



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Tese de Doutorado

**Estimação de Qualidade de Enlace e Alocação
Dinâmica de Canais em Redes de Sensores
sem Fio Industriais**

Ruan Delgado Gomes

Campina Grande – PB
Junho – 2017

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Estimação de Qualidade de Enlace e Alocação Dinâmica de Canais em Redes de Sensores sem Fio Industriais

Ruan Delgado Gomes

Tese de Doutorado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como requisito necessário para obtenção do grau de Doutor em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletrônica e Telecomunicações

Marcelo Sampaio de Alencar
Orientador

Iguatemi Eduardo da Fonseca
Orientador

Campina Grande – PB, Brasil

©Ruan Delgado Gomes – ruan.gomes@ee.ufcg.edu.br

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

G633e Gomes, Ruan Delgado.
Estimação de qualidade de enlace e alocação dinâmica de canais em redes de sensores sem fio industriais / Ruan Delgado Gomes. – Campina Grande, 2017.
161 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2017.

"Orientação: Prof. Dr. Marcelo Sampaio de Alencar, Prof. Dr. Iguatemi Eduardo da Fonseca".

Referências.

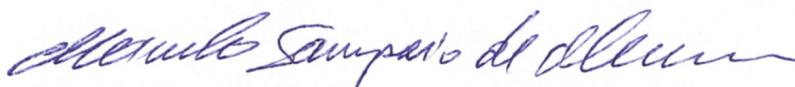
1. Redes de Sensores sem Fio Industriais. 2. Estimação de Qualidade de Enlace. 3. Protocolos Adaptativos. 4. Simulação de Redes de Sensores Sem Fio Industriais. I. Alencar, Marcelo Sampaio de. II. Fonseca, Iguatemi Eduardo da. III. Título.

CDU 621.39(043)

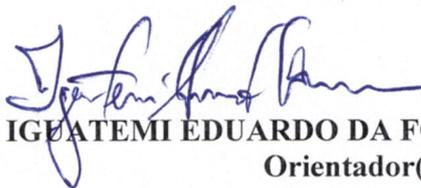
"Estimação de Qualidade de Enlace e Alocação Dinâmica de Canais em Redes de Sensores sem Fio Industriais"

RUAN DELGADO GOMES

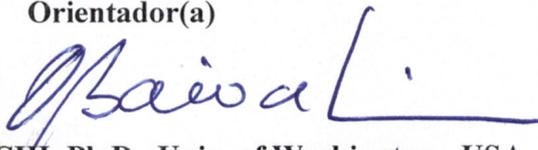
TESE APROVADA EM 14/06/2017



MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, Ph.D., UFCG
Orientador(a)



IGEATEMI EDUARDO DA FONSECA, Dr., UFPB
Orientador(a)

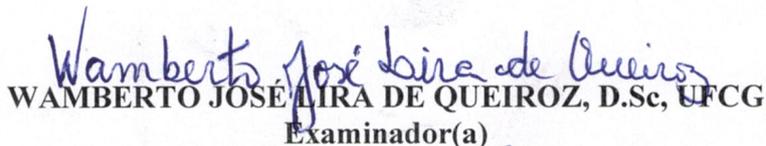


ORLANDO BAIOCCHI, Ph.D., Univ. of Washington - USA
Examinador(a)

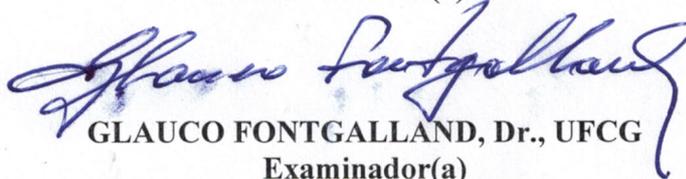
CÉSAR BENAVENTE-PECES, Ph.D., UPM - Madrid - Espanha
Examinador(a)



WASLON TERLLIZZIE ARAÚJO LOPES, D.Sc., UFPB
Examinador(a)



WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



GLAUCIO FONTGALLAND, Dr., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Agradecimentos

