de qualidade de enlace antes de realizar decisões que se destinam a melhorar ou sustentar o desempenho a rede (LOWRANCE; LAUF, 2017).

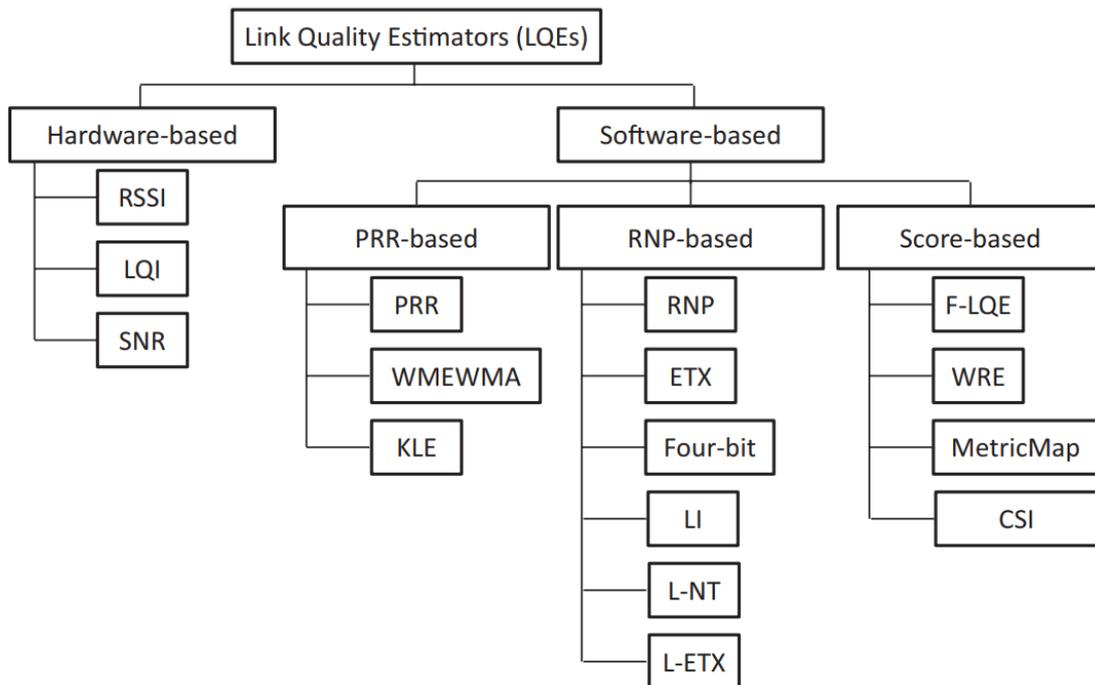
As métricas usadas para estimar a qualidade do enlace podem ser divididas em duas categorias, as baseadas em hardware e as baseadas em software. O trabalho de Baccour et al. apresentou a primeira taxonomia de LQEs, que pode ser visualizada na Figura 2.14, onde pode-se verificar as duas principais categorias nas quais são divididos os LQEs. De acordo com Lowrance e Lauf, alguns pesquisadores referem-se a essas mesmas classificações com outra terminologia, que seriam métricas físicas e lógicas. As métricas baseadas em hardware são fornecidas pelo componente de rádio dos nós e, conseqüentemente, derivam da camada física da rede. Por outro lado, as métricas baseadas em software são obtidas após a execução de alguma rotina de software, em camadas mais altas da rede, isto é, através de alguma lógica de programação (BACCOUR et al., 2012).

Segundo Baccour et al. existem três maneiras de realizar o monitoramento de enlaces: ativo, passivo ou híbrido. O monitoramento de enlace ativo usa transmissão de pacotes em *broadcast* ou transmissão de pacotes em *unicast* para extrair as medições. É um mecanismo que sobrecarrega a comunicação de dados, criando tráfego adicional. Já o monitoramento de enlace passivo explora o tráfego existente sem incorrer em sobrecarga gerada por comunicação adicional, tornando-se mais eficiente também em termos energéticos. O monitoramento de enlace híbrido tenta utilizar o melhor dos dois mundos, buscando um equilíbrio entre informações atualizadas sobre a qualidade de enlace (característica do monitoramento ativo) e eficiência energética (característica do monitoramento passivo).

No trabalho de Gomes et al., um LQE e uma nova arquitetura para RSSFI foram propostas. A arquitetura mencionada anteriormente usa nós dedicados, chamados de nós LQE, para executarem em tempo real a estimação da qualidade de enlaces. Diferentemente de outros LQEs descritos na literatura, o LQE desenvolvido por Gomes et al. evita a sobrecarga de tráfego extra na rede, gerada pelo envio de pacotes adicionais para teste da qualidade do

Figura 2.14: Taxonomia de LQEs.

Fonte: Baccour et al., 2012.



enlace e também evita a execução de processamento adicional, para cálculo da qualidade do enlace, no Nó transmissor. Esta abordagem permite estimação da qualidade do enlace em tempo real, usando exclusivamente o Nó LQE, que pode processar muitos dados de RSSI recebidos de vários enlaces com nós finais da rede, além de outras informações obtidas dos pacotes de dados recebidos. Enquanto isso, os outros nós finais da RSSFI permanecem operando normalmente, com baixa sobrecarga, pois não é mais seu papel realizar cálculos para definição da qualidade do enlace ou transmissão de pacotes adicionais para o mesmo fim. No atual trabalho, esta solução para estimação de qualidade de enlace foi avaliada em um ambiente ao ar livre, onde foi montada uma RSSFI com um Nó LQE. Os detalhes do experimento sobre a implementação do LQE proposto no trabalho de Gomes et al. estão descritos no capítulo 4 na Seção 4.4.1

Protocolos de controle de acesso ao meio (MAC) baseados em salto ou adaptação de canal, descritos na seção anterior, ajudam a aumentar a confiabilidade da rede, porém, apenas utilizar o salto ou a adaptação de canal é insuficiente. Técnicas de estimação de qualidade de canais podem ser utilizadas para resolver este problema. Em redes sem fio, os canais de rádio não são afetados de maneira semelhante, assim, a inclusão de canais com baixa qualidade em

uma lista negra pode melhorar o desempenho de toda a infraestrutura sem fio. As técnicas de lista negra identificam canais de rádio que apresentam baixa confiabilidade e modificam o comportamento da camada de enlace para usar prioritariamente os melhores canais de rádio. O padrão WirelessHART utiliza uma abordagem de lista negra global, removendo globalmente os canais com baixa qualidade da sequência de saltos de frequência, enquanto o padrão ISA100.11a adota uma abordagem de lista negra local. (KOTSIOU et al., 2017a) (KOTSIOU et al., 2019).

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

3.1 Caracterização de Canais de RSSFI em Ambientes ao Ar Livre

A busca por artigos que tratavam de caracterização de canais em redes de sensores sem fio industriais, ficou restrita aos estudos que realizaram algum tipo de experimento ao ar livre, também conhecidos como ambientes industriais *outdoor*. Tal restrição se faz necessária pois o objetivo da atual dissertação tem como foco estudos de caracterização de canais em ambientes industriais ao ar livre, assim não faz parte do escopo deste trabalho analisar ambientes industriais fechados, também conhecidos como ambientes industriais *indoor*.

A presente discussão inicia-se pelo trabalho de 2012 de Mikhaylov et al. cujo principal objetivo foi o estudo de RSSF em dois ambientes industriais. O primeiro, um armazém fechado, foge do escopo do atual trabalho, por isso não foi considerado. Já o segundo, um conjunto de silos a céu aberto, onde os níveis de produtos armazenados nos silos eram monitorados remotamente, é um ambiente que mereceu atenção. Nele foram avaliados diferentes rádios, utilizando canais de comunicação nas faixas de 433 MHz, 868 MHz e 2.4 GHz. Em outro estudo de 2016, Chaves, Branquinho e Carvalho realizaram, em uma fábrica de placas de cimento, no Brasil, medições nas comunicações na faixa de 915Mhz, onde os nós eram utilizados para monitoração de níveis de tanques e de temperaturas de motores elétricos.

No caso dos sistemas de distribuição e de transmissão de energia elétrica, as atuais *smart grids*, os trabalhos de Gungor, Lu e Hancke em 2010 e o de Bilgin e Gungor em 2011,

apresentam um estudo experimental abrangente sobre a caracterização estatística do canal sem fio em diferentes locais em um sistema de distribuição de energia elétrica, dentre os quais uma sala de controle industrial, um abrigo subterrâneo para transformadores e uma subestação de 500 kV ao ar livre. Nos testes, foram utilizados nós sensores compatíveis com IEEE 802.15.4, medindo características do canal e atenuação na faixa de frequência de 2,4 GHz. Mais recentemente, em 2017, Sandoval et al. realizaram um estudo em ambiente semelhante, que ampliou os resultados de Gungor, Lu e Hancke e de Bilgin e Gungor, apresentando uma caracterização mais detalhada de dois cenários: uma subestação externa de 400 kV e uma casa de força. A banda *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) de 2,4 GHz foi examinada, utilizando-se diferentes linhas de visada entre os nós e também diferentes polarizações, buscando caracterizar os fenômenos de propagação de rádio, tais como desvanecimento de grande e pequena escala, atraso de raiz do valor quadrático médio (*root mean square*, RMS), largura de banda de coerência e interferências eletromagnéticas.

A indústria de óleo e gás, por sua vez, é tema de vários artigos, que abordaremos a seguir, iniciando pelo trabalho de Pöttner et al. no qual os autores apresentaram em 2011, um *testbed* industrial instalado em uma refinaria de petróleo em Portugal. Eles discutem que os *testbeds* existentes em laboratório não podem reproduzir as características complexas das plantas industriais e que um *testbed* dentro da refinaria de petróleo produz resultados realistas. Outro trabalho é o de Al-Yami, Abu-Al-Saud e Zidouri, realizado em 2015, que compara os valores experimentais com resultados simulados, na camada física do protocolo ISA100.11a. Os resultados experimentais foram obtidos no campo de petróleo Shedgum GOSP3 na Arábia Saudita.

Em um estudo mais detalhado, Savazzi, Guardiano e Spagnolini em 2013 desenvolveram um novo modelo, especificamente adaptado para prever a qualidade do sinal de rádio em ambientes afetados por bloqueio de grandes estruturas metálicas. O modelo de propagação é baseado na teoria de difração e faz uso de modelo 3D da planta para classificar os enlaces com base no número e na densidade das obstruções em torno de cada Nó. A modelagem de canais proposta foi validada por medições experimentais em dois locais de uma refinaria de petróleo, a estrutura de um flare e a estrutura de um forno. Já Gaafar e Messier, em 2016, cita o trabalho realizado por Savazzi, Guardiano e Spagnolini e propõe a expansão de seus resultados, conduzindo experimentos com multiantena em uma refinaria de gás operacio-

nal, no Canadá. As medições foram realizadas em 80 diferentes pontos localizados ao ar livre, capturando características de desvanecimento de larga e pequena escala. Agregando novos resultados ao artigo de Gaafar e Messier, em 2017, Messier, Wasson e Herrmann dão continuidade aos trabalhos na refinaria da Shell no Canadá. São analisados resultados para transmissão entre dispositivos ao nível do solo e entre estes e outros montados à 18 metros do solo. A análise dos dados de medição revelam um ambiente com desvanecimento grave em pequena escala e dispersão multipercurso, mas com desvanecimento de sinal em larga escala muito leve.

Muitos dos trabalhos relacionados anteriormente, estudaram a caracterização de canais em faixas de frequência diversas, diferentemente do atual trabalho que teve como foco principal a faixa de frequência de 2,4 GHz, em virtude desta ter sido a faixa adotada em todos os 3 padrões internacionais da IEC para RSSFI. Os trabalhos que estudaram ambientes de *smartgrids* merecem atenção, porém os trabalhos em que os ambientes ao ar livre mais se assemelham aos locais onde os experimentos desta dissertação foram realizados, são os trabalhos desenvolvidos em refinarias ou em campos de exploração de petróleo.

3.2 Estimação de Qualidade de Enlace em RSSF

Como o número de artigos que tratam da estimação de qualidade de enlace de RSSFI em ambientes outdoor é relativamente pequeno, na presente seção buscou-se retratar um panorama mais amplo, analisando estudos sobre *Link Quality Estimators* (LQEs) de modo geral e não especificamente de LQEs nas RSSFI em ambientes industriais *indoor* ou *outdoor*. Para organizar a apresentação dos artigos, optou-se pela ordenação cronológica deles, tendo como ponto de partida o trabalho de Baccour et al. publicado em 2012, um artigo do tipo *Survey*, que representa a primeira tentativa de descrever um apanhado dos conceitos fundamentais relacionados à estimação de qualidade de enlace em RSSF.

No ano de 2014, Liu e Cerpa apresentaram dois artigos que tratam de LQE. No primeiro trabalho, mostraram a utilidade da predição da qualidade de enlaces baseada em diferentes métodos de aprendizado de máquina, tais como o classificador *Naive Bayes*, a regressão logística e as redes neurais. Os modelos estudados usam uma combinação de informações de *Packet Reception Rate* (PRR), também chamada de taxa de recebimento de pacotes e da

camada física o *Received Signal Strength Indication* (RSSI) e o *Signal to Noise Ratio* (SNR), como entrada e que geram a probabilidade de recepção do próximo pacote. A análise mostrou que a regressão logística funcionou melhor que os outros modelos além de requerer pouca capacidade computacional. Usando esse conhecimento, foi implementado o 4C, um novo estimador de qualidade de enlace. Resultados experimentais mostraram melhorias na ordem de 20% a 30% em comparação com os estimadores Four-bit e *Short-Term Link Estimator* (STLE).

Posteriormente, no segundo trabalho, procuraram acabar com a principal desvantagem do 4C, que era a necessidade de coletar dados do enlace no ambiente de implantação, para depois treinar os modelos de previsão. Assim surgiu o TALENT, um estimador com característica de auto-aprendizagem e capacidade de previsão da qualidade do enlace em tempo real, sem a necessidade de coleta de dados e reciclagem de modelos, utilizando uma combinação de indicadores de qualidade dos pacotes e da camada física da rede. Ao utilizar o TALENT junto com o *Collection Tree Protocol* (CTP), os resultados experimentais mostraram que o aumento de eficiência de entrega de pacotes foi da ordem de mais de 1,95 vezes em comparação com o estado-da-arte em estimadores de qualidade de enlace.

Em 2015, Baccour et al. afirmaram que alguns LQEs só conseguiam coletar características parciais dos enlaces, pois ignoravam várias propriedades, tais como qualidade e estabilidade do canal. Desta forma, propõem o F-LQE (*Fuzzy LQE*), uma métrica holística que estima a qualidade do enlace com base em quatro propriedades combinadas (taxa de entrega de pacotes, assimetria, estabilidade e qualidade de canal). A combinação é realizada através de lógica *Fuzzy*. As análises experimentais demonstraram que o F-LQE é mais confiável e mais estável do que os estimadores existentes, tais como, PRR, *Window Mean with Exponentially Weighted Moving Average* (WMEWMA), *Expected Transmission Count* (ETX), *Requested Number of Packets* (RNP) e Four-bit. Também avaliaram o impacto de F-LQE sobre o desempenho do roteamento em árvore, especificamente o CTP, adaptando o F-LQE para construir uma nova métrica de roteamento para CTP, chamada de F-LQE/RM. Resultados experimentais mostraram que o F-LQE/RM melhorou o desempenho do roteamento em comparação com o uso do Four-bit (LQE padrão do CTP) e ETX (outro LQE popular). O F-LQE/RM aperfeiçoou a entrega de pacotes em até 16%, reduziu o número de retransmissões de pacotes em até 32%, diminuiu a contagem de saltos em até 4% e melhorou

a estabilidade da topologia em até 47%.

No trabalho de Rezik et al., particularmente importante para a atual dissertação, pois um dos experimentos foi realizado em uma subestação de 500 kV, ou seja, em um ambiente industrial ao ar livre, os pesquisadores dividiram seu trabalho em duas partes. Na primeira parte os pesquisadores analisaram, em ambientes simulados, o desempenho de LQEs representativos, nomeadamente ETX, Four-bit e F-LQE, confirmando que o F-LQE é mais confiável e mais estável do que o ETX e do que o Four-bit. No entanto, em ambientes reais ao ar livre, enfrentando perda excessiva de pacotes, entre outros problemas, o F-LQE não foi suficientemente reativo. Assim, na segunda parte do estudo, os pesquisadores propuseram o Opt-FLQE, uma versão melhorada do F-LQE, que supera as limitações do F-LQE original e parece mais conveniente para ambientes de *smart grids*.

Outro trabalho de destaque é o de Tran, Mai e Kim, no qual os autores analisaram o LQE ETX, sob diferentes cargas de tráfego. Embora o ETX mostre bom desempenho sob carga leve, seu desempenho piora significativamente quando a carga de tráfego é alta. O artigo em questão apresentou o projeto e a implementação de uma variação do ETX chamado *High Load ETX* (HETX), que busca reduzir o impacto dos pacotes transmitidos em *broadcast* para solicitação de rotas. Também propuseram um protocolo de roteamento confiável usando métricas de qualidade de enlace, chamado de *Link Quality Distance Vector* (LQDV). Foram conduzidas avaliações de desempenho de três métricas: HETX, ETX e contagem mínima de saltos. Os resultados da simulação mostraram que o HETX melhora o rendimento médio da rota em até 25% em relação ao ETX, sob alta carga de tráfego. A contagem mínima de saltos apresentou um desempenho ruim em comparação aos HETX e ETX em todas as diferentes cargas de tráfego. Sob carga leve, HETX e ETX mostraram o mesmo desempenho.

Zhou et al., analisaram como outros trabalhos investigaram as propriedades estatísticas dos estimadores de qualidade de enlace e seu impacto no CTP, independentemente dos protocolos utilizados nas camadas superiores da rede. Em seguida, eles configuraram um LQE dedicado com um total de quatro bits de informação: um da camada física, um da camada de enlace e dois da camada de rede. O Four-bit foi considerado um bom estimador, contudo seu desempenho depende muito do ajuste de seus parâmetros e nos casos em que a rede sofre com uma carga maior de tráfego, o Four-bit não trabalha de forma eficaz. Assim os autores redesenharam o método do Four-bit e criaram o *Stable Link Quality Estimation* (SLQE), que

combinava sondagem ativa com passiva, para tornar mais estáveis as estimativas. O novo método se mostrou mais robusto e econômico em termos de consumo de energia.

Já no ano seguinte, em 2016, o trabalho de Pengwon, Komolmis e Champrasert, propõe uma topologia de árvore dupla para resolver o problema de enlace assimétrico nas RSSF. A solução é baseada no uso das métricas *Link Quality Indicator* (LQI) e taxa de recepção de pacotes (TRP), para classificar os enlaces de qualidade boa e ruim. Os enlaces com boa qualidade são usados para formar duas árvores, chamadas de árvores de coleta e disseminação, em vez de formar uma árvore como normalmente é realizado. Experimentalmente um coordenador e 15 nós foram instalados em um edifício para testar o desempenho da topologia de árvore dupla. O resultado confirmou que a topologia de árvore dupla pode reduzir número de saltos em cerca de 6% e tem uma boa capacidade de operar em redes onde enlaces assimétricos estejam presentes.

Em 2017 uma boa quantidade de artigos foi publicada sobre o tema. Em um deles, Ancillotti et al. propuseram o RL-Probe, estratégia de estimativa de qualidade de enlace baseada no protocolo *Routing Protocol for LowPower and Lossy Networks* (RPL). O RL-Probe emprega esquemas de monitoramento síncrono e assíncrono para manter informações atualizadas sobre a qualidade dos enlaces e assim poder reagir a mudanças súbitas de topologia. A solução conta com um modelo de aprendizado por reforço para realizar o monitoramento com o mínimo de sobrecarga. O desempenho da solução proposta foi avaliado por meio de simulações e experimentos reais. Os resultados demonstraram que o RL-Probe ajuda a melhorar efetivamente a taxa de perda de pacote, permitindo que os nós reajam prontamente às variações de qualidade do enlace. Em particular, os resultados mostram que a abordagem proposta não só reage adequadamente às variações de qualidade do enlace, mas também é eficaz para lidar com variações de topologia devido à mobilidade dos nós.

Aswale e Ghorpade, propuseram um LQE que baseia-se nas métricas de *Energy Detection* (ED) e TRP. Tal LQE proposto foi utilizado na implementação do protocolo *Link Quality and Energy-Aware Routing* (LQEAR) e suas variações LQEAR-1 e LQEAR-2, que se mostraram eficazes na escolha de enlaces com melhor qualidade durante as simulações, o que melhorou a confiabilidade da transmissão de dados em relação aos protocolos *Two-Phase Geographic Forwarding* (TPGF) e *Energy-Aware Two Phase Geographic Forwarding* (EA-TPGF) que possuem o mesmo propósito, porém não fazem uso de LQE. Além disso,

foi observado que o LQEAR-2, que utiliza uma fusão das métricas ED e TRP, tem um desempenho melhor do que o LQEAR-1, que utiliza apenas a métrica ED.

Em outro artigo, após discutirem sobre os estimadores disponíveis, suas vantagens e desvantagens e depois de implementarem e testarem, em ambiente simulado, LQEs que utilizavam separadamente as métricas TRP, RSSI e SNR, Deb et al., criaram um novo LQE híbrido, denominado *Link Verification Metric* (LVM), que combina apenas as vantagens das métricas citadas. O LVM se mostrou, em ambientes simulados, uma melhor alternativa do que os LQEs testados, em relação à escolha dos melhores enlaces a serem utilizados pelos protocolos de roteamento. O trabalho entretanto não realizou nenhum experimento em ambiente real e tal lacuna foi deixada para ser preenchida por futuras contribuições. Já no artigo do tipo *Survey* de Hughes et al., foram estudados especificamente os LQEs utilizados nos protocolos do tipo *Transmission Power Control* (TPC) que são adotados nas RSSF e têm como preocupação principal o consumo de energia. Nos trabalhos anteriores sobre TPC nas RSSF, foram identificadas deficiências nos processos de estimação de qualidade de enlaces, o que poderia tornar as redes instáveis, ineficientes e não confiáveis. A partir destas descobertas e da análise de vários estudos empíricos, foi desenvolvido o estado da arte sobre quais as propriedades de qualidade dos enlaces devem ser utilizadas para garantir a operação eficiente e confiável das redes. Os autores afirmaram ainda que os atuais LQEs disponíveis estão aquém dos requisitos do que se pretende em estimadores para TPC, o que deixa em aberto o desafio para implementação de LQEs mais precisos e confiáveis de serem utilizados em TPC.

No artigo de Shu et al., foi apresentado um modelo de estimação de qualidade de enlace baseado em *Support Vector Machine* (SVM) com árvore de decisão. No modelo, as métricas de estimação são o RSSI e o LQI. Ainda no mesmo modelo, o problema de estimação da qualidade do enlace é transformado em um problema de classificação. Resultados experimentais demonstram a racionalidade do modelo proposto que, em contraste com os LQEs conhecidos, apresenta melhor desempenho na precisão das estimativas. Além disso, consome menos energia, pois utiliza um menor número de pacotes de sondagem, o que estende o tempo de vida da rede.

Em Priya et al. os autores construíram um novo protocolo denominado *Link Quality Reliable Routing Protocol* (LQRRP), cuja proposta é fornecer um enlace confiável e eficiente

energeticamente para comunicação entre os nós. O LQRRP seleciona rotas com base nas métricas de qualidade do enlace, tais como a contagem de retransmissões, taxa de entrega de pacote. Experimentos de simulação compararam o LQRRP com os protocolos *Routing by Energy and Link quality* (REL) e *Robust and Energy Efficient Multipath Routing Protocol* (REER), em termos de atraso, taxa de entrega de pacote e eficiência energética, em redes de larga escala. Os resultados mostraram que LQRRP diminuiu o número de retransmissões, o atraso nas transmissões e melhorou a taxa de entrega de pacote, em comparação com os protocolos REL e REER.

No artigo de Silva et al., é proposto um novo LQE, chamado PRR², que utiliza duas métricas e dois níveis de PRR. Duas janelas de PRR capturam variações na qualidade do enlace, tanto num curto, como num longo prazo. O PRR² foi comparado com o estado da arte de LQEs e os resultados mostraram que o PRR² reduziu o número de retransmissões e aumentou a taxa de entrega, que são duas métricas importantes para a confiabilidade da camada de enlace.

Ainda em 2017 o trabalho de Sun et al., propôs um algoritmo LQE denominado *Wavelet Neural Network* (WNN-LQE), que preenche a lacuna entre os requisitos de QoS das *smartgrids* e as características dos enlaces de rádio, estimando os limites de probabilidade garantida da TRP. A SNR é usada como a métrica de qualidade do enlace, sendo decomposta em dois componentes: uma parte não linear, variável no tempo e uma parte não-estacionária, aleatória. Cada componente deve ser processado separadamente antes de ser inserido no modelo WNN. Os limites de probabilidade garantidos no SNR são obtidos a partir do algoritmo WNN-LQE e transformados em limites estimados no PRR através da função de mapeamento entre o SNR e o TRP. Os resultados experimentais demonstram a validade e eficácia do algoritmo LQE proposto.

O trabalho de Gomes et al. encerra o estudo dos artigos de 2017. Este artigo propõe um LQE para RSSFI, e um novo tipo de Nó, batizado de Nó LQE, que estima a qualidade do enlace em tempo real, usando o RSSI e informações obtidas dos pacotes de dados recebidos. O LQE proposto é capaz de capturar os efeitos de multicaminhos, interferência e assimetria do enlace. Os experimentos foram realizados em um ambiente industrial real usando rádios IEEE 802.15.4, e modelos foram desenvolvidos para permitir o uso de amostras de RSSI para estimar a qualidade do enlace. O estimador proposto e o Nó LQE podem ser usados

para implementar mecanismos dinâmicos de alocação de canais, e também outros tipos de protocolos, como protocolos de roteamento adaptativos, que levam em consideração a qualidade do enlace. Foi realizada uma comparação com o Opt-FLQE, e os resultados mostraram que o estimador proposto é mais preciso e reativo para o tipo de ambiente em estudo. Diferentemente de outros LQEs da literatura, no LQE proposto, os nós sensores não precisam transmitir pacotes de sondagem. Além disso, usando o Nó LQE, os outros nós da RSSFI não precisam parar sua operação para monitorar a qualidade do enlace.

No ano de 2018 foi destacado o trabalho de Hermeto et al., no qual foi proposto monitorar a taxa de transmissão *broadcast* para estimar a qualidade dos enlaces *unicast* de diferentes nós vizinhos. No lugar de estimar precisamente a TRP *unicast*, os autores pretendem classificar os diferentes vizinhos e selecionar apenas os melhores enlaces. De fato, a TRP *unicast* e a taxa de transmissão *broadcast* possuem uma forte correlação, que foi comprovada experimentalmente, confirmando que a qualidade do enlace poderia ser classificada com segurança ao se utilizar tal métrica. Esse mecanismo foi integrado na pilha 6TiSCH e demonstrado experimentalmente a relevância desse método passivo.

Apesar de terem sido discutidas as mais diversas métricas utilizadas em estimação de qualidade de enlace nos trabalhos apresentados nesta seção, o presente trabalho se limitou a utilizar apenas a métrica de RSSI, tendo em vista a facilidade de obtenção deste dado, pelo pequeno esforço computacional dispendido e pela quase inexistente carga de transmissão de dados imposta às RSSFI analisadas experimentalmente.

Capítulo 4

Avaliação Experimental

4.1 Metodologia

Neste trabalho, os experimentos de caracterização do enlace de rádio multicanal das RS-SFI foram realizados em instalações industriais ao ar livre: Uma estação de injeção de água tratada em um campo marítimo de petróleo (ambiente predominantemente estático), um sistema de aquecimento solar de uma unidade de tratamento e processamento de fluidos (ambiente dinâmico com movimentação determinística ao longo do dia) e uma balança industrial em uma unidade de carregamento de derivados de petróleo (ambiente dinâmico com movimentação não determinística n decorrer do dia).

Nos experimentos foram utilizados as placas de desenvolvimento microchip *MiWi Demo Kit* (Figura 4.1) e *8-bit Wireless Development Kit* (Figura 4.2), além de um protótipo de uma placa LQE (Figura 4.3) proposta por (GOMES et al., 2017). Todas as placas são equipadas com microcontroladores da família PIC18F, transceptores MRF24J40MA 2,4 GHz (Figura 4.4), compatível com o padrão IEEE 802.15.4, com potência de transmissão de 0 dBm e antena *Printed Circuit Board* (PCB) com ganho de 2,09 dBi.

Os valores de RSSI providos pelo transceptor MRF24J40MA variam entre 0 e 255. A documentação do transceptor possui uma tabela que relaciona os valores de RSSI com os valores correspondentes de potência em dBm. Uma limitação é que para valores abaixo de -90 dBm o RSSI é igual a zero. Como a sensibilidade do transceptor é igual a -94 dBm, o RSSI de todos os pacotes recebidos com potências entre -94 dBm e -90 dBm é igual a zero. No entanto, apesar dessa limitação, foi possível analisar as características dos canais e

Figura 4.1: MiWi Demo Kit.



Figura 4.2: 8-bit Wireless Development Kit.

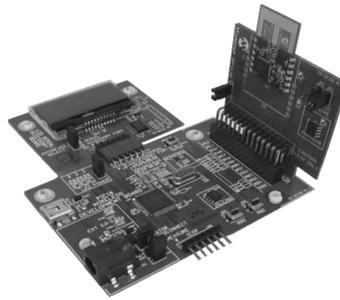


Figura 4.3: Protótipo de placa LQE.

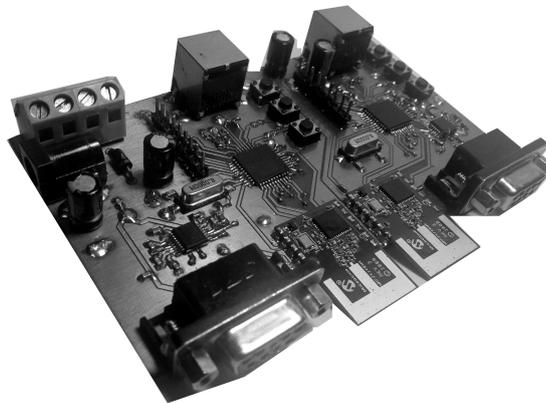


Figura 4.4: Transceptor MRF24J40MA 2,4GHz.



chegar a importantes conclusões sobre a comunicação multicanal em ambientes industriais ao ar livre. Não foram considerados os efeitos de interferências na mesma frequência de 2,4GHz, provenientes de outros equipamentos, pois os mesmos inexistem nos locais onde os experimentos foram realizados, de forma semelhante ao ambiente estudado por Sandoval et al., 2017.

A partir dos resultados de RSSI coletados, foram avaliadas as diferenças nas características dos diferentes canais, além das variações temporais e espaciais na qualidade dos canais, nos enlaces com todos os nós finais posicionados nas mais diferentes alturas e distâncias em relação ao Nó coordenador. Os nós finais foram posicionados ao lado de sensores cabeados que atualmente já se encontram instalados nas unidades, buscando assim uma caracterização mais acurada do ambiente real. Os dados coletados capturaram os efeitos de desvanecimento em larga escala, atenuação em pequena escala (múltiplos caminhos), sombreamento log-normal, assimetria de enlaces, características não-estacionárias do canal sem fio no longo prazo e a decorrelação entre canais que ocorre mesmo para canais adjacentes utilizados para enlace com um mesmo Nó (GOMES; FONSECA; ALENCAR, 2015).

Para mitigar os efeitos prejudiciais que acometem a comunicação sem fio em ambientes industriais, busca-se o desenvolvimento de protocolos que possam lidar com a variação na qualidade dos canais no decorrer do tempo. Tais protocolos utilizam mecanismos de salto de frequência, adaptação de canal e configuração dinâmica de lista negra de canais. Nas versões mais robustas de tais protocolos se faz necessário a utilização de um estimador de qualidade de enlace para coletar informações sobre a qualidade dos enlaces entre os nós da RSSFI.

4.1.1 Protocolo desenvolvido para os Experimentos

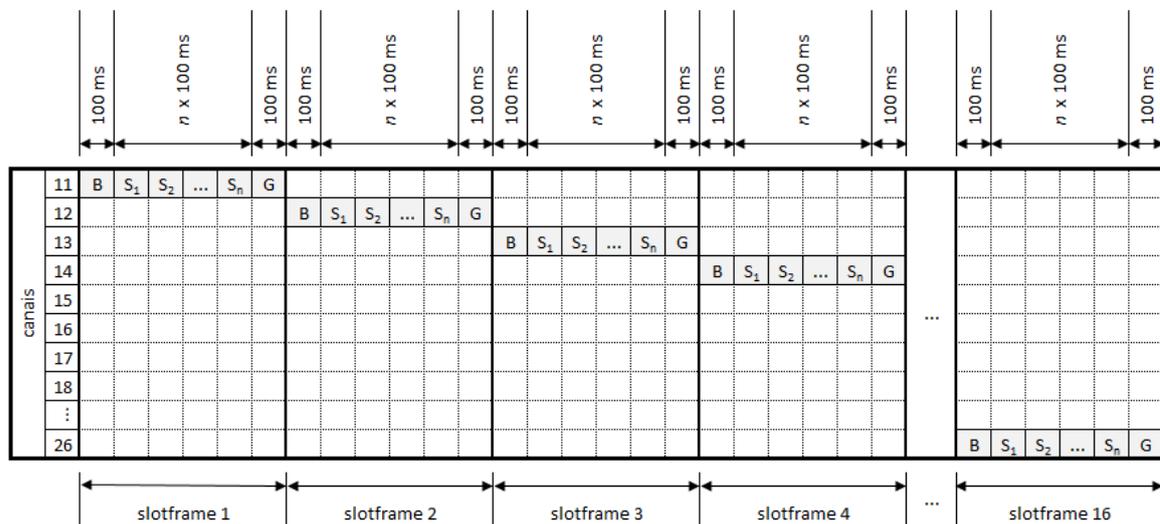
Para permitir que os nós se comuniquem utilizando todos os canais, e sem colisões, um protocolo simples baseado em *Time Division Multiple Access* (TDMA) e salto de canais, foi implementado. No protocolo em questão, o acesso ao meio é baseado em uma estrutura de *slotframe*. Um *slotframe* é um conjunto de intervalos de tempo que se repete durante o funcionamento da RSSFI. O número de intervalos de tempo de um *slotframe* irá determinar com que periodicidade todo o *slotframe* se repetirá, isto é, quanto maior o número de intervalos de tempo de um *slotframe*, maior será o tempo levado para conclusão deste *slotframe*. Para efeito de comparação, o protocolo atual tem uma estrutura bem semelhante à definida pelo

protocolo *Time-Slotted Channel Hopping* (TSCH) descrito no padrão IEEE 802.15.4e (AL-NIDAWI; KEMP, 2015), mas com uso de pacotes de *beacon*, transmitidos pelo coordenador, para sincronizar os nós finais a cada ciclo.