- Aos meus pais, Onildo Gomes e Silvano Delgado, e aos demais familiares pelo apoio;
- À minha amada esposa, Taísia Honório, por tudo! A lista de motivos para o agradecimento é muito grande e não cabe em uma página;
- Aos meus orientadores, Prof. Marcelo Sampaio de Alencar e Prof. Iguatemi Eduardo da Fonseca, pelo apoio, confiança e pelos conhecimentos valiosos que me foram transmitidos;
- Ao IFPB e ao povo brasileiro pela possibilidade de me dedicar exclusivamente aos estudos durante parte do doutorado;
- Ao IECOM e à Copele/UFCG;
- Aos alunos e amigos do IFPB-Campus Guarabira, em especial aos professores Otacílio Neto, Erick Melo e Cristiano Elias;
- Aos amigos do GPICEEMA-UFPB, em especial a Diógenes Silva e aos professores Abel Cavalcante Lima Filho, Francisco Antônio Belo e Marcéu Oliveira Adissi;
- Aos amigos do IECOM, em especial a Hélio Mesquita e aos professores Paulo Ribeiro, Wamberto Queiroz, Waslon Lopes e José Ewerton;
- Ao projeto Smart2 do programa Erasmus Mundus, ao Prof. Cesar Benavente-Peces e à Universidad Politécnica de Madrid;
- Aos professores Orlando Baiocchi e Glauco Fontgalland e aos outros membros da banca, já citados, pelas contribuições;
- A todos que contribuíram com esse trabalho, em especial a Gláucio Rocha, Diego Vêras e Emerson Gomes;
- A todos os professores e colegas que contribuíram com a minha formação em todos os meus anos de estudante;
- A todos os amigos que me deram alguma forma de apoio.

“Há um velho aforismo que diz: quanto mais agudamente e intransigentemente formulamos uma tese, mais irresistivelmente ela clama pela sua antítese.”

—O JOGO DAS CONTAS DE VIDRO (Hermann Hesse)

Resumo

O uso de Redes de Sensores sem Fio Industriais (RSSFIs) para implementar aplicações de monitoramento ou controle apresenta vantagens em comparação ao uso de redes cabeadas, como a maior flexibilidade e o menor custo de implantação. No entanto, é necessário lidar com problemas típicos das redes sem fio, como interferência e o alto nível de atenuação em pequena e larga escala. Além disso, as características do canal sem fio variam com o tempo e uma RSSFI deve ser capaz de se adaptar a essas variações para manter boa qualidade de serviço durante sua operação. Estratégias adaptativas, como a alocação dinâmica de canais, permitem lidar com os problemas mencionados. Para isso, o primeiro passo é estimar a qualidade dos enlaces, de modo que os nós da rede possam decidir se uma mudança de canal é necessária. Esta tese apresenta como contribuição um novo estimador de qualidade de enlace (LQE) e um novo tipo de nó, o nó LQE, que estima a qualidade dos enlaces em tempo real, usando informações obtidas a partir do transceptor, e informações extraídas de pacotes de dados recebidos. O estimador proposto considera problemas causados pelo perfil de multipercorso do ambiente na qualidade do canal, interferência e assimetria. Um protótipo foi desenvolvido e a solução foi validada por meio de experimentos em um ambiente industrial real. Diferente de outros LQEs encontrados na literatura, a solução proposta não gera tráfego extra na rede e não causa sobrecarga nos nós finais. Com base no LQE proposto, um novo protocolo de acesso ao meio foi desenvolvido. O protocolo usa adaptação de canal para a transmissão de pacotes de dados e salto em frequência para a transmissão de pacotes em *broadcast*. A taxa de recepção de pacote média na camada de aplicação permaneceu perto do pico para todos os cenários avaliados com o protocolo proposto, mesmo considerando as variações na qualidade dos canais ao longo do tempo. Os resultados indicam que o protocolo proposto apresenta desempenho superior aos protocolos de acesso ao meio definidos pelos padrões para RSSFI, em termos de confiabilidade e determinismo. Vários resultados experimentais obtidos em ambientes industriais também são descritos e é proposto um novo modelo para simulação de protocolos multicanaís. O modelo é capaz de capturar os efeitos de atenuação por multipercorso, somreamento, assimetria, as características não-estacionárias do canal sem fio e a decorrelação entre diferentes canais.

Palavras-chave: Redes de sensores sem fio industriais, estimação de qualidade de enlace, protocolos adaptativos, simulação de redes de sensores sem fio industriais.

Abstract

Industrial Wireless Sensor Networks (IWSNs), that is used to implement monitoring and control applications, presents certain advantages when compared to wired networks, including higher flexibility and lower deployment costs. However, it is necessary to deal with typical problems of wireless networks, such as interference and a high attenuation, in small and large scale. In addition, the characteristics of the wireless channel may change over time, and an IWSN needs to self adapt to these variations to maintain a good quality of service during its operation. Adaptive mechanisms, such as, dynamic channel allocation, are used to deal with the aforementioned problems. For this, the first step is to estimate the link quality, so that the network nodes can decide if a channel change is needed. This thesis presents as a contribution a novel Link Quality Estimator (LQE), and a new type of node, the LQE node, that estimates the quality of the links in real-time, using information obtained from the transceiver, and information obtained from received data packets. The proposed LQE deals with the problems caused by the multipath profile of the environment in channel quality, interference and asymmetry. A prototype was developed and the LQE was validated by experiments in an actual industrial environment. Different from other LQEs in the literature, the solution proposed in this thesis does not cause overhead at the end-nodes and on the network. Based on the proposed LQE, a novel MAC protocol was developed. The protocol uses channel adaptation for the transmission of unicast data packets, and frequency hopping for the transmission of broadcast packets. The packet reception rate at the application layer was at the peak for all scenarios that were evaluated using the proposed protocol, even considering the variations in channel quality over time. The results indicate that the proposed protocol presents a better performance in comparison to the MAC protocols defined by the standards for IWSN, in terms of reliability and determinism. Several experimental results obtained in industrial environments are also described, and a new model for simulation of multi-channel protocols is proposed. The model includes the effects of multipath fading, shadowing, asymmetry, the non-stationary characteristics of the channel, and the uncorrelation of the different channels.