Após a recepção de um *beacon*, os nós finais obtêm o RSSI do *beacon* e transmitem essa informação de volta para o coordenador. A estrutura temporal do *slotframe* é mostrada na Figura 4.5. Para todos os pacotes recebidos no coordenador, o RSSI do pacote recebido, bem como o RSSI do *beacon*, transmitido pelo Nó final, são passados para um computador por meio de uma porta serial.

O *slotframe* se repete continuamente e é composto por um número n de intervalos de tempo, cada um dedicado a um Nó final da rede, além de dois intervalos de tempo adicionais, presentes no início e no final do *slotframe*. No primeiro intervalo, o coordenador transmite um pacote em *broadcast* (o pacote *beacon* B) para todos os nós finais da rede e aguarda para receber pacotes de dados que são transmitidos pelos nós finais nos n intervalos de tempo seguintes (de S_1 até S_n). Há um intervalo de tempo inativo (G) no final do *slotframe*, que é usado pelos nós para alternar o canal.

Figura 4.5: Estrutura temporal do *slotframe* do protocolo.



Quando um Nó final recebe um pacote *beacon* do coordenador, ele espera até o intervalo de tempo alocado para ele e realiza a transmissão de um pacote de dados, em *unicast* para o coordenador. Cada intervalo de tempo tem duração de 100 ms. Este protocolo foi desenvolvido para permitir a caracterização da comunicação multicanal para múltiplos enlaces simultaneamente, mas não foi desenvolvido considerando qualquer aplicação particular.

Em cada *slotframe*, um canal diferente é usado sequencialmente. Para acomodar o uso de salto de canal (salto de frequência) na transmissão dos pacotes *beacons*, é necessário ter um mecanismo para manter a rede sincronizada em caso de falha durante a recepção dos pacotes *beacon*. Para realizar tal tarefa, um temporizador é usado nos nós finais para identificar se um pacote *beacon* foi perdido. O coordenador envia um novo pacote *beacon* a cada $[(n \times 100 \text{ ms}) + 200 \text{ ms}]$, ou seja o tempo total de duração do *slotframe*. Consequentemente o temporizador é configurado para expirar após $[(n \times 100 \text{ ms}) + 300 \text{ ms}]$, ou seja, 100 ms após o tempo total de duração do *slotframe*. Se um Nó receber um novo pacote *beacon* antes que o temporizador expire, o temporizador é reiniciado. Caso contrário, o Nó salta para o próximo canal e aguarda um novo pacote *beacon*, o que irá manter a sincronização.

Após a recepção de um pacote *beacon*, os nós finais obtêm o *Received Signal Strength Indication* (RSSI) da transmissão do pacote *beacon* e enviam de volta ao coordenador essa informação. Para cada pacote recebido no coordenador, o RSSI do pacote recebido, assim como o RSSI do beacon, enviado pelo Nó final, são direcionados para um computador através de uma conexão serial com o Nó coordenador. Assim, é possível observar as variações espaciais na qualidade dos canais dos enlaces entre o coordenador e todos os nós finais, além de problemas de assimetria em todos os enlaces. Como as amostras individuais de RSSI são obtidas em diferentes momentos para os diferentes nós e canais, graças ao protocolo TDMA, foi possível obter um grande número de amostras ao longo do tempo, o que permitiu calcular a potência média e o desvio padrão das amostras e comparar as características dos diferentes canais nos diferentes enlaces.

4.2 Experimento em Estação de Injeção de Água

4.2.1 Plano do Experimento

Neste experimento se previu a análise das características dos 16 canais, definidos pelo padrão IEEE 802.15.4 na faixa de frequência de 2,4GHz, em um ambiente industrial ao ar livre, mostrado na Figura 4.6, no qual quase não há movimento de estruturas e pessoas ao redor dos nós e que definimos como estático. Para realização do experimento, foram utilizados oito nós em diferentes posições, que podem ser visualizadas na Figura 4.8 que além das posições

dos nós, também apresenta as distâncias entre os diversos nós finais e o Nó coordenador.

A rede funcionou em dois dias diferentes, com os nós posicionados no mesmo local. No primeiro dia a rede operou por cerca de 3 horas e no segundo dia por volta de 10 horas. A partir dos resultados é possível avaliar as diferenças nas características dos diferentes canais, as variações espaciais na qualidade dos canais e o comportamento não estacionário do canal sem fio em longos períodos de tempo.

Figura 4.6: Estação de Injeção de Água.

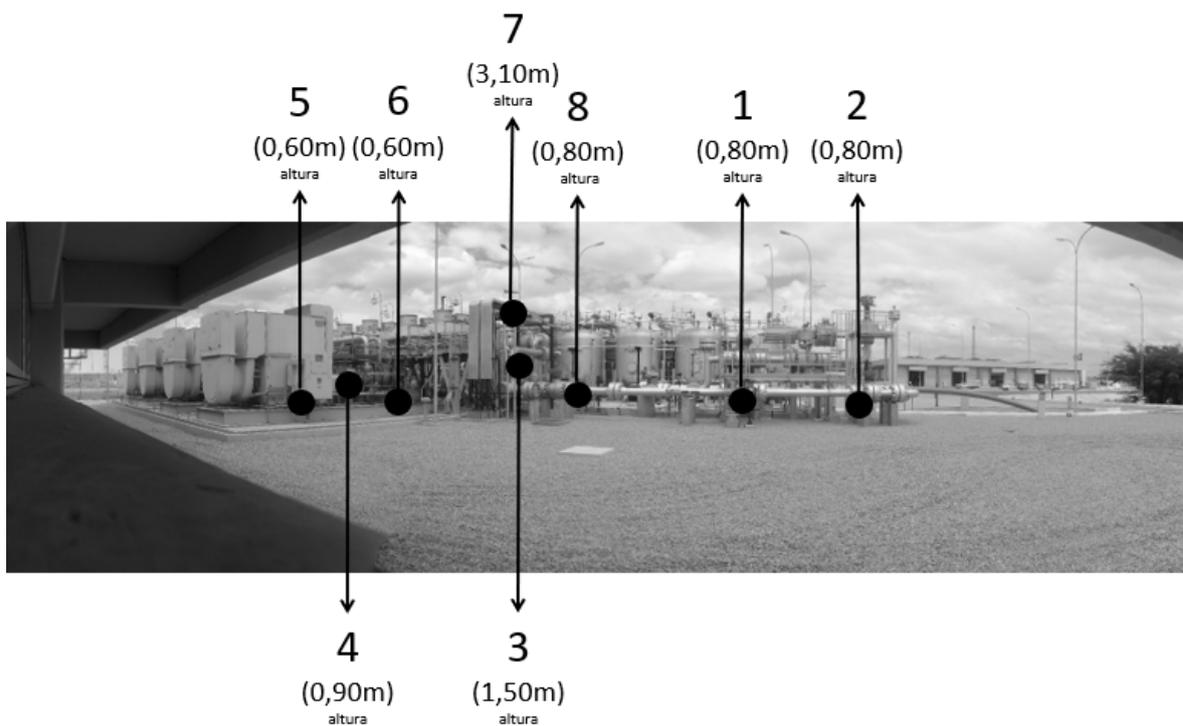


4.2.2 Execução do Experimento

A unidade industrial é uma estação de tratamento e injeção de água, que trata a água que é trazida junto com o petróleo produzido em campos de petróleo terrestres e a envia, pressurizada, para um grupo de plataformas marítimas localizadas a cerca de 25 km da costa, onde é realizada a injeção nos campos de petróleo marítimos, buscando um incremento na produção. Durante o experimento, a estação estava operando normalmente, e os nós sensores foram dispostos próximos aos sensores com fio que estão atualmente instalados e em funcionamento na unidade. Desta forma foi possível trazer para o experimento uma situação mais próxima de uma condição real de funcionamento, podendo até chegar a abalizar um projeto futuro de substituição do sensoramento com fios pelo sensoramento sem fios, através da instalação de uma RSSFI.

Oito nós sensores finais, designados com números de 1 a 8, e um Nó coordenador, designado com número 9, foram distribuídos e instalados na unidade industrial ao ar livre, nas alturas destacadas na Figura 4.7. É importante destacar que a foto da Figura 4.7 foi realizada no local exato em que o Nó coordenador foi instalado, sendo a posição da câmera correspondente à visão do Nó coordenador, direcionada aos nós finais. Já na Figura 4.8 são mostradas as distâncias entre os diversos nós finais e o Nó coordenador.

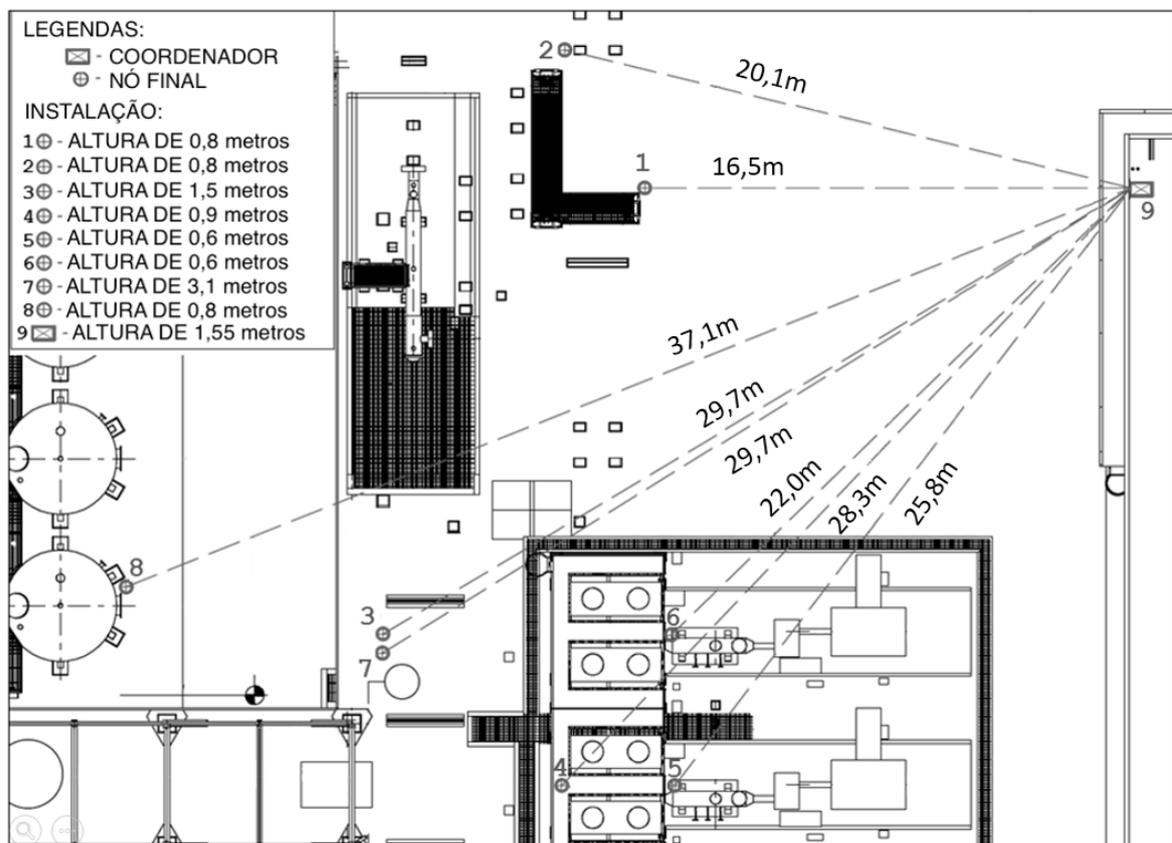
Figura 4.7: Alturas dos nós distribuídos na EIA.



Nos experimentos realizados neste ambiente o protocolo descrito na seção 4.1.1 foi usado, com $n = 8$ intervalos de tempo além de dois intervalos de tempo auxiliares cuja função também é descrita na mesma seção.

O Apêndice A contém um conjunto de Figuras que iniciam na A.2 e vão até à A.25, onde são mostrados conjuntos de 3 fotos para cada Nó, sendo que a primeira foto foi realizada exatamente acima do Nó apontando a câmera em direção ao Nó coordenador. A segunda foto foi realizada imediatamente atrás do Nó, também apontando a câmera em direção ao Nó coordenador. Por fim, a terceira foto foi executada com o objetivo de exibir a proximidade do Nó sensor em relação a alguns instrumentos já instalados no campo.

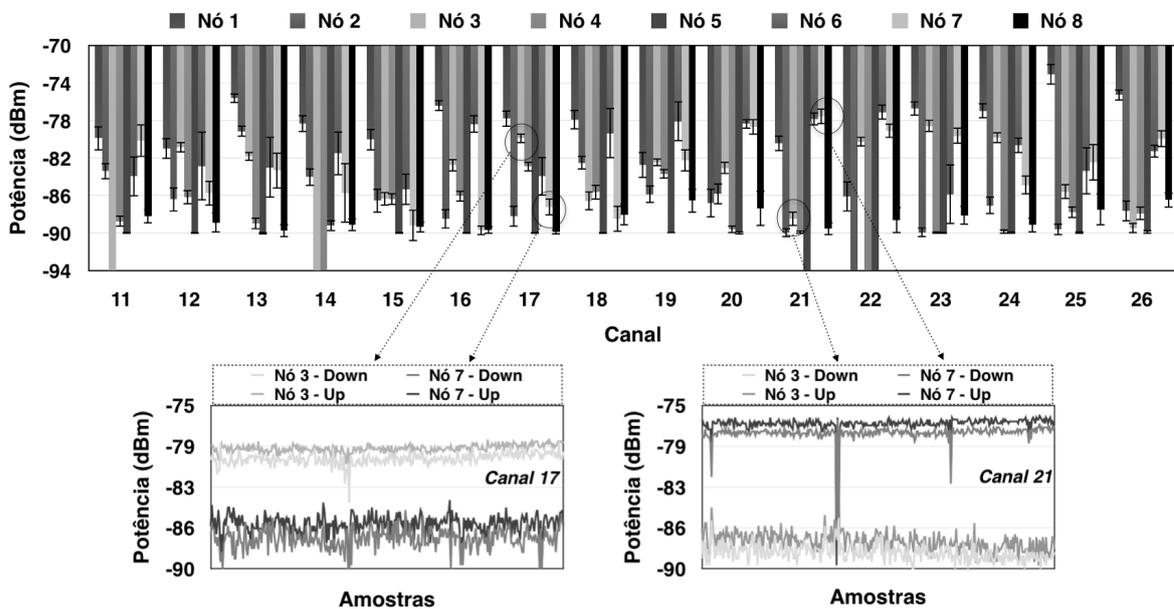
Figura 4.8: Distâncias dos nós distribuídos na EIA.



4.2.3 Análise dos Resultados

A Figura 4.9 mostra a potência média recebida e o desvio padrão para cada Nó final, considerando os dados obtidos no primeiro dia de experimentos. É possível verificar que a potência média de recepção varia significativamente, mesmo para os canais adjacentes e para o mesmo Nó final. Analisando o Nó 1, por exemplo, pode-se verificar diferenças, para alguns canais, superiores a 10 dB, tais como os canais 20 e 25. Para os nós 4 e 5, que foram posicionados em um local com muitas obstruções e sem linha de visada direta, como pode ser visualizado na Figura 4.8, nenhuma comunicação ocorreu enquanto os nós estavam operando no Canal 22, devido a um problema de desvanecimento profundo no canal, para uma ou ambas direções do enlace. Todos os canais mostraram uma baixa qualidade para o Nó 5, mas para o Nó 4 alguns canais apresentaram boa qualidade, como o Canal 17. Problemas de desvanecimento profundo também ocorreram para alguns outros nós e canais, nos quais o número de pacotes recebidos foi muito baixo, ou igual a zero, como foi o caso do Canal 14 para os nós 3 e 4.

Figura 4.9: Variações na qualidade dos canais, para diferentes nós (1º dia de experimentos).



Da Figura 4.9 também é possível analisar as variações espaciais na qualidade dos canais. Os valores de potência de recepção para os nós 3 e 7 são analisados em detalhes para dois canais diferentes. Esses nós foram posicionados quase na mesma distância do coordenador, mas com uma diferença de 1,6 m de altura entre eles. O Canal 17 apresentou alta qualidade para o Nó 3, mas a qualidade foi significativamente menor para o Nó 7. Por outro lado, o

Canal 21 apresentou uma alta qualidade para o Nó 7, mas uma qualidade baixa para o Nó 3. A potência de recepção nos dois sentidos dos enlaces é exibida em detalhes nos dois pequenos quadros da Figura 4.9 e pode-se constatar uma alta correlação entre a potência recebida em ambos os sentidos dos enlaces, mas com uma pequena diferença nos valores médios. Quando a potência de recepção está próxima do limite de sensibilidade do transceptor, como é o caso do Canal 21 para o Nó 3, essas pequenas diferenças podem provocar uma assimetria na qualidade do enlace, momento em que a taxa de entrega bem sucedida de pacotes em um dos sentidos é significativamente inferior do que no outro.