Keywords: Industrial wireless sensor networks, link quality estimation, adaptive protocols, simulation of industrial wireless sensor networks.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Principais Contribuições	5
1.2	Organização do Texto	6
2	Redes de Sensores sem Fio Industriais	7
2.1	Aplicações de Redes de Sensores sem Fio Industriais	8
2.2	Padrões para Redes de Sensores sem Fio Industriais	12
2.2.1	Padrão IEEE 802.15.4	12
2.2.2	WirelessHart	16
2.2.3	ISA100.11a	17
2.2.4	Padrão IEEE 802.15.4e	18
2.3	Conclusões do Capítulo	26
3	Desafios Para a Implantação de Redes de Sensores sem Fio Industriais	28
3.1	Ruído e Interferência Eletromagnética em RSSF	28
3.1.1	Estudos Experimentais para Avaliação do Ruído e Influência das Fontes de Interferência no Desempenho de RSSFs	30
3.2	Caracterização do Canal sem Fio em Ambientes Industriais	31
3.2.1	Perda de Percurso em Larga Escala	31
3.2.2	Atenuação em Pequena Escala e Multipercurso	34
3.2.3	Modelagem do Desvanecimento e Atenuação para Longos Períodos de Tempo	35
3.2.4	Perfil de Atraso de Potência e Largura de Banda de Coerência	38
3.3	Avaliação da Comunicação Multicanal em um Ambiente Industrial <i>Outdoor</i>	42
3.3.1	Metodologia do Experimento	42
3.3.2	Resultados	45
3.4	Conclusões do Capítulo	50
4	Protocolos Multicanais e Estimação de Qualidade de Enlace em RSSF	51
4.1	Arquiteturas de RSSFs Multicanais	51

4.2	Classificação de Protocolos Multicanais	53
4.2.1	Protocolos Estáticos	54
4.2.2	Protocolos Dinâmicos	54
4.2.3	Protocolos Semidinâmicos	56
4.3	Estimação de Qualidade de Enlace para RSSF	57
4.3.1	Estimadores de Qualidade de Enlace Baseados em <i>Hardware</i>	58
4.3.2	Estimadores de Qualidade de Enlace Baseados em <i>Software</i>	59
4.4	Conclusões do Capítulo	65
5	Modelo para Simulação de Protocolos Multicanais em Redes de Sensores sem Fio Industriais	66
5.1	Modelo de Simulação para o Desvanecimento em Longos Períodos de Tempo	67
5.2	Avaliação de Estimadores de Qualidade de Enlace	71
5.2.1	Parâmetros da Simulação	72
5.2.2	Resultados	73
5.3	Conclusões do Capítulo	77
6	Estimação de Qualidade de Enlace em Tempo Real Utilizando Nós Dedicados	78
6.1	O Nó LQE	78
6.1.1	Projeto e Implementação do Nó LQE	80
6.2	O Estimador de Qualidade de Enlace	82
6.2.1	Estimação da Qualidade do Sentido Direto do Enlace	83
6.2.2	Estimação da Influência de Fontes de Interferência	92
6.2.3	Estimação da Qualidade do Enlace no Sentido Inverso	95
6.3	Validação	97
6.3.1	Caracterização do Ambiente Industrial	97
6.3.2	Validação do Estimador	98
6.4	Conclusões do Capítulo	103
7	Protocolo Adaptativo Multicanal Baseado em <i>Beacons</i>	105
7.1	Trabalhos Relacionados	106
7.2	Descrição do Protocolo ABMP	110
7.2.1	Operação dos Coordenadores	113
7.2.2	Operação do Nó Final	115
7.2.3	Operação do nó LQE	117
7.3	Resultados	118
7.3.1	Protocolos Avaliados	118
7.3.2	Avaliação Teórica de Desempenho	123
7.3.3	Resultados das Simulações	127
7.4	Conclusões do Capítulo	143

8	Considerações Finais e Perspectivas de Trabalhos Futuros	144
8.1	Propostas de Trabalhos Futuros	146
8.2	Lista de Publicações	146
	Referências Bibliográficas	149

Lista de Figuras

2.1	Tipos de aplicações de RSSFI (adaptado de [30]).	9
2.2	Topologias suportadas pelo Padrão IEEE 802.15.4.	14
2.3	Exemplo de <i>slotframe</i> com oito intervalos de tempo para uma rede TSCH.	20
2.4	Exemplo de uma estrutura de <i>superframe</i> para uma rede DSME.	22
2.5	Mecanismos de diversidade de canal definidos para redes DSME.	23
3.1	Canais definidos pelos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11 na banda de 2,4 GHz.	29
3.2	Potência de recepção para $P_T = 0$ dBm.	33
3.3	Potência de recepção para $P_T = 15$ dBm.	33
3.4	Comportamento não estacionário do canal em ambiente industrial.	36
3.5	Indústria onde os experimentos foram realizados.	36
3.6	Comportamento não estacionário do canal em ambiente industrial para um período de 30 min.	37
3.7	Resultado experimental com canais descorrelacionados.	40
3.8	Ambiente onde os experimentos foram realizados.	41
3.9	Potência recebida obtida nos experimentos utilizando diferentes canais.	41
3.10	Ambiente onde o experimento foi realizado.	43
3.11	Esquemático do ambiente.	43
3.12	Nós sensores instalados na unidade industrial.	44
3.13	Estrutura de <i>slotframe</i> do protocolo implementado.	44
3.14	Variações espaciais na qualidade dos canais para diferentes nós, no primeiro dia de experimentos.	46
3.15	Resultados comparativos entre os dois dias de experimento.	48
3.16	Mudança abrupta nas características do canal.	48
3.17	Relação entre a perda de percurso e a distância entre transmissor e receptor.	49
4.1	Arquitetura baseada em topologia estrela.	52
4.2	Arquitetura em três camadas.	53
5.1	Diagrama de transição de estados de uma cadeia de Markov com dois estados.	68

5.2	Assimetria no enlace e variações temporais nas potências de recepção nos dois sentidos do enlace.	71
5.3	Potência recebida para diferentes canais.	71
5.4	Gráficos na parte de cima - qualidade do enlace durante 42 minutos para o Cenário 1. Gráficos na parte de baixo - TRPR e potência recebida para as duas direções do enlace durante 42 minutos.	74
5.5	Gráficos na parte de cima - qualidade do enlace durante 34 minutos para o Cenário 1. Gráficos na parte de baixo - TRPR e potência recebida para as duas direções do enlace durante 34 minutos.	74
5.6	Gráficos na parte de cima - qualidade do enlace durante 32 minutos para o Cenário 2. Gráficos na parte de baixo - TRPR e potência recebida para as duas direções do enlace durante 32 minutos.	75
5.7	Gráficos na parte de cima - qualidade do enlace durante 35 minutos para o Cenário 2. Gráficos na parte de baixo - TRPR e potência recebida para as duas direções do enlace durante 35 minutos.	76
6.1	Uma topologia em árvore de três camadas para uma RSSFI, utilizando nós LQE.	80
6.2	Diagrama de blocos do nó LQE e o protótipo desenvolvido para realizar os experimentos.	81
6.3	Potência recebida no nó da RSSF e no nó LQE.	82
6.4	Ambiente onde os experimentos foram realizados para o Cenário 1.	84
6.5	Ambiente onde os experimentos foram realizados para o Cenário 2.	84
6.6	(a) Relação entre R_{avg} e TRP, usando RSSI. (b) Relação entre d_{avg} e TRP, usando RSSI.	85
6.7	(a) Relação entre R_{avg} e TRP, usando LQI. (b) Relação entre d_{avg} e TRP, usando LQI.	86
6.8	(a) Validação dos valores obtidos a partir do modelo baseado em RNA e do modelo polinomial (MP). (b) Valores fornecidos pelos modelos para todos os valores possíveis de R_{avg}	88
6.9	Valores obtidos a partir do modelo polinomial para diferentes taxas de transmissão de pacote.	91
6.10	Interferência nos canais 13, 17 e 23.	93
6.11	Disponibilidade do canal para nove canais diferente.	94
6.12	(a) Relação entre N_r e TRP. (b) Validação dos valores obtidos a partir do modelo.	96
6.13	Relação entre a perda de percurso e a distância entre transmissor e receptor. . .	97
6.14	Transmissores na planta industrial.	98
6.15	Resultados para o Canal 20, durante 30 minutos.	100
6.16	Resultados para o Canal 16, durante 60 minutos.	100
6.17	Análise das métricas individualmente.	102