No resultado mostrado na Figura 4.9, o Canal 21 apresenta uma baixa qualidade em quatro nós finais e poderia ser colocado em uma lista negra global. No entanto, este canal é o que apresenta a melhor qualidade para o Nó 7, e também apresenta boa qualidade para os nós 1 e 6. Assim, caso o Canal 21 fosse colocado na lista negra global, a qualidade de serviço para os nós 1, 6 e 7 seria reduzida. Quando a qualidade do canal é afetada por interferências externas, como considerado em Du e Roussos, 2013, colocar um canal na lista negra para toda a rede pode ser uma boa solução, mas quando a variação espacial nos enlaces é ocasionada pelo perfil de multipercurso do ambiente, o desafio passa a ser gerenciar a lista negra de forma que não traga mais dificuldades do que melhorias no desempenho de toda a rede.

Algumas variações abruptas na potência de recepção de alguns nós e canais também foram observadas durante o segundo dia, conforme apresentado na Figura 4.10. Esse comportamento também foi observado em Agrawal et al., 2014, para um ambiente industrial interno e protegido do ambiente externo. A qualidade do Canal 24 diminuiu para o Nó 7, próximo ao fim do experimento, enquanto que ao mesmo tempo a qualidade deste mesmo canal mostrou um aumento na sua qualidade para o Nó 6. Novamente, foi observada uma alta correlação entre as duas direções dos enlaces, mas com uma pequena diferença no valor médio de cada direção do enlace.

A Figura 4.11 mostra uma comparação entre os resultados obtidos nos dois dias. A Figura 4.11 (a) mostra a potência média recebida e a variância para todos os canais. A variância foi alta em todos os canais, devido às diferenças nas características dos canais para os diferentes enlaces. A Figura 4.11 (b) mostra a potência média recebida, e a variância, para os oito diferentes enlaces, considerando os 16 canais. Há também uma variância significativa, devido às

Figura 4.10: Variações na qualidade dos canais, para diferentes nós (2º dia de experimentos).

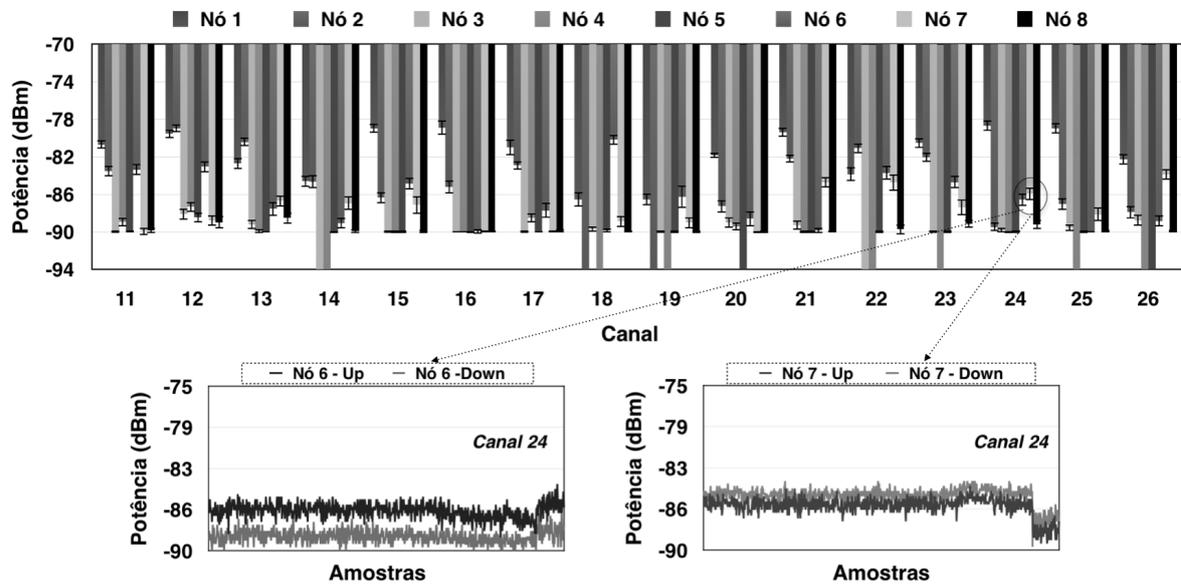
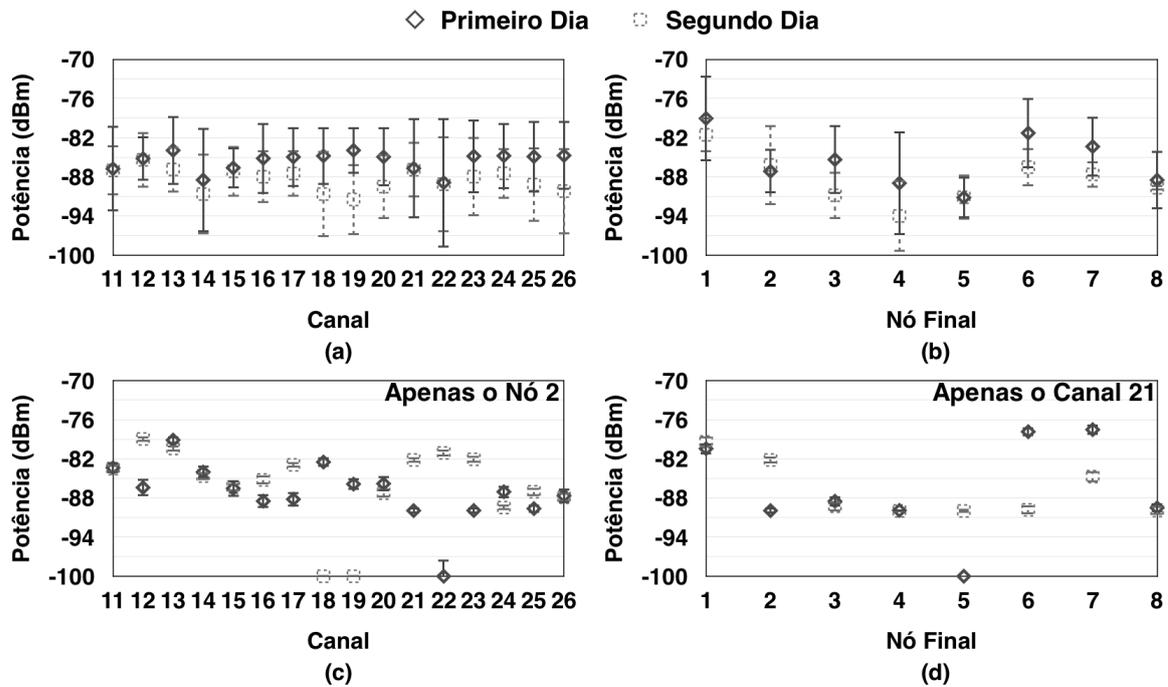


Figura 4.11: Comparação dos resultados entre os dois dias de experimentos.



diferenças nas características dos diferentes canais em cada enlace. A Figura 4.11 (c) mostra os resultados para o Nó 2 especificamente e para todos os canais nos dois dias. Vale ressaltar que enquanto alguns canais tiveram um aumento de qualidade, a qualidade de outros canais diminuiu significativamente no segundo dia. Por exemplo, o Canal 18 apresentou uma boa qualidade no primeiro dia para o Nó 2, mas apresentou um problema de desvanecimento durante o segundo dia. A Figura 4.11 (d) mostra os resultados para o Canal 21 especificamente e para os oito diferentes enlaces. É possível notar que as características dos canais variam de maneira diferente para os diferentes enlaces. Por exemplo, o Canal 21 apresentou uma alta qualidade para o Nó 6 no primeiro dia, mas uma baixa qualidade no segundo dia. Por outro lado, esse mesmo canal apresentou uma melhor qualidade no segundo dia para o Nó 2 em comparação com o primeiro dia.

4.3 Experimento em Estação de Aquecimento Solar

4.3.1 Plano do Experimento

Neste segundo experimento foi realizada a análise das características dos 16 canais, definidos pelo padrão IEEE 802.15.4 na faixa de frequência de 2,4 GHz, em um ambiente industrial ao ar livre, como pode ser verificado na Figura 4.12, no qual grandes estruturas metálicas se movem ao longo do dia, causando variações na qualidade dos canais sem fio ao longo do tempo. O local escolhido para realização dos trabalhos experimentais era inédito e ainda não haviam registros na literatura de estudos em tal ambiente industrial.

Para realização do experimento, foram utilizados dois nós sensores, um Nó atuando como Nó final e outro como Nó coordenador. Foram realizadas três rodadas de experimentos com o Nó coordenador no mesmo local e o Nó final sendo posicionado em três posições diferentes, com distâncias diversas em relação ao Nó coordenador, de acordo com o esquema mostrado na Figura 4.13.

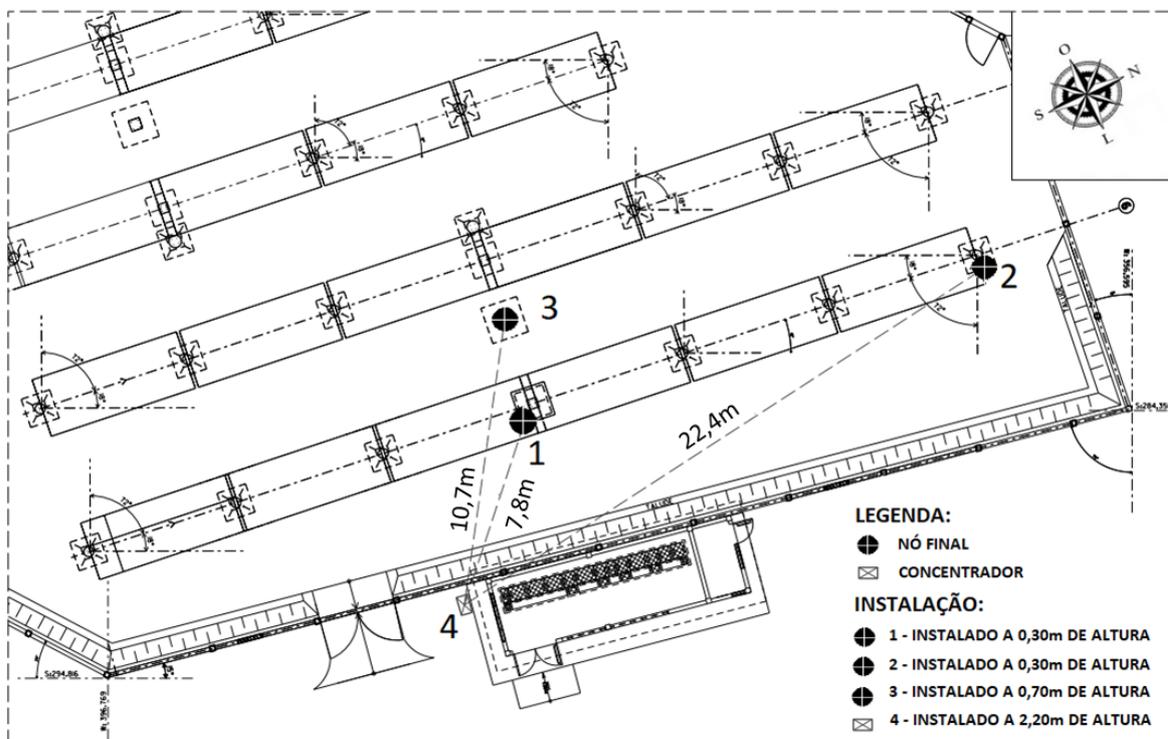
4.3.2 Execução do Experimento

Os experimentos foram realizados em uma estação piloto de aquecimento solar. Trata-se de uma unidade industrial composta por um conjunto de várias calhas solares parabólicas que

Figura 4.12: Estação de aquecimento solar.



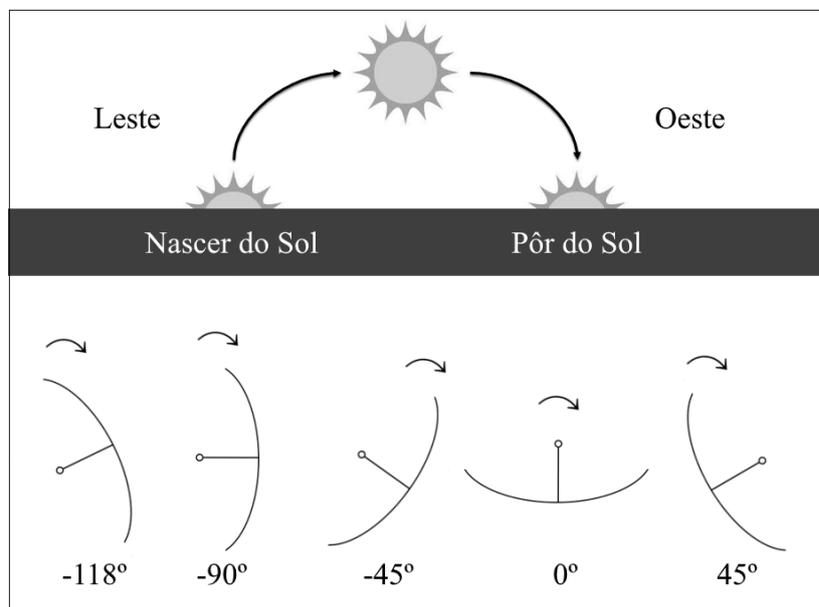
Figura 4.13: Distâncias dos nós distribuídos na Termosolar.



convertem a energia solar incidente em calor para o óleo térmico.

As calhas parabólicas solares têm um sistema de rastreamento, que geralmente é ajustado ao longo do eixo norte a sul e são montados em suportes estruturais, feitos de alumínio, que permitem rastrear o sol de leste a oeste durante o dia, como mostrado na Figura 4.14. Na mesma figura, temos a representação de 5 inclinações das calhas parabólicas, que partem de -118° chegando até 45° depois de aproximadamente 10 horas de funcionamento. Após atingir os 45° , o sistema encerra seu funcionamento recolhendo as calhas à posição inicial. Essa movimentação é a principal causa das variações temporais na qualidade dos canais sem fio, conforme observado nos resultados.

Figura 4.14: Calhas parabólicas acompanhando o sol.



Nos experimentos realizados neste ambiente, o mesmo protocolo descrito na seção 4.1.1 foi usado, mas com apenas três intervalos de tempo por *slotframe* (B , S_1 e G), já que apenas um Nó final se comunicava em cada replicação do *slotframe*.

Três experimentos foram realizados em três dias diferentes, com o Nó final posicionado em três posições diferentes. Os experimentos foram realizados até um dos nós exaurir suas baterias e a rede parar de funcionar. No primeiro dia (Posição 1) a rede operou por cerca de 23 horas, no segundo dia (Posição 2) a rede operou por cerca de 18 horas, e no terceiro dia (Posição 3) a rede operou para cerca de 12 horas. Através destes experimentos, foi possível observar a influência, a longo prazo, do movimento das calhas parabólicas solares

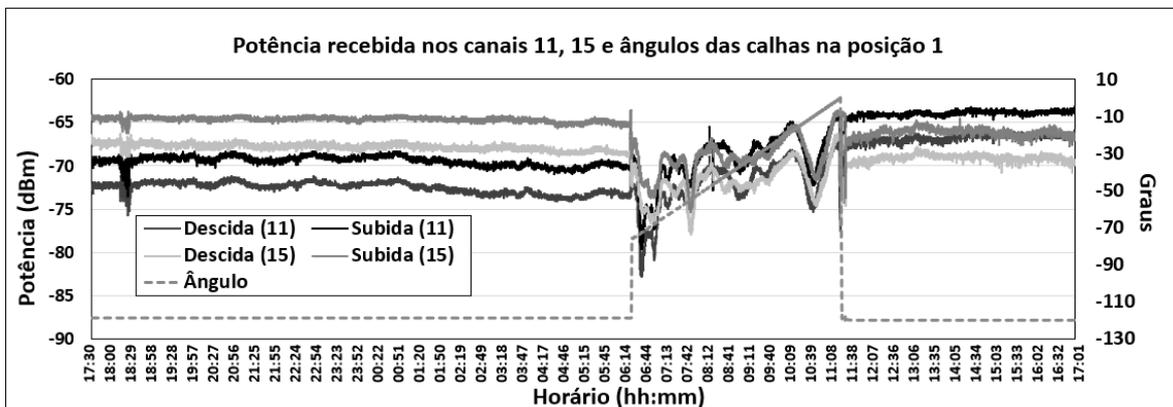
na qualidade dos 16 canais definidos pelo padrão IEEE 802.15.4, para as três diferentes posições.

4.3.3 Análise dos Resultados

As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram a potência verificada em ambos os sentidos do enlace para os experimentos nas posições 1, 2 e 3 respectivamente. Para cada posição, a potência recebida para dois canais diferentes é exibida, buscando comparar o comportamento dos canais ao longo do tempo. Nos gráficos também é possível ver a variação no ângulo das calhas parabólicas solares ao longo do tempo. Durante os períodos em que as calhas estão paradas, o canal permanece com um comportamento estacionário. No entanto, durante os períodos com movimento das calhas, o comportamento do canal é muito dinâmico.

Por exemplo, na Posição 1 (Figura 4.15) a potência recebida no Canal 11 permanece entre -70 dBm e -75 dBm para os dois sentidos do enlace, durante várias horas, e durante a movimentação das calhas a potência recebida ficou abaixo de -80 dBm durante alguns períodos. A potência recebida para o Canal 15 apresentou comportamento semelhante, mas com valores médios diferentes para a potência recebida em determinados momentos.

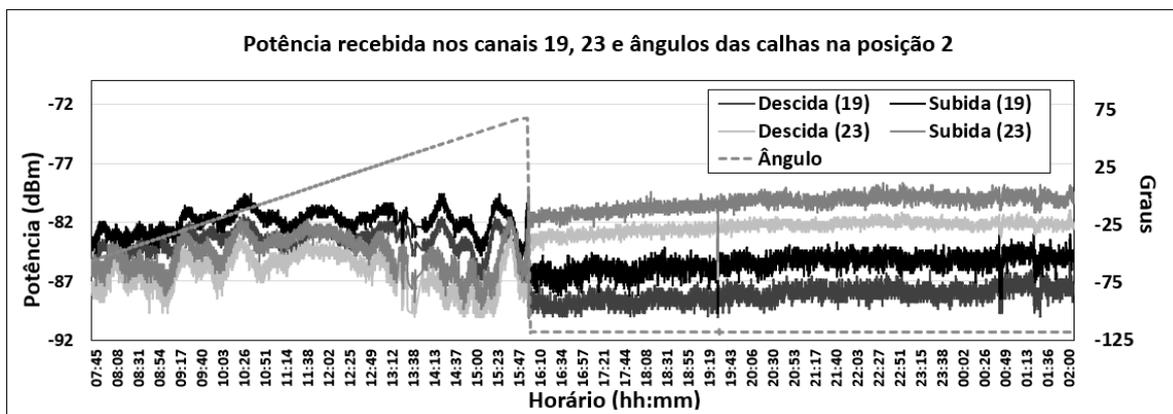
Figura 4.15: Potência nos canais 11 e 15 e ângulos das calhas na posição 1.



Após o período de movimento, a potência recebida estabilizou-se em um valor maior, ou seja, com melhor qualidade para o Canal 11 em comparação com os valores de potência recebida antes das calhas parabólicas iniciarem sua movimentação. Por outro lado, a qualidade do Canal 15 diminuiu ligeiramente após o término da movimentação das calhas e sua qualidade piorou em relação à qualidade do Canal 11. Isso provavelmente ocorreu pois

apesar do grau de inclinação no início e no final da movimentação ser o mesmo, momento em que as estruturas estão em repouso e estacionadas, é possível que as posições das calhas parabólicas, nesses dois períodos, difiram em poucos centímetros ou milímetros, o que é suficiente para causar uma diferença nas características dos canais. Apesar das variações temporais, de uma maneira geral, todos os canais apresentaram boa qualidade na posição 1 durante todo o experimento, uma vez que a distância entre o transmissor e o receptor foi de apenas 7,8 metros e a posição permitia linha de visada direta entre os nós.

Figura 4.16: Potência nos canais 19 e 23 e ângulos das calhas na posição 2.



Para a posição 2, a potência recebida para os canais 19 e 23 é exibida na Figura 4.16. É possível perceber que durante o movimento das calhas o Canal 19 apresenta uma boa qualidade, com potência recebida superior a 10 dBm acima da sensibilidade de -94 dBm do transceptor, apesar das variações ocasionadas pelo comportamento dinâmico do ambiente. No entanto, após o término do movimento das calhas, a potência média recebida caiu para um valor próximo à sensibilidade do transceptor. Por outro lado, mesmo a qualidade do Canal 23 sendo baixa durante o movimento das calhas, quando comparado ao Canal 19, sua qualidade melhorou após o término do movimento, e o Canal 23 se tornou melhor que o Canal 19 para este enlace em particular.

Para a posição 3 (Figura 4.17) foram escolhidas as potências recebidas dos canais 17 e 19 para realização de análises. A qualidade geral dos canais foi pior em comparação com as outras duas posições, provavelmente por que o Nó final estava atrás do primeiro conjunto de calhas parabólicas. É interessante notar que após o fim do movimento das calhas solares, a qualidade do Canal 19 caiu e a potência média recebida permaneceu muito baixa, próximo da sensibilidade do transceptor até o final do experimento. Por outro lado, a qualidade do Canal

17 aumentou logo após o término do movimento das calhas e a potência média recebida permaneceu 10 dBm acima da sensibilidade do transceptor para ambos os sentidos do enlace.

Figura 4.17: Potência nos canais 17 e 19 e ângulos das calhas na posição 3.

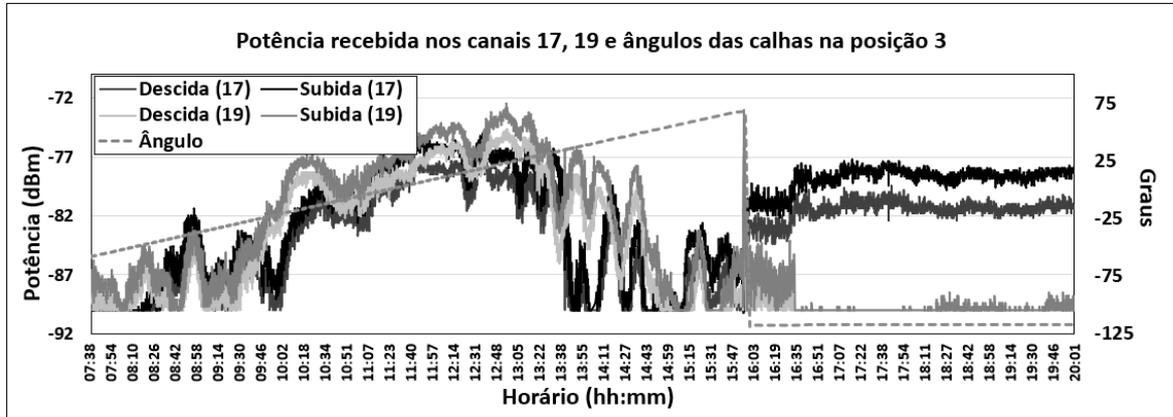
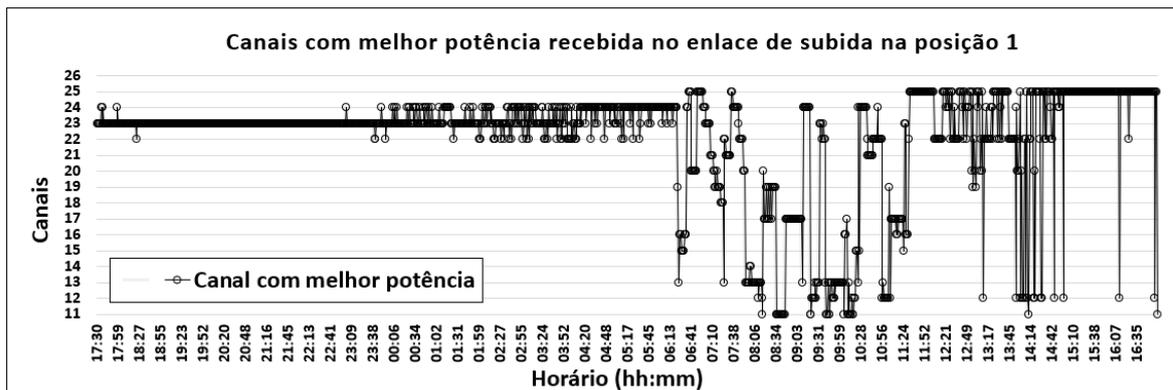


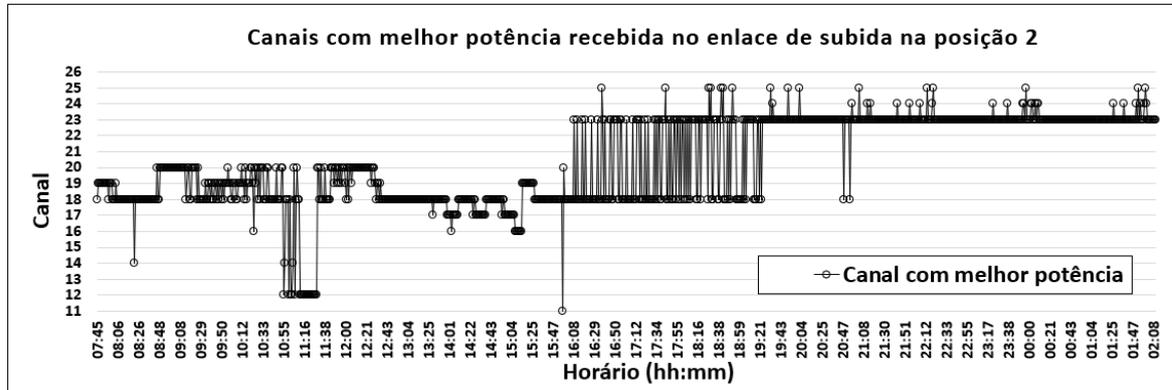
Figura 4.18: Canais com melhor potência recebida em intervalos de 1 minuto na posição 1.



As Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 mostram os canais que apresentaram a maior potência média recebida durante os experimentos, para as posições 1, 2 e 3 respectivamente. Para definir o melhor canal em cada momento, a potência média recebida para cada intervalo de tempo de um minuto foi calculada para todos os canais. Essas análises destacam a necessidade do uso de protocolos adaptativos para selecionar os melhores canais em cada momento e também a necessidade de selecionar os canais apropriados para cada enlace específico, conforme analisado anteriormente na seção 4.5, nos experimentos na Estação de Injeção de Água. Em geral, uma alta correlação entre os dois sentidos do enlace foi observada em todos os experimentos, mas com uma pequena diferença no valor médio de cada sentido do enlace. Se faz necessário uma definição para continuação das discussões, assim, o termo enlace de subida

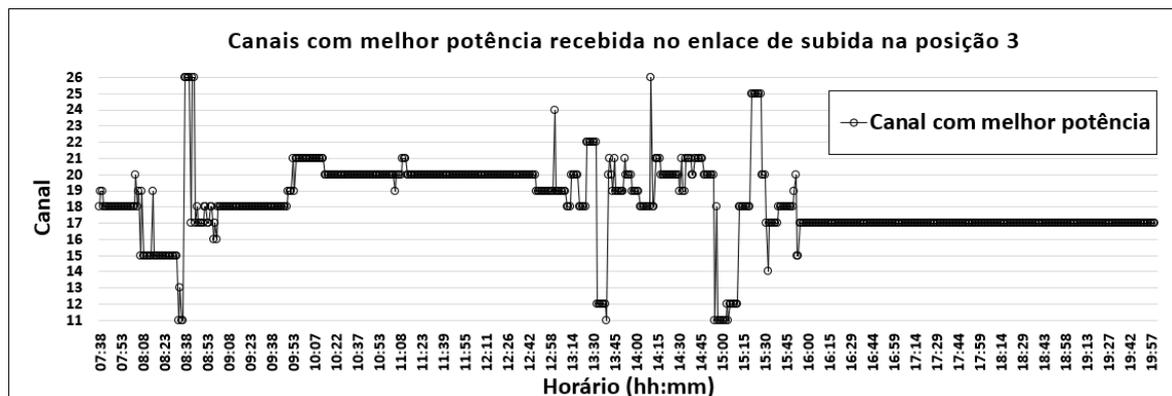
representa a transmissão a partir do Nó coordenador para os nós finais, enquanto o termo enlace de descida representa a transmissão a partir dos nós finais para o Nó coordenador. As Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 apresentam apenas a análise do enlace de subida.

Figura 4.19: Canais com melhor potência recebida em intervalos de 1 minuto na posição 2.



Para a posição 1 (Figura 4.18), antes do início do movimento das calhas, o Canal 23 apresentou a melhor qualidade durante quase todo o tempo. No entanto, durante o movimento das calhas, o melhor canal variou bastante. Após o término do movimento, o Canal 25 foi o melhor quase todo o tempo, porém com variações maiores do que as observadas antes do início do movimento das calhas. É importante notar que devido à pequena distância entre o transmissor e o receptor no experimento na posição 1, todos os canais apresentaram boa qualidade.

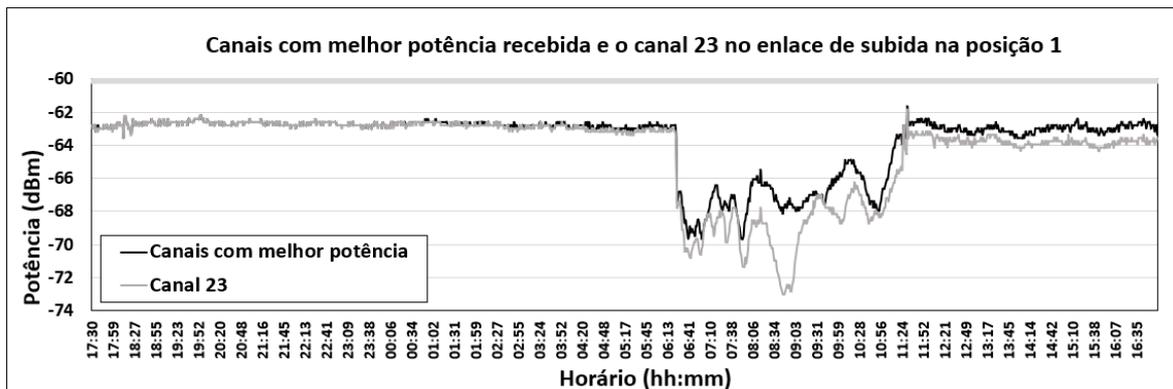
Figura 4.20: Canais com melhor potência recebida em intervalos de 1 minuto na posição 3.



Para as posições 2 e 3 a variação foi menor, mesmo durante o movimento das calhas solares (que ocorreu no início do experimento para essas duas posições). Isso ocorreu devido à maior distância entre o transmissor e o receptor em comparação à posição 1 e devido às

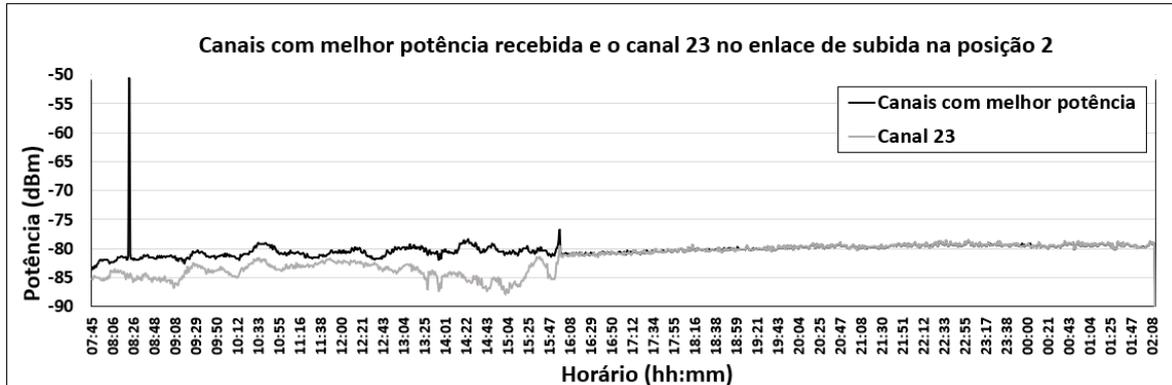
obstruções. Nesses cenários, em um dado momento, muitos canais apresentaram má qualidade, e apenas um pequeno conjunto de canais apresentou boa qualidade, o que diminui a diversidade de bons canais. Por exemplo, para o experimento na posição 2 (Figura 4.19), durante o movimento das calhas, o melhor canal variou entre os canais 12, 18, 19 e 20 durante quase todo o tempo. Para o experimento na posição 3 (Figura 4.20), o melhor canal foi o 20 durante um longo período enquanto havia movimento nas calhas. Esses resultados encorajam o desenvolvimento de mecanismos para o gerenciamento dinâmico de listas negras em protocolos que usam salto de canais, como o TSCH do 802.15.4e e o WirelessHART, como proposto nos trabalhos de Kotsiou et al., 2017, e Zorbas et al., 2018. Outra solução possível é o uso de adaptação de canal, no qual apenas um canal é usado durante um longo período de tempo e a mudança de canal só ocorre quando o canal em uso começa a apresentar má qualidade, como avaliado em Gomes et al., 2017b, para redes DSME.

Figura 4.21: Comparação entre o melhor canal (23) durante todo tempo e os melhores canais em intervalos de 1 minuto na posição 1.



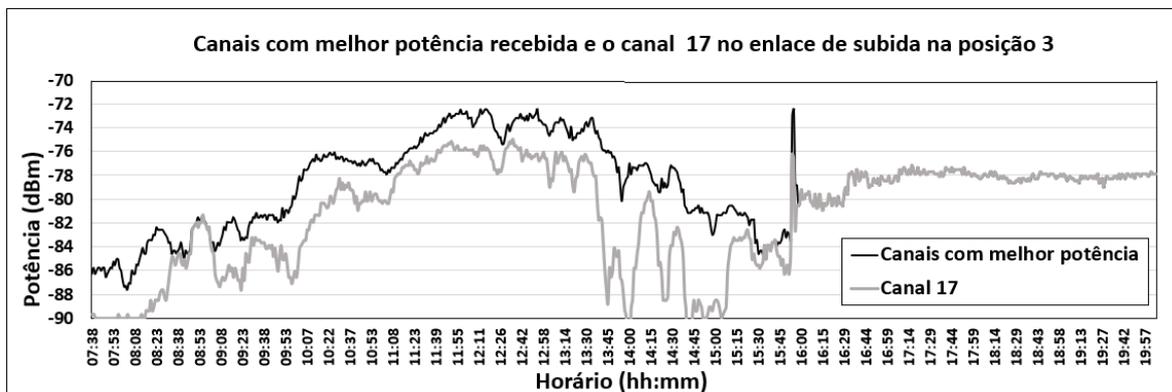
Nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 é mostrada a potência recebida do canal que esteve o maior número de vezes sendo o melhor canal. Nas mesmas figuras também pode-se conferir a potência recebida considerando o canal com melhor potências para cada intervalo de um minuto. É possível notar que mesmo usando o canal que apresenta a melhor qualidade geral, durante certos períodos a potência recebida para esse canal pode ser baixa, tornando o enlace menos robusto. Usando um mecanismo de diversidade de canais apropriado, pode ser possível alternar o canal dinamicamente e tentar usar um canal de melhor qualidade durante todo o tempo. Para tanto, é preciso implementar mecanismos para estimar a qualidade do enlace e para efetivar o salto de canais, de maneira adaptativa.