7.1	Um exemplo de uma rede ABMP com topologia em árvore.	110
7.2	Estrutura de tempo (<i>multi-slotframe</i>) definida pelo ABMP.	111
7.3	Um exemplo de <i>slotframe</i> para uma rede com topologia em árvore.	114
7.4	Campos do pacote <i>beacon</i> no ABMP.	114
7.5	Diagrama de atividades da operação do protocolo no nó final.	116
7.6	A estrutura temporal utilizada nas simulações para os protocolos baseados em DSME.	119
7.7	Exemplo de <i>slotframe</i> com oito intervalos de tempo para uma rede TSCH.	122
7.8	Probabilidade de sucesso em uma transmissão de pacote de dados.	125
7.9	Probabilidade de sucesso na transmissão de um pacote de dados para diferentes valores de a e k	126
7.10	(a) Taxa de recepção de pacote na camada MAC. (b) Taxa de recepção de pacote na camada de aplicação. (c) Número requerido de transmissões de pacote.	129
7.11	Função de distribuição cumulativa empírica (a) e histograma (b) do atraso para uma rede com 16 nós finais e topologia em estrela.	131
7.12	Intervalo de tempo entre a recepção de dois pacotes para uma rede com 16 nós finais e topologia em estrela.	132
7.13	TRP na camada de aplicação para uma rede com 16 nós finais e topologia em estrela.	133
7.14	Potência recebida, TRP na camada de aplicação e valor fornecido pelo estimador (LQE) para o nó final 14.	134
7.15	Estrutura do <i>slotframe</i> para a rede com dois coordenadores intermediários e oito nós finais por sub-rede.	137
7.16	(a) Taxa de recepção de pacote na camada MAC. (b) Taxa de recepção de pacote na camada de aplicação. (c) Número requerido de transmissões de pacote.	138
7.17	Função de distribuição cumulativa empírica (a) e o histograma (b) do atraso para redes com topologia em árvore.	138
7.18	Intervalo de tempo entre a recepção de dois pacotes para redes com topologia em árvore.	139
7.19	TRP na camada de aplicação para uma rede com 48 nós finais e quatro coordenadores.	140
7.20	(a) Número médio de transmissões por nó. (b) Número médio de intervalos ativos para recepção de pacotes por nó.	141

Lista de Tabelas

2.1	Classes de aplicações industriais.	9
2.2	Informações sobre a camada física definida pelo IEEE 802.15.4.	13
3.1	Parâmetros do modelo de perda de percurso log-distância [6].	32
3.2	Parâmetros do modelo de sombreamento log-normal.	49
5.1	Definição dos parâmetros do canal sem fio no <i>script</i> de simulação do Castalia.	69
5.2	Parâmetros usados na simulação.	70
5.3	Parâmetros usados na simulação.	72
6.1	Correlação entre P_f e a TRP para cada modelo.	88
6.2	Correlação entre P_f e TRP para cada TTP, usando o modelo polinomial, considerando todos os cenários.	91
6.3	Correlação entre P_f e TRP para cada TTP, usando o modelo polinomial, considerando apenas o Cenário 2.	91
6.4	Parâmetros para o modelo de sombreamento log-normal do ambiente industrial onde os experimentos foram realizados.	98
6.5	Correlação entre os valores fornecidos pelos estimadores avaliados e a TRPR medida.	101
7.1	Parâmetros usados para configurar o <i>multi-superframe</i> dos protocolos baseados em DSME.	120
7.2	Parâmetros utilizados nas simulações.	128
7.3	Tempo máximo de desconexão de um nó para uma rede em estrela com 16 nós finais.	132
7.4	Parâmetros usados para configurar a estrutura de <i>slotframe</i> dos protocolos.	136
7.5	Tempo máximo de desconexão de um nó para redes com topologia em árvore.	140

Lista de Siglas

ABMP – Protocolo Adaptativo Multi-Canal Baseado em *Beacons* (*Adaptive and Beacon-based Multi-Channel Protocol*)

ACD – Diversidade de Canal Adaptativa (*Adaptive Channel Diversity*)

ACK – Pacote de Reconhecimento

ADC – Alocação Dinâmica de Canais

AMCA – *Asynchronous Multi-Channel Adaptation*

APD – Distribuição de Probabilidade de Amplitude

ASL – Assimetria

BAN – Redes de Área Corporal (*Body Area Networks*)

BC – Canal de Reserva (*Backup Channel*)

BI – Intervalo de *Beacon*

BLINK – *Radio Frequency Identification Blink*

BPSK – Chaveamento por Deslocamento de Fase Binário

CAP – Período de Acesso por Contenção

CC – Canal de Comunicação

CFP – Período de Livre de Contenção

CH – Líder de Grupo (*Cluster Head*)