Figura 4.22: Comparação entre o melhor canal (23) durante todo tempo e os melhores canais em intervalos de 1 minuto na posição 2.



No experimento na posição 3 (Figura 4.23), em que o Nó final estava atrás de um grande obstáculo (a primeira fila de calhas parabólicas), durante certos períodos a potência recebida permaneceu muito próxima à sensibilidade do transceptor, o que tornaria o enlace menos robusto e mais suscetível a perdas de pacotes devido a variações rápidas na qualidade do canal ou possíveis interferências externas. Já para o caso dos melhores canais em intervalos de tempo de um minuto, a potência recebida permaneceu acima de -88 dBm durante todo o tempo do experimento. Assim, fica demonstrado que ao selecionar canais apropriados para comunicação de forma dinâmica, é possível garantir uma boa qualidade de comunicação, mesmo para nós finais obstruídos por estruturas ou equipamentos que se movimentam de forma determinística.

Figura 4.23: Comparação entre o melhor canal (17) durante todo tempo e os melhores canais em intervalos de 1 minuto na posição 3.



4.4 Experimento em Estação de Carregamento de Derivados de Petróleo

4.4.1 Plano do Experimento

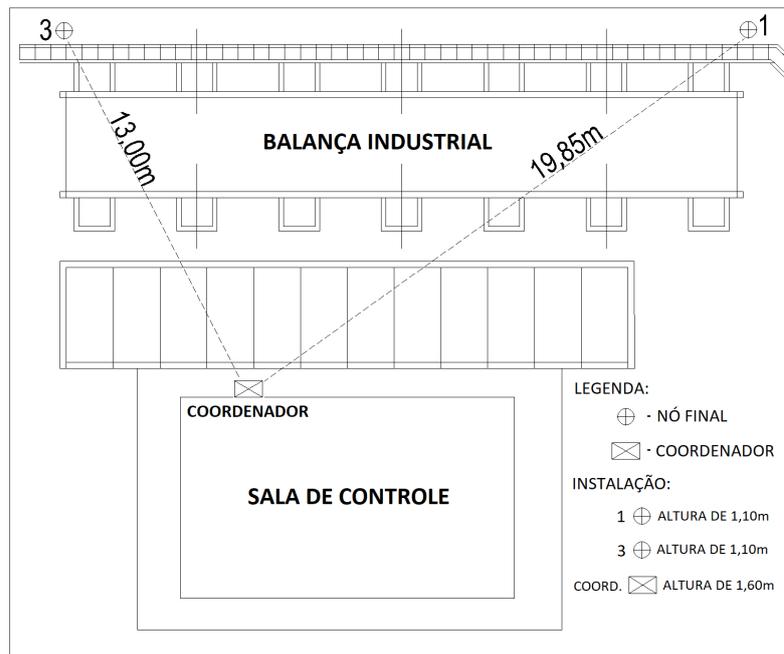
O experimento foi realizado em um ambiente industrial ao ar livre, em uma planta de carregamento de derivados de petróleo, mais especificamente na área da balança industrial e de sua sala de controle. Trata-se de um ambiente dinâmico, no qual caminhões-tanque trafegam e estacionam ao longo do dia, ocasionando variações na qualidade dos enlaces sem fio ao longo do tempo. Até o presente momento não encontramos na literatura estudos em um ambiente industrial ao ar livre nas proximidades de uma balança industrial. Na Figura 4.24 são mostradas algumas fotos do ambiente estudado. Já na Figura 4.25 é mostrada uma planta baixa do mesmo local, com informações sobre a disposição dos componentes da RS-SFI. Nessa mesma figura pode-se ver a indicação da localização dos nós sensores e do Nó coordenador, bem como as distâncias entre o Nó coordenador e os nós sensores e também as alturas em relação ao solo em que os nós sensores e o Nó coordenador foram instalados.

Figura 4.24: Estação de carregamento de derivados.



No experimento realizado, dois nós sensores e um coordenador, formaram uma rede com topologia estrela, que pode ser visualizada com mais detalhes na Figura 4.26. Os nós foram instalados neste ambiente industrial ao ar livre, próximos aos módulos sensores de pressão

Figura 4.25: Distâncias e Alturas dos nós.



da balança industrial que são interligados por cabos e que fazem parte do sistema já existente para medição de peso.

Figura 4.26: RSSFI com topologia estrela.



Durante os experimentos, a unidade industrial estava em condição de operação normal, inclusive com a balança industrial sendo utilizada para pesagem de caminhões-tanque vazios ou carregados. Durante o procedimento de pesagem o motorista estaciona o caminhão tanque em cima da balança, sai do caminhão e vai até a sala de controle da balança para interagir com o operador, no intuito de fornecer e receber informações, momento em que a pesagem é realizada. Após a pesagem, o caminhão é retirado, liberando a balança para pesagem de outros caminhões-tanque.

Para permitir que os nós se comuniquem usando todos os canais e sem colisões, um protocolo baseado em TDMA e salto de canais foi implementado. No protocolo, o acesso ao

meio ocorre com base em uma estrutura de quadros de tempo (*slotframes*), que se repete continuamente de forma semelhante ao *slotframe* definido no TSCH, utilizado nos protocolos WirelessHART e ISA 100.11a. Pacotes sinalizadores (*beacons*) são enviados periodicamente pelo coordenador para sincronizar os nós finais no início de cada ciclo. Os canais são usados seguindo um escalonamento *round-robin*, onde as fatias de tempo são atribuídas a cada processo em partes iguais e em ordem circular, onde até quatro transmissões de dados podem ocorrer por ciclo.

No primeiro *slot* o coordenador transmite um *beacon* (*B*) em *broadcast* e fica aguardando receber os pacotes de dados que podem ser transmitidos pelos nós finais nos quatro intervalos de tempo seguintes. Como apenas dois nós finais foram utilizados nesta experiência, somente os *slots* 1 e 3 foram usados para transmitir pacotes de dados. Assim, nomearemos os nós como Nó 1 e Nó 3 para se referir ao intervalo de tempo alocado a eles. Quando um Nó final recebe um *beacon* do coordenador, ele aguarda o intervalo de tempo alocado para ele e realiza a transmissão de um pacote de dados para o coordenador. Há também um *slot* de tempo de guarda (*G*) no final do *slotframe*, que é usado pelos nós para alternar o canal e esperar o *beacon* do próximo *slotframe*.

Para utilizar o salto de canal, é necessário ter um mecanismo para manter a rede sincronizada em caso de falhas durante a recepção dos *beacons*. Para realizar tal tarefa, um temporizador é usado nos nós finais para identificar que um *beacon* foi perdido. O coordenador envia um novo *beacon* a cada 600 ms e o temporizador foi configurado para expirar após 700 ms. Se um Nó recebe um novo *beacon* antes que o temporizador expire, o temporizador é zerado, caso contrário, o Nó muda o canal e aguarda o próximo *beacon*, o que mantém a sincronização.

Após a recepção de um *beacon*, os nós finais obtêm o RSSI do *beacon* e o transmitem esse valor de volta ao coordenador. Para cada pacote recebido no coordenador, o RSSI do pacote, bem como o RSSI do *beacon*, enviado pelo Nó final, são encaminhados para um computador através de uma porta serial. A taxa geral de recepção de pacotes (*packet receive rate*, PRR) também é calculada no coordenador. O valor do PRR é influenciado pelos erros de transmissão em ambas as direções, tanto nas transmissões de *beacons* como nas transmissões de pacotes de dados.

4.4.2 Execução do Experimento

Duas rodadas de experimentos, em dois dias consecutivos, foram realizadas com os nós posicionados no mesmo local. No primeiro dia, a rede operou aproximadamente por 7 horas, das 10h47 às 18h02 e no segundo dia em torno de 6 horas, a partir das 12h19 até às 18h09. Os nós finais estão equipados com um microcontrolador PIC18F46J50 e um transceptor MRF24J40MA, com uma potência de transmissão de 0 dBm e uma antena PCB com ganho de 2,09 dBi. O Nó coordenador é um protótipo, projetado de acordo com o trabalho de (GOMES et al., 2017), composto por dois microcontroladores PIC18LF4620 conectados a dois transceptores MRF24J40MA. Cada conjunto de componentes atua como um Nó individual, sendo que um conjunto atua como um Nó LQE e o outro conjunto atua como um Nó sensor. Os microcontroladores podem enviar os dados coletados para um computador através de duas portas seriais independentes. Os dois microcontroladores estão conectados através de um barramento de 10 bits, que é utilizado para trocar dados entre o Nó LQE e o Nó sensor. O estimador proposto utiliza valores de RSSI obtidos do Nó final para executar a estimativa, no entanto, todo processamento é executado pelo Nó LQE. Para cada pacote recebido, o Nó sensor do coordenador transfere os dados deste pacote usando o barramento de 10 bits para o Nó LQE também no coordenador. Nos experimentos foi possível monitorar 16 canais de cada Nó da rede, perfazendo um total de 32 canais monitorados.

O estimador proposto é executado no lado do receptor, e combina três métricas: a análise do RSSI de pacotes recebidos, que captura os efeitos do desvanecimento e sombreamento no canal; a análise dos valores de RSSI obtidos em períodos sem recepção de pacotes, que captura a influência de fontes de interferência na qualidade do canal; o número de pacotes duplicados recebidos, que tem alta correlação com o PRR no transmissor. Uma versão reduzida do estimador foi implementada para este experimento, utilizando apenas uma das métricas, que é baseada na análise de o RSSI dos pacotes recebidos. As outras duas métricas não foram utilizadas pois nenhuma fonte de interferência externa estava presente no ambiente e a retransmissão de pacotes não foi considerada neste experimento.

Uma média calculada a partir de 10 valores de RSSI, foi utilizada para cálculo da métrica. Após a aquisição dos primeiros 10 valores, uma janela deslizante foi utilizada para computação de novos valores recebidos. Assim, o valor mais antigo era descartado, e o novo valor adquirido tomava o seu lugar e um novo cálculo era realizado. O valor do LQE varia de 0 (zero) à

100 (cem) e estima apenas a qualidade do enlace ascendente, isto é, a partir de um dos nós finais até o coordenador.

Para obter mais detalhes sobre a implementação do LQE, da construção do Nó LQE e de estudos experimentais para validar ambos em um ambiente industrial *indoor*, se faz necessário consultar o trabalho de (GOMES et al., 2017).

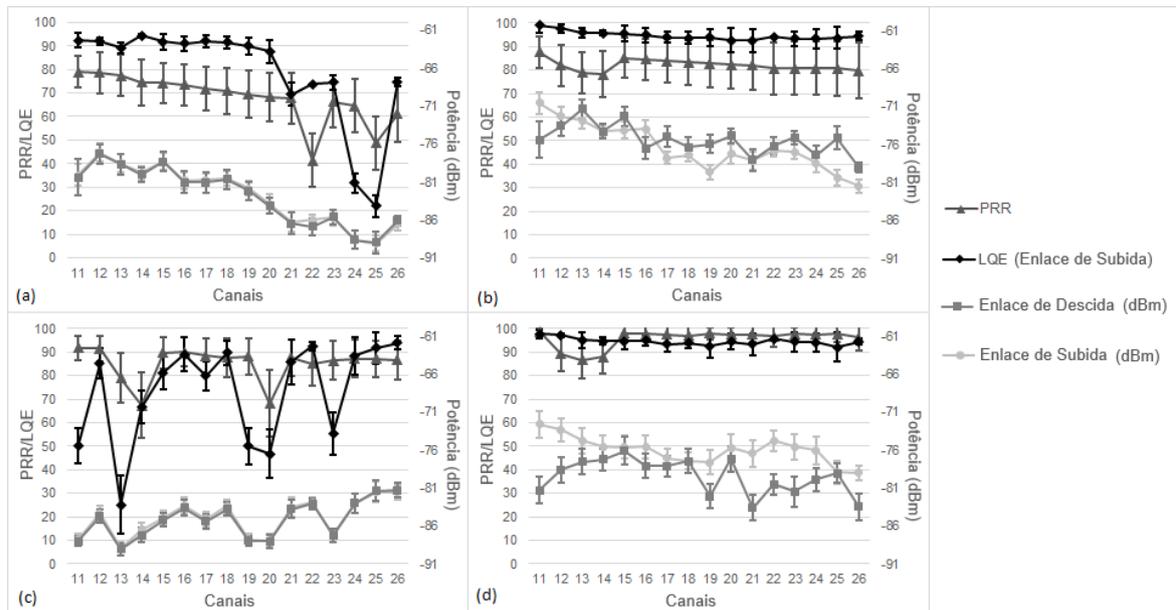
4.4.3 Análise do Experimento

O Nó 1 foi o Nó mais afetado em termos de qualidade de enlace, devido à maior distância entre ele e o coordenador e também porque a sua linha de visada foi obstruída pelos caminhões quando estavam estacionados na balança. Na Figura 4.27 são mostrados os dados relacionados aos nós 1 e 3 nos dois dias de experimentos. Os gráficos mostram o valor médio do LQE, a média PRR global e o valor médio da potência recebida de todos os canais, tanto do enlace de subida como do enlace de descida. Nos dois dias, a potência recebida do enlace de subida e do enlace de descida, no Nó 1 foram semelhantes, o que indica uma baixa assimetria, diferentemente do Nó 3 que apresentou uma maior assimetria no enlace.

Na Figura 4.27 (a) é possível ver que os canais de 11 à 20 apresentaram melhor qualidade para o Nó 1, da mesma forma que o LQE também acompanhou a mesma tendência de melhor qualidade para os canais de 11 à 20, o que indica que o LQE foi capaz de identificar os canais com boa qualidade. Para o mesmo Nó, entretanto, no segundo dia de experimento, o Canal 13 apresentou a pior média de qualidade e esse comportamento foi prontamente detectado pelo LQE, que atingiu um valor abaixo de 30. A potência média recebida dos canais 11, 14, 19, 20, e 23 estavam abaixo de -86 dBm e o LQE apresentou valores abaixo de 70 para esses 5 canais. O PRR foi superior ao valor do LQE em alguns casos, como no caso do Canal 23. Quando a potência média recebida está mais próxima da sensibilidade do transceptor, o enlace se torna menos robusto em relação a possíveis variações que podem ocorrer no ambiente e por essa razão o valor do LQE foi menor para esses canais.

Além das variações espaciais, outro aspecto importante são as variações temporais na qualidade do enlace. Por exemplo, o Canal 13 apresentou alta qualidade no primeiro dia para o Nó 1, mas sua qualidade foi significativamente menor no segundo dia. Por outro lado, o Canal 25 apresentou uma menor qualidade durante o primeiro dia para o Nó 1, quando comparado com a sua qualidade no segundo dia. Assim, para manter uma boa QoS ao longo

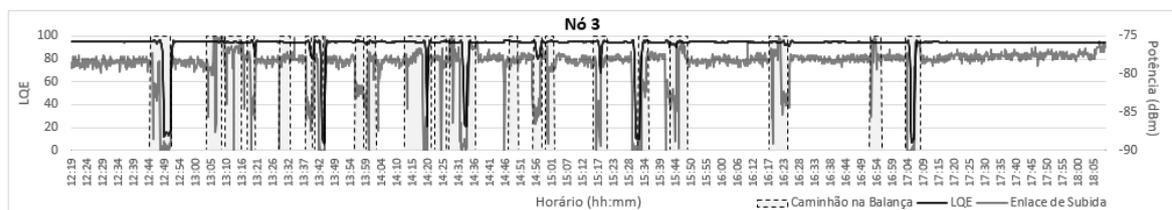
Figura 4.27: 1º dia de experimento (a) Nó 1 (b) Nó 3 - 2º dia de experimento (c) Nó 1 (d) Nó 3.



do tempo, é importante alocar os canais dinamicamente, com base nas suas características atuais.

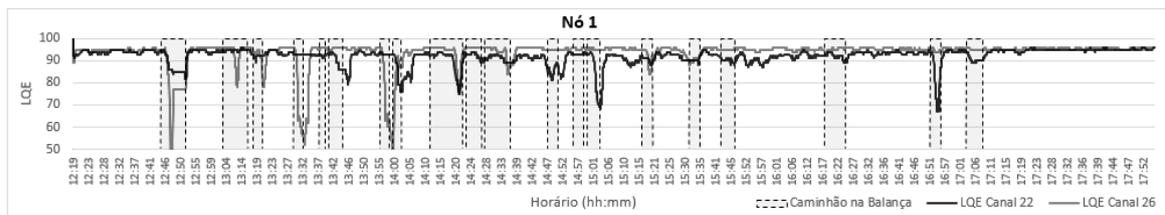
As variações temporais também podem ser verificadas num curto espaço de tempo, por exemplo, quando os caminhões atuam como um obstáculo destrutivo. Na Figura 4.28 é mostrada a potência recebida do enlace de subida e os valores do LQE para o Canal 25 do Nó 3. Em alguns momentos, os valores de potência do enlace ascendente diminuem e crescem rapidamente, mas a queda não se perpetua por muito tempo. Neste caso, o LQE não acompanha essas mudanças rápidas na qualidade do enlace, e assim impede que os níveis mais altos dos protocolos de rede desencadeiem ações desnecessárias. Por outro lado, as variações de qualidade de enlace, quando se tornam mais persistentes, são prontamente notadas pelo estimador e, neste caso, os nós poderiam, por exemplo, mudar o canal ou começar a usar um mecanismo de salto de canal, para lidar com essa variação na qualidade do enlace.

Figura 4.28: 2º dia de experimento - Nó 3 - Canal 25 - LQE e Potência do enlace de subida.



Na Figura 4.29 são mostrados os valores de LQE dos canais que apresentaram as maiores médias de qualidade para o Nó 1 no segundo dia de experimento. Mesmo para esses dois canais, é possível perceber que em alguns momentos, particularmente quando os caminhões estão presentes no ambiente, algumas variações significativas podem ocorrer. Na maior parte do tempo, o Canal 26 apresentou a melhor qualidade, mas em alguns momentos sua qualidade caiu, e o Canal 22 apresentou uma qualidade superior. Assim, um bom protocolo adaptativo poderia se beneficiar do uso das informações fornecidas pelo LQE para lidar com essas variações temporais. Em geral, o uso de adaptação de canais parece ser uma boa escolha, já que é possível usar apenas um canal por enlace durante um longo período, e obter boa qualidade. No entanto, diferentes canais podem ser usados para diferentes nós e os protocolos precisam reagir rapidamente em caso de variações significativas, a fim de mudar o canal ou tomar outras ações para mitigar o problema.

Figura 4.29: 2º dia de experimento - Nó 1 - Canais 22 e 26 - LQE.



4.5 Conclusões Gerais dos Experimentos

Tendo em vista as variações abruptas na potência de recepção de alguns canais nos diversos nós, verifica-se a grande dificuldade para se garantir uma boa qualidade de serviço (QoS) para todos os nós quando apenas um canal é utilizado em toda a rede, como nos protocolos de acesso ao meio definidos pelo padrão IEEE 802.15.4-2003. Mesmo para os novos padrões definidos para RSSFI, alguns problemas podem surgir devido às variações espaciais na qualidade do canal. Variações espaciais na qualidade dos canais podem acontecer devido à interferências construtiva ou destrutiva causada pelo ambiente no qual esta instalada a RSSFI (BACCOUR et al., 2012). A natureza dessa interferência não depende da distância entre os nós, mas sim da natureza do caminho físico entre o transmissor e receptor (GOLDSMITH, 2005). Então, para alguns canais, a qualidade pode ser alta para um Nó e baixa para o outro,

o que torna difícil para um protocolo de canal único fornecer uma boa qualidade de serviço (QoS) para todos os nós durante todo o tempo de funcionamento de uma RSSFI.

Por exemplo, no modo *Low Latency Deterministic Network* (LLDN) do padrão 802.15.4e, o acesso baseado em TDMA é usado para evitar colisões, considerando uma topologia em estrela e uma estrutura de *superframe*, buscando obter valores de latências muito baixos (ANWAR; XIA; ZHAN, 2016). Todavia, apenas um canal é usado para comunicação com todos os nós finais. Um melhoramento possível é o uso de múltiplos nós sorvedouros, cada um utilizando um canal diferente. Neste caso, quando o canal em uso por um determinado Nó final passa a apresentar baixa qualidade, este Nó pode trocar de canal e passar a se comunicar com outro Nó sorvedouro. Para tanto, se faz necessário a utilização de algum mecanismo para estimar a qualidade dos enlaces em tempo real, conforme Gomes et al., 2017, como também de um sistema de sincronização específico para a operação dos nós e a alocação dos intervalos de tempo, em cenários com múltiplos nós sorvedouros. O protocolo descrito por Patti e Bello, 2016, utiliza uma topologia de árvore e comunicação multicanal para redes LLDN, com seleção adaptativa de canal, mas o mesmo canal é alocado para todos os nós na sub-rede, de forma que problemas ocasionados pelas variações espaciais na qualidade do canal também podem ocorrer dentro das mesmas sub-redes.

Mesmo para protocolos que usam salto de frequência ou adaptação de canal, alguns problemas podem surgir. Por exemplo, o modo TSCH do padrão IEEE 802.15.4e, como também os protocolos de acesso ao meio definidos nos padrões WirelessHART, WIA-PA e ISA100.11a, usam TDMA e salto de frequência. Nessa abordagem, todos os canais podem ser usados pelos nós finais para realizar a comunicação. No entanto, a lista negra precisa ser gerenciada adequadamente para obter um bom QoS na rede. No trabalho de Du e Roussos, 2013, observou-se que quanto maior o tamanho da lista negra, melhor o desempenho da comunicação. Este resultado corrobora com os resultados apresentados por Gürsu et al., 2016. No entanto, esse tipo de comportamento só ocorre se um monitoramento adequado da qualidade dos canais for realizado, a fim de configurar adequadamente a lista negra.

O modo *Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension* (DSME) do padrão IEEE 802.15.4e emprega o salto de frequência ou adaptação de canal, durante os períodos livres de contenção. Ao usar a adaptação de canal é possível lidar com as variações espaciais na qualidade dos canais, uma vez que a decisão sobre o canal a ser utilizado por cada

Nó é baseada apenas nas informações sobre a qualidade do enlace específico entre um par específico de transmissor e receptor. Além disso, o mesmo canal pode ser utilizado por um longo período de tempo, caso não ocorra queda de qualidade. A implementação deste procedimento não é descrita explicitamente pelo padrão IEEE 802.15.4e conforme Guglielmo, Brienza e Anastasi, 2016. As redes DSME usam pacotes *beacons*, transmitidos em *broadcast*, para sincronizar todos os nós da rede. O padrão 802.15.4e define que um único canal deve ser utilizado para a transmissão dos pacotes de *beacons*, como também para as transmissões no período de acesso por contenção. Caso a qualidade do enlace entre o coordenador e um dado Nó final fique muito baixa para o canal utilizado para transmissão dos *beacons* (ex: um problema de desvanecimento profundo), o Nó final pode permanecer muito tempo desconectado. O uso de adaptação de canal pode ser uma boa solução para transmissão de pacotes de dados *unicast*, mas para transmissão de pacotes em *broadcast* o uso de apenas um canal pode apresentar problemas. Nesse último caso, o uso de salto em frequência pode ser uma solução para lidar com as variações espaciais na qualidade dos canais.

Capítulo 5

Conclusão

5.1 Considerações Finais

Foi possível avaliar e caracterizar o desempenho das comunicações, nos três experimentos realizados nas RSSFI instaladas em ambientes industriais ao ar livre.

Nos experimentos conduzidos na estação de injeção de água (Seção 4.2) algumas características relevantes dos canais sem fio foram descritas. Os dados gerados especificamente durante estes experimentos estão armazenados em local de acesso público e irrestrito através do seguinte endereço web <https://github.com/ruandg/ExpIWSNoutdoor>.

Nos experimentos realizados na estação de aquecimento solar (Seção 4.3) considerou-se um ambiente dinâmico, com movimentação determinística devido ao movimento previsível das calhas parabólicas em horários específicos do dia. Neste experimento observou-se a influência do movimento destas estruturas metálicas nas características dos 16 canais definidos pelo padrão IEEE 802.15.4, para diferentes posições dos nós finais. As análises realizadas para este ambiente indicam a importância do uso protocolos adaptativos para escolher os canais apropriados para cada enlace e lidar com as variações temporais nas características dos canais devido às modificações na topologia do ambiente ao longo do tempo.

Nos experimentos realizados na estação de carregamento de derivados (Seção 4.4) tratava-se de um ambiente dinâmico, com movimentação não determinística onde foram realizadas avaliações experimentais do uso de um LQE em uma RSSFI instalada em ambiente ao ar livre. A solução LQE usa um Nó dedicado para realizar a estimação da qualidade do enlace. A partir dos resultados, foi possível perceber que o Nó LQE conseguiu diferenciar

adequadamente as características dos diferentes canais, e foi reativo às variações temporais que ocorreram na qualidade do enlace devido à movimentação de caminhões no ambiente. Desta forma, seria uma alternativa realizar estimativas passivas da qualidade de enlace neste tipo de RSSFI. Usando as informações fornecidas pelo Nó LQE em tempo real, é possível realizar algumas ações para melhorar ou manter um determinado nível de QoS na rede e lidar com as variações temporais na qualidade do enlace.

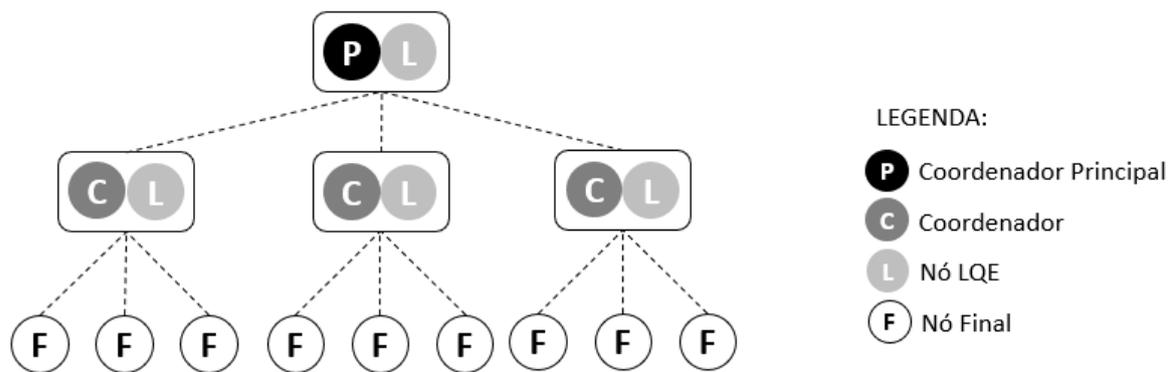
Em todos os experimentos, com base nas características do canal sem fio que foram observados, é possível indicar o projeto e implementação de mecanismos para configuração dinâmica da lista negra em protocolos que usam salto de frequências, para lidar com as variações na qualidade dos canais no decorrer do tempo. O uso de estimadores de qualidade de enlace para monitorar a qualidade dos enlaces continuamente podem ser úteis para melhorar a gerenciamento de lista negra. Outra alternativa é a adoção de mecanismos de adaptação de canais, nos quais os nós façam uso de apenas um canal para se comunicar, mas que este canal seja alterado sempre que a qualidade do mesmo esteja abaixo de um certo limite.

5.2 Trabalhos Futuros

No experimento na estação de carregamento de derivados de petróleo, a topologia de rede utilizada foi a estrela. Foram utilizados três nós na RSSFI, sendo um Nó coordenador principal com função de Nó coordenador e de Nó LQE, além de dois nós finais. Como trabalho futuro, um experimento com uma maior quantidade nós LQE, além de um número maior de nós finais poderia ser realizado usando uma rede com topologia em árvore, conforme a Figura 5.1. Outra melhoria no experimento seria a implementação das métricas adicionais descritas em Gomes et al., 2017. A implementação e avaliação experimental de mecanismos de adaptação integrados ao Nó LQE também poderiam ser alvo de trabalhos futuros.

Outra opção de trabalho futuro advém da consolidação da emenda IEEE 802.15.4g-2012 no padrão IEEE 802.15.4-2015, bem como o surgimento dos primeiros transceptores de rádio que dão suporte ao referido padrão e que estão disponíveis comercialmente, abrem oportunidades de novos trabalhos utilizando essas novas características de camada física da rede do padrão IEEE 802.15.4-2015. Assim, todos os ambientes industriais ao ar livre que foram estudados no presente trabalho, poderiam ser alvo de novos experimentos de caracterização

Figura 5.1: RSSFI com topologia em árvore.



do enlace de rádio em múltiplos canais, utilizando as novas faixas de frequência disponibilizadas para transmissão de dados sem fio.

O padrão IEEE 802.15.4-2015 incluiu três novas camadas físicas voltadas para a rede de utilidade pública inteligente (*Smart Utility Network, SUN*), *SUN-Frequency Shift Keying (FSK)*, *SUN-Offset Quadrature Phase-Shift Keying (OQPSK)* e *SUN-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*. As modulações SUN-FSK e SUN-OQPSK são focadas em manter a compatibilidade com versões anteriores de padrões e transceptores disponíveis no mercado, enquanto a SUN-OFDM está focada em adicionar robustez e melhorar eficiência do uso do espectro da camada física. Os benefícios trazidos por SUN-OFDM são o uso de transmissões paralelas com sub-portadoras ortogonais, cada uma transportando uma pequena parte da informação usando uma modulação de banda estreita. Essa abordagem fornece melhor robustez contra a propagação de múltiplos caminhos e interferência externa, além de melhorar a eficiência do uso do espectro, pois os subcanais são espaçados de forma otimizada, permitindo a robustez da troca ou da taxa de dados, dependendo dos requisitos da aplicação (TUSET-PEIRÓ et al., 2019).

5.3 Publicações durante o Mestrado

- Artigo apresentado em congresso internacional em Portugal em janeiro de 2018:

Ruan Delgado Gomes, Emerson Brasil Gomes, Iguatemi Eduardo da Fonseca, Marcelo Sampaio de Alencar e Cesar Benavente-Peces. *Evaluation of Multi-Channel Communication for an Outdoor Industrial Wireless Sensor Network*. SENSORNETS - 7th In-

ternational Conference on Sensor Networks, Funchal, Madeira, Portugal. Proceedings of the 7th International Conference on Sensor Networks - Volume 1 - SENSORNETS. ISBN:978-989-758-284-4, páginas 60-66. DOI:10.5220/0006609200600066.

- Capítulo de livro aceito para publicação internacional em junho de 2018:

Ruan Delgado Gomes, Emerson Brasil Gomes, Iguatemi Eduardo da Fonseca, Marcelo Sampaio de Alencar e Cesar Benavente-Peces. *Multi-Channel Communication Analysis of Industrial Wireless Sensor Networks in Outdoor Environments*. Communications in Computer and Information Science. Editora: Springer. ISSN: 1865-0929.

- Artigo apresentado em congresso internacional na Espanha em junho de 2019:

Emerson Brasil Gomes, Ruan Delgado Gomes, Iguatemi Eduardo da Fonseca. *Evaluation of a Link Quality Estimator in an Outdoor WSN Using a Dedicated Node*. WoCCES 2019 - Workshop on Communications in Critical Embedded Systems - IEEE ISCC 2019 - Symposium on Computers and Communications, Barcelona, Espanha.

Bibliografia

AGRAWAL, P. et al. Long term channel characterization for energy efficient transmission in industrial environments. *IEEE Trans. Communications*, v. 62, n. 8, p. 3004–3014, 2014.

AL-NIDAWI, Y.; KEMP, A. H. Mobility aware framework for timeslotted channel hopping in IEEE 802.15. 4e sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 15, n. 12, p. 7112–7125, 2015.

AL-YAMI, A.; ABU-AL-SAUD, W.; ZIDOURI, A. Practical vs. simulated results of IEEE 802.15.4 physical layer. In: IEEE. *Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), 2015 6th International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 226–230.

ANCILLOTTI, E. et al. A reinforcement learning-based link quality estimation strategy for RPL and its impact on topology management. *Computer Communications*, Elsevier, v. 112, p. 1–13, 2017.

ANWAR, M.; XIA, Y.; ZHAN, Y. TDMA-based IEEE 802.15.4 for low-latency deterministic control applications. *IEEE Trans. Industrial Informatics*, v. 12, n. 1, p. 338–347, 2016.

ASWALE, S.; GHORPADE, V. R. Reliable and energy-aware routing in wireless multimedia sensor network. In: IEEE. *Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), 2017 International Conference on*. [S.l.], 2017. p. 1382–1387.

BACCOUR, N. et al. Radio link quality estimation in wireless sensor networks: A survey. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, ACM, v. 8, n. 4, p. 34, 2012.

BACCOUR, N. et al. Reliable link quality estimation in low-power wireless networks and its impact on tree-routing. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 27, p. 1–25, 2015.

BILGIN, B. E.; GUNGOR, V. C. On the performance of multi-channel wireless sensor networks in smart grid environments. In: IEEE. *Computer Communications and Networks (ICCCN), 2011 Proceedings of 20th International Conference on*. [S.l.], 2011. p. 1–6.

CHAVES, P. R.; BRANQUINHO, O. C.; CARVALHO, M. F. Criteria for the setting up of low cost wireless sensor networks in small and medium size manufacturing enterprises (a case study). In: IEEE. *Communications (LATINCOM), 2016 8th IEEE Latin-American Conference on*. [S.l.], 2016. p. 1–6.

CHEFFENA, M. Propagation channel characteristics of industrial wireless sensor networks [wireless corner]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, IEEE, v. 58, n. 1, p. 66–73, 2016.