CP – Coordenador Principal

CSMA/CA – Acesso Múltiplo com Sensoriamento da Portadora e Prevenção de Colisão

CTP – *Collection Tree Protocol*

DSME – *Deterministic and Synchronous Multi-Channel Extension*

EB – *Enhanced Beacon*

ETX – *Expected Transmission Count*

EWMA – Média Móvel Exponencialmente Ponderada

FB – *Four-Bit*

FCP – Função Cumulativa de Probabilidade

FEC – Correção Antecipada de Erros (*Forward Error Correction*)

FFD – *Full Function Device*

GACK – Reconhecimento de Pacotes em Grupo

GTS – Intervalo de Tempo Garantido

ISA – Sociedade Internacional de Automação
ISM – Industriais, Científicas e Médicas
LLDN – *Low Latency Deterministic Network*
LPED – *Lightweight Packet Error Discriminator*
LQE – Estimador de Qualidade de Enlace (*Link Quality Estimator*)
LQI – Indicação da Qualidade do *Link*
MAC – Controle de Acesso ao Meio
MP – Modelo Polinomial
O-QPSK – *Offset Quadrature Phase Shift Keying*
PCB – Placa de Circuito Impresso
QoS – Qualidade de Serviço
RBCA – *Received-Based Channel Assignment*
RFD – *Reduced Function Device*
RNA – Rede Neural Artificial
RNP – Número Requerido de Transmissões de Pacote
RPL – *IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*
RSSFI – Rede de Sensores sem Fio Industriais
RSSF – Rede de Sensores sem Fio
RSSI – Indicação da Intensidade do Sinal Recebido
SF – Estabilidade
SNR – Relação Sinal-Ruído
SPI – *Serial Peripheral Interface*
SPRR – Taxa de Entrega de Pacote Suavizada
SRNP – RNP Suavizado
TDMA – Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo
TMCP – *Tree-Based Multi-Channel Protocol*
TPP – Taxa de Perda de Pacote
TRP – Taxa de Recepção de Pacote
TRPR – Taxa de Recepção de Pacote Real
TSCH – *Time Slotted Channel Hopping*
TTP – Taxa de Transmissão de Pacote
WBUST – *Wireless Budget Sharing Token*
WFTT – *Wireless Flexible Time Triggered*

CAPÍTULO 1

Introdução

Tradicionalmente, os sistemas de monitoramento industrial trabalham de forma *offline* ou fazem uso de redes cabeadas para transmissão das informações até uma central de monitoramento. Em sistemas de monitoramento baseados em redes cabeadas, o processo de instalação dos cabos e sensores possui usualmente um custo muito mais alto que os próprios sensores [1]. Além disso, essa abordagem apresenta pouca flexibilidade, o que dificulta o processo de instalação e manutenção da rede.

Uma alternativa para a construção de sistemas de monitoramento e controle em ambientes industriais é a utilização de redes sem fio, que apresentam significativas vantagens, incluindo maior flexibilidade, baixo custo e facilidade de instalação e manutenção [2]. Mais especificamente, as Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) apresentam ainda outras vantagens, como a capacidade de auto-organização e processamento local e aparecem como uma plataforma promissora para a implementação de sistemas *online* e remotos de monitoramento e controle em ambientes industriais.

As RSSFs são formadas por nós equipados com sensores ou atuadores e capacidade de comunicação via radiofrequência. Os nós podem ainda ter capacidade de processamento, o que permite a inserção de inteligência nos dispositivos, possibilitando melhorar a utilização do canal de comunicação [3]. Os nós sensores têm restrições de recursos, possuindo usualmente baixo poder de processamento e em alguns casos há também restrições de consumo de energia [4].

Em uma RSSF Industrial (RSSFI), sensores são implantados em equipamentos industriais para monitorar parâmetros críticos, como vibração, temperatura e pressão [5]. As medidas obtidas pelos sensores são transmitidas sem fio até um nó sorvedouro, que provê as informações para análise em uma central de monitoramento ou para utilização em sistemas de controle. Baseado nessas informações, é possível otimizar os processos industriais e reparar ou substituir equipamentos antes que ocorram prejuízos maiores devido a falhas nesses equipamentos [2].

A utilização de RSSFI para construção de sistemas de monitoramento e controle apresenta desafios que devem ser enfrentados. As redes sem fio utilizam um meio de comunicação inerentemente não confiável, o que pode ser agravado devido a ruídos e interferências na faixa de

espectro utilizada para comunicação, além de problemas devidos à atenuação por multipercurso e sombreamento. A falta de confiabilidade nas redes sem fio torna difícil a definição de garantias de qualidade de serviço (QoS). Além disso, os nós sensores devem ter baixo custo, o que pode resultar em um conjunto de restrições, como a baixa taxa de transmissão disponível e a baixa capacidade de processamento. Por exemplo, a camada física do Padrão IEEE 802.15.4, que é utilizada pela maioria dos padrões para RSSFI, apresenta uma taxa de transferência nominal de apenas 250 *kbit/s*.