- CHRISTIN, D.; MOGRE, P. S.; HOLLICK, M. Survey on wireless sensor network technologies for industrial automation: The security and quality of service perspectives. *Future Internet*, Molecular Diversity Preservation International, v. 2, n. 2, p. 96–125, 2010.
- DEB, M. et al. Designing a new link quality estimator for sensor nodes by combining available estimators. In: *2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 179–183. ISSN 2473-3571.
- DU, P.; ROUSSOS, G. Spectrum-aware wireless sensor networks. In: IEEE. *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium on*. [S.l.], 2013. p. 2321–2325.
- EHRlich, M.; WISNIEWSKI, L.; JASPERNEITE, J. State of the art and future applications of industrial wireless sensor networks. In: *Kommunikation und Bildverarbeitung in der Automation*. [S.l.]: Springer, 2018. p. 28–39.
- GAAFAR, M.; MESSIER, G. G. Petroleum refinery multiantenna propagation measurements. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, v. 15, p. 1365–1368, 2016.
- GOLDSMITH, A. *Wireless communications*. [S.l.]: Cambridge university press, 2005.
- GOMES, R. D. *Estimação de Qualidade de Enlace e Alocação Dinâmica de Canais em Redes de Sensores sem Fio Industriais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 7 2017.
- GOMES, R. D. et al. Comparison between channel hopping and channel adaptation for industrial wireless sensor networks. In: *SENSORNETS*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 87–98.
- GOMES, R. D.; FONSECA, I. E.; ALENCAR, M. S. Protocolos multicanais para redes de sensores sem fio industriais. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, v. 5, n. 2, p. 25–32, 2015.
- GOMES, R. D. et al. Real-time link quality estimation for industrial wireless sensor networks using dedicated nodes. In: . [S.l.]: Elsevier, 2017. v. 59, p. 116–133.
- GUGLIELMO, D. D.; BRIENZA, S.; ANASTASI, G. Ieee 802.15. 4e: A survey. *Computer Communications*, Elsevier, v. 88, p. 1–24, 2016.
- GUNATILAKA, D.; SHA, M.; LU, C. Impacts of channel selection on industrial wireless sensor-actuator networks. In: IEEE. *IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications*. [S.l.], 2017. p. 1–9.
- GUNGOR, V. C.; HANCKE, G. P. et al. Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, v. 56, n. 10, p. 4258–4265, 2009.
- GUNGOR, V. C.; LU, B.; HANCKE, G. P. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. *IEEE transactions on industrial electronics*, IEEE, v. 57, n. 10, p. 3557–3564, 2010.

- GÜRSU, M. et al. Reliable co-existence of 802.15. 4e tsch-based wsn and wi-fi in an aircraft cabin. In: IEEE. *Communications Workshops (ICC), 2016 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 663–668.
- GUTIERREZ, J. A. et al. Ieee 802.15. 4: a developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks. *IEEE network*, IEEE, v. 15, n. 5, p. 12–19, 2001.
- HERMETO, R. T. et al. Passive link quality estimation for accurate and stable parent selection in dense 6tisch networks.
- HUGHES, J. B. et al. A survey of link quality properties related to transmission power control protocols in wireless sensor networks. In: IEEE. *2017 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. [S.l.], 2017. p. 1–5.
- IEC62591. *Industrial networks - Wireless communication network and communication profiles - WirelessHART*. Geneva, Switzerland, 2016.
- IEC62601. *Industrial networks - Wireless communication network and communication profiles - WIA-PA*. Geneva, Switzerland, 2015.
- IEC62734. *Industrial networks – Wireless communication network and communication profiles – ISA 100.11a*. Geneva, Switzerland, 2014.
- IEEE802.15.4-2011. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. Piscataway Township, NJ, EUA, 2011.
- IEEE802.15.4-2015. *IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011)*. Piscataway Township, NJ, EUA: [s.n.], 2015.
- KOTSIOU, V. et al. Is local blacklisting relevant in slow channel hopping low-power wireless networks? In: IEEE. *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.], 2017. p. 1–6.
- KOTSIOU, V. et al. Label: Link-based adaptive blacklisting technique for 6tisch wireless industrial networks. In: ACM. *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. [S.l.], 2017. p. 25–33.
- KOTSIOU, V. et al. Blacklisting-based channel hopping approaches in low-power and lossy networks. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 57, n. 2, p. 48–53, 2019.
- LIANG, W. et al. Survey and experiments of wia-pa specification of industrial wireless network. *Wireless Communications and Mobile Computing*, Wiley Online Library, v. 11, n. 8, p. 1197–1212, 2011.
- LIU, T.; CERPA, A. E. Data-driven link quality prediction using link features. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, ACM, v. 10, n. 2, p. 37, 2014.
- LOWRANCE, C. J.; LAUF, A. P. Link quality estimation in ad hoc and mesh networks: A survey and future directions. *Wireless Personal Communications*, Springer, v. 96, n. 1, p. 475–508, 2017.

MESSIER, G. G.; WASSON, M. W.; HERRMANN, M. J. Petroleum refinery mesh network propagation measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 65, n. 10, p. 5645–5648, 2017.

MIKHAYLOV, K. et al. Wireless sensor networks in industrial environment: Real-life evaluation results. In: IEEE. *Future Internet Communications (BCFIC), 2012 2nd Baltic Congress on*. [S.l.], 2012. p. 1–7.

PATTI, G.; BELLO, L. L. A priority-aware multichannel adaptive framework for the IEEE 802.15. 4e-11dn. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 63, n. 10, p. 6360–6370, 2016.

PENGWON, K.; KOMOLMIS, T.; CHAMPRASERT, P. Solving asymmetric link problems in wsns using site link quality estimators and dual-tree topology. In: IEEE. *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2016 13th International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 1–4.

PÖTTNER, W.-B. et al. Wsn evaluation in industrial environments first results and lessons learned. In: IEEE. *Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS), 2011 International Conference on*. [S.l.], 2011. p. 1–8.

PRIYA, D. et al. An energy efficient link stability based routing scheme for wireless sensor networks. In: IEEE. *Communication and Signal Processing (ICCSP), 2017 International Conference on*. [S.l.], 2017. p. 1828–1832.

QUEIROZ, D. V. et al. Survey and systematic mapping of industrial wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, Elsevier, v. 97, p. 96–125, 2017.

REKIK, S. et al. Low-power link quality estimation in smart grid environments. In: IEEE. *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2015 International*. [S.l.], 2015. p. 1211–1216.

SANDOVAL, R. M. et al. Radio-channel characterization of smart grid substations in the 2.4-ghz ism band. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, IEEE, v. 16, n. 2, p. 1294–1307, 2017.

SAVAZZI, S.; GUARDIANO, S.; SPAGNOLINI, U. Wireless channel characterization and modeling in oil and gas refinery plants. In: IEEE. *Industrial Technology (ICIT), 2013 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2013. p. 1546–1551.

SHAMSI, M. *Wired versus wireless trade-offs: How to choose for new installations*. InTech Magazine, 2015. Disponível em: <https://www.isa.org/intech/20150204/>.

SHU, J. et al. Research on link quality estimation mechanism for wireless sensor networks based on support vector machine. *Chinese Journal of Electronics*, IET, v. 26, n. 2, p. 377–384, 2017.

SILVA, W. S. da et al. A multilayer link quality estimator for reliable machine-to-machine communication. In: IEEE. *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on*. [S.l.], 2017. p. 1–7.

SUN, W. et al. Wnn-lqe: Wavelet-neural-network-based link quality estimation for smart grid wsns. *IEEE Access*, IEEE, v. 5, p. 12788–12797, 2017.

TANGHE, E. et al. The industrial indoor channel: large-scale and temporal fading at 900, 2400, and 5200 mhz. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, IEEE, v. 7, n. 7, 2008.

TRAN, A. T.; MAI, D. D.; KIM, M. K. Link quality estimation in static wireless networks with high traffic load. *Journal of Communications and Networks*, IEEE, v. 17, n. 4, p. 370–383, 2015.

TUSET-PEIRÓ, P. et al. Experimental interference robustness evaluation of ieee 802.15. 4-2015 oqpsk-dsss and sun-ofdm physical layers. *arXiv preprint arXiv:1905.11102*, 2019.

WANG, Q.; JIANG, J. Comparative examination on architecture and protocol of industrial wireless sensor network standards. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 2197–2219, 2016.

ZAND, P. et al. Wireless industrial monitoring and control networks: The journey so far and the road ahead. *Journal of sensor and actuator networks*, Molecular Diversity Preservation International, v. 1, n. 2, p. 123–152, 2012.

ZHOU, A. et al. Slqe: an improved link quality estimation based on four-bit lqe. *Int. J. Future Gener. Commun. Network*, v. 8, n. 1, p. 149–160, 2015.

ZORBAS, D. et al. Lost: Localized blacklisting aware scheduling algorithm for ieee 802.15. 4-tsch networks. In: IEEE. *Wireless Days (WD), 2018*. [S.l.], 2018. p. 110–115.

ZORBAS, D.; PAPADOPOULOS, G. Z.; DOULIGERIS, C. Local or global radio channel blacklisting for ieee 802.15. 4-tsch networks? In: IEEE. *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.], 2018. p. 1–6.

Apêndice A

A.1 Fotos do Experimento em Estação de Injeção de Água

Figura A.1: Dr. Ruan D. Gomes (esquerda) e Dr. Iguatemi E. Fonseca (direita) na EIA.



Figura A.2: Visão do Nó 1 para o coordenador.



Figura A.3: Visão detrás do Nó 1 para o coordenador.



Figura A.4: Visão do Nó 1 próximo a instrumentos.

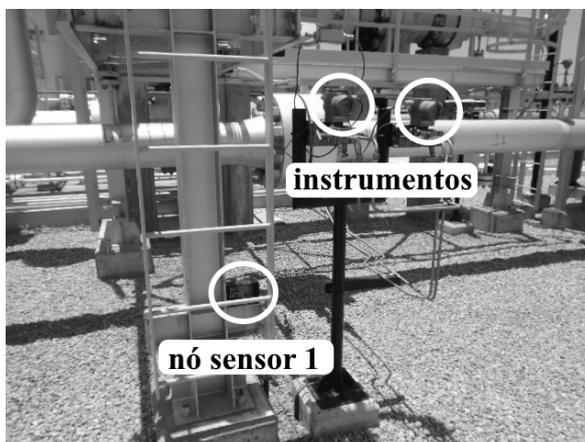


Figura A.5: Visão do Nó 2 para o coordenador.



Figura A.6: Visão detrás do Nó 2 para o coordenador.



Figura A.7: Visão do Nó 2 próximo a instrumentos.

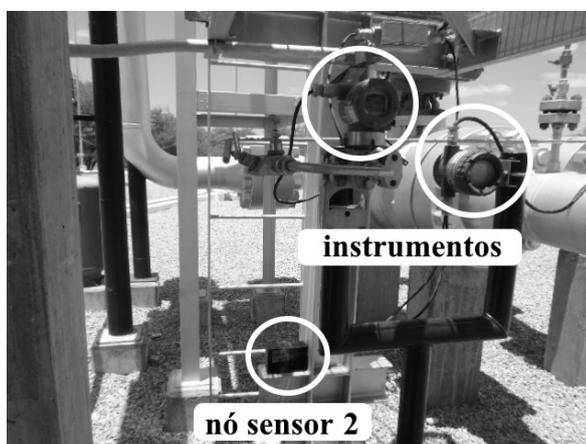


Figura A.8: Visão do Nó 3 para o coordenador.



Figura A.9: Visão detrás do Nó 3 para o coordenador.



Figura A.10: Visão do Nó 3 próximo a instrumentos.

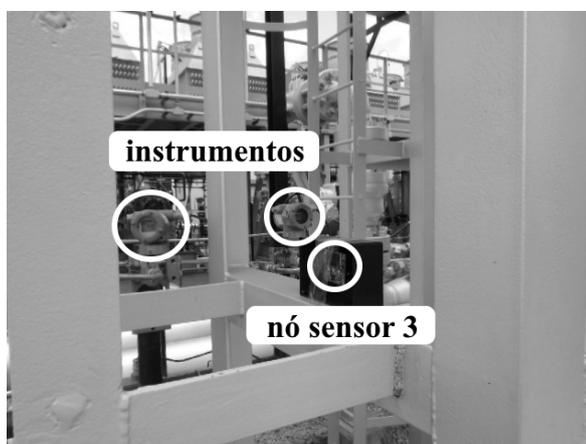


Figura A.11: Visão do Nó 4 para o coordenador.



Figura A.12: Visão detrás do Nó 4 para o coordenador.



Figura A.13: Visão do Nó 4 próximo a instrumentos.

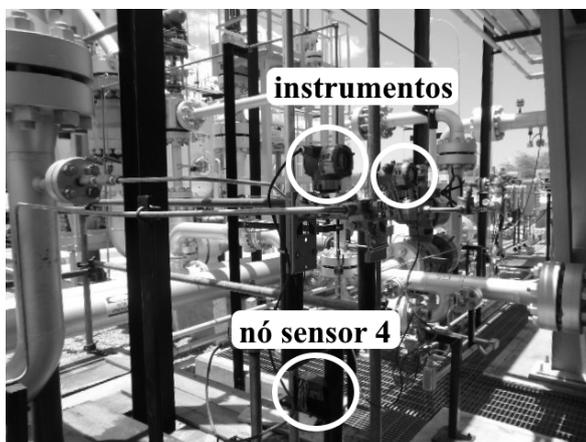


Figura A.14: Visão do Nó 5 para o coordenador.



Figura A.15: Visão detrás do Nó 5 para o coordenador.



Figura A.16: Visão do Nó 5 próximo a instrumentos.

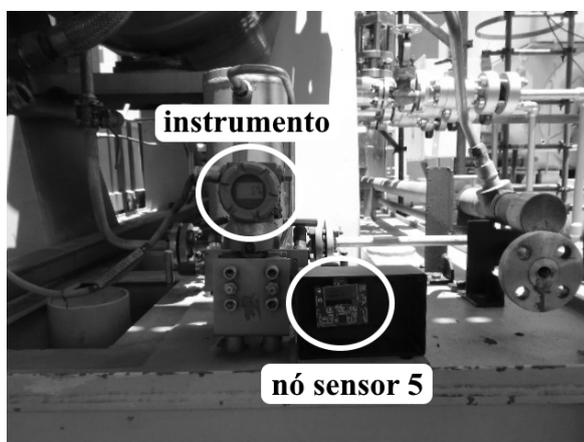


Figura A.17: Visão do Nó 6 para o coordenador.

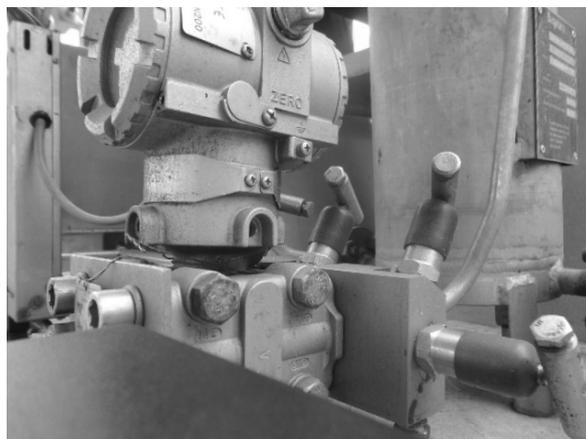


Figura A.18: Visão detrás do Nó 6 para o coordenador.



Figura A.19: Visão do Nó 6 próximo a instrumentos.

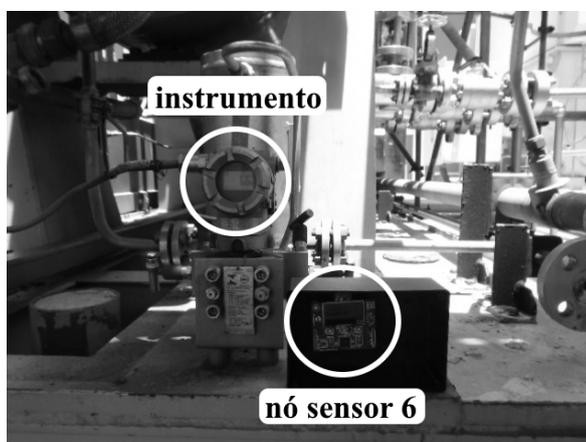


Figura A.20: Visão do Nó 7 para o coordenador.



Figura A.21: Visão detrás do Nó 7 para o coordenador.

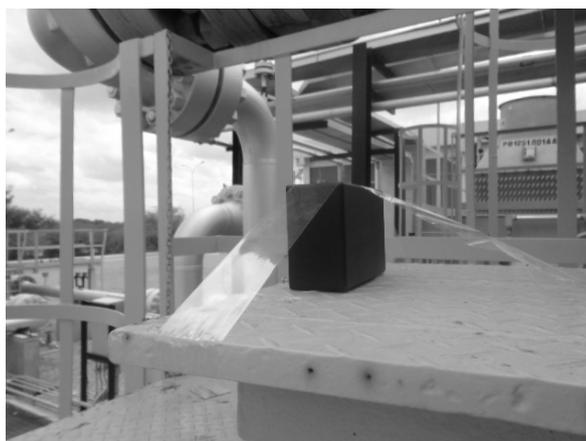


Figura A.22: Visão do Nó 7 próximo a instrumentos.



Figura A.23: Visão do Nó 8 para o coordenador.



Figura A.24: Visão detrás do Nó 8 para o coordenador.



Figura A.25: Visão do Nó 8 próximo a instrumentos.