Diferentes tipos de fontes de interferência podem ser encontradas em ambientes industriais, como equipamentos de solda, fornos micro-ondas e outros equipamentos de comunicação sem fio, como redes locais sem fio e redes *Bluetooth*. Além disso, em ambientes industriais comumente existem muitas máquinas e objetos (em muitos casos construídos com materiais metálicos), o que provoca um alto nível de atenuação nos sinais transmitidos, em larga escala e em pequena escala [6, 7]. Muitos ambientes industriais também apresentam características que tornam o canal sem fio não estacionário por longos períodos de tempo, o que provoca mudanças abruptas em suas características no decorrer do tempo [8]. Portanto, uma rede sem fio que apresenta bom nível de QoS no momento da implantação pode sofrer degradação de desempenho após algum tempo devido às mudanças que podem ocorrer nas características do canal sem fio.

Outro problema que pode afetar o desempenho das redes sem fio é a assimetria de enlace, que é a diferença entre a qualidade do canal sem fio nos dois sentidos da comunicação entre dois nós [9]. Em uma RSSF geralmente a maioria dos pacotes é transmitida em um sentido, do nó final até o nó sorvedouro. No entanto, muitos protocolos utilizam reconhecimento de pacotes ou transmissão de pacotes de controle. Nesses casos é importante garantir que o enlace possua boa qualidade nos dois sentidos. Dessa forma, do ponto de vista da comunicação entre dois nós específicos, o enlace apresenta boa qualidade quando o canal sem fio possui boa qualidade nos dois sentidos e quando há grande disponibilidade; ou seja, o canal utilizado não sofre com problemas de interferência externa ou interna à rede (a partir de outros nós da mesma RSSF).

Para lidar com essas limitações, mecanismos que permitam à RSSF se adaptar às variações que ocorrem na qualidade dos enlaces no decorrer do tempo devem ser implementados, como por exemplo roteamento adaptativo [10] ou Alocação Dinâmica de Canais (ADC) [11]. Mecanismos para ADC podem ser utilizados para melhorar a QoS de RSSFs que operam em ambientes industriais, por meio da identificação e utilização de canais que sofrem menos com interferência e problemas de atenuação por multipercurso e sombreamento. Mesmo para padrões que usam salto de frequência, como o WirelessHART e o ISA100.11a [12, 13], o uso de mecanismos de ADC pode ser vantajoso para configurar corretamente e de forma dinâmica a lista de canais não considerados no mecanismo de salto em frequência (lista negra).

O primeiro passo para realizar ADC é estimar a qualidade dos enlaces, de modo que os nós da rede possam decidir se uma troca de canal é necessária e o melhor canal a ser utilizado. Resultados obtidos por meio de experimentos em ambientes industriais [11, 14] mostraram que mesmo em cenários sem fontes de interferência, trocar o canal pode melhorar a qualidade de

comunicação em alguns casos devido ao perfil de multipercurso do ambiente, uma vez que os canais são descorrelacionados em frequência e o impacto do multipercurso é diferente em canais diferentes.

Alguns padrões têm sido propostos nos últimos anos com foco em aplicações industriais, como o WirelessHART e o ISA100.11a. Estes dois padrões são baseados apenas na camada física do IEEE 802.15.4, mas apresentam diferentes definições para a camada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC). Em vez de utilizar acesso múltiplo com sensoriamento da portadora e prevenção de colisão (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* – CSMA/CA), como definido no Padrão IEEE 802.15.4, os protocolos da camada MAC destes padrões são baseados em acesso múltiplo por divisão no tempo (*Time Division Multiple Access* – TDMA). Por meio da utilização de TDMA, colisões são evitadas e o consumo de energia pode ser otimizado, uma vez que os nós podem desligar o transceptor durante os intervalos de tempo em que não estão transmitindo ou recebendo pacotes. Esses padrões também usam salto em frequência e lista negra para mitigar os problemas relacionados à interferência e atenuação por multipercurso. No entanto, sem um gerenciamento adequado da lista negra, o desempenho pode ser baixo para redes que utilizam esses padrões [15].

Mais recentemente, em 2012, o Padrão IEEE 802.15.4e foi lançado [16]. O objetivo desse padrão é propor soluções para aplicações que requerem alta confiabilidade, como aplicações industriais [17]. Cinco modos de operação são definidos para o IEEE 802.15.4e. Em geral, esses modos de operação são baseados em TDMA ou salto em frequência para reduzir colisões e mitigar os efeitos de interferência e atenuação por multipercurso, permitindo satisfazer os requisitos de aplicações industriais em termos de confiabilidade e determinismo.

Uma das principais diferenças entre o novo Padrão IEEE 802.15.4e, em comparação com o padrão anterior, é o uso de múltiplos canais. É possível utilizar salto em frequência em alguns modos ou adaptação de canal, em que um nó permanece utilizando um único canal e apenas troca de canal quando o canal em uso passa a apresentar baixa qualidade. Para os modos que utilizam salto em frequência também é possível utilizar lista negra, assim como nos padrões WirelessHART e ISA100.11a. No entanto, a implementação dos mecanismos para monitoramento da qualidade dos enlaces para o uso do mecanismo de adaptação de canal, bem como a forma como o gerenciamento da lista negra deve ocorrer não são definidos pelo padrão [17].

Embora esses novos protocolos definam mecanismos para lidar com os problemas de confiabilidade em uma RSSFI, alguns problemas ainda podem surgir. Por exemplo, ao usar salto em frequência, os nós geralmente alternam para um novo canal antes de cada transmissão. No entanto, sem um gerenciamento adequado da lista negra, o desempenho da rede pode ser significativamente degradado [18]. Problemas devido às variações espaciais na qualidade do canal também podem afetar o desempenho dos protocolos baseados em *beacons*, como é o caso de alguns protocolos definidos no Padrão IEEE 802.15.4e [19].

Nesta tese, uma nova arquitetura para RSSFI é proposta, que utiliza nós dedicados para monitorar a qualidade dos enlaces, denominados nós LQE (*Link Quality Estimation*). Utilizando os

nós LQE, métricas de camada física obtidas a partir dos transceptores, como a Indicação da Intensidade do Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indication* – RSSI), podem ser utilizadas de forma mais efetiva. Valores individuais de RSSI não são suficientes para estimar a qualidade do canal sem fio, mas com uma análise mais detalhada é possível identificar os problemas que afetam a qualidade do canal. Diferente de outros estimadores de qualidade de enlace descritos na literatura [20–24], o estimador proposto nesta tese não gera tráfego extra por meio do uso de pacotes de diagnóstico ou redundância nos pacotes de dados, nem executa processamento no transmissor. Essa abordagem permite realizar estimação em tempo real usando o nó LQE, que pode processar muitos valores de RSSI e informações obtidas de pacotes de dados recebidos, enquanto os outros nós da rede executam a aplicação principal, o que implica uma baixa sobrecarga.

Dois desafios principais são atacados para a implementação do nó LQE e do estimador de qualidade de enlace propostos nesta tese. O primeiro é o desenvolvimento de métricas para capturar diversos aspectos do canal sem fio que afetam a qualidade do enlace e sua dinamicidade, como a atenuação por multipercurso, sombreamento, interferência e assimetria de enlace. É necessário encontrar uma boa relação de compromisso entre a estabilidade e a reatividade, para permitir a estimação da qualidade dos enlaces de forma acurada, mesmo considerando as variações pequenas e rápidas na qualidade do canal sem fio devido ao multipercurso. Por outro lado, é necessário identificar rapidamente mudanças bruscas e persistentes na qualidade dos enlaces.

O segundo desafio é o projeto e a implementação de um estimador que permita monitorar, em tempo real, a qualidade de vários enlaces de forma simultânea, sem causar sobrecarga nos nós sensores ou na rede, principalmente nos nós finais, que possuem maiores restrições de recurso. Dessa forma, os modelos desenvolvidos para implementar o estimador de qualidade de enlace proposto usam apenas informações obtidas no lado do receptor, e nenhum tráfego extra é gerado na rede. Além disso, o estimador deve ter baixa complexidade computacional, de modo que possa ser executado em micro-controladores de baixo custo. Mesmo considerando essas restrições, o estimador deve ser capaz de avaliar a qualidade dos enlaces nas duas direções e identificar problemas de interferência.

Outra contribuição deste trabalho é a proposição de um novo protocolo de camada MAC, denominado Protocolo Adaptativo Multicanal Baseado em *Beacons* (*Adaptive and Beacon-based Multi-Channel Protocol* – ABMP), que utiliza a nova arquitetura de RSSFI descrita nesta tese. O uso de nós dedicados e de um estimador que não causa sobrecarga nos nós sensores e nem na rede é essencial para implementação de protocolos baseados em TDMA e adaptação de canal, como no caso do novo protocolo proposto. A sobrecarga para realização da estimação de qualidade dos enlaces em tempo real pode ser proibitiva, uma vez que os intervalos de tempo possuem tamanho relativamente pequeno, suficiente apenas para realização da transmissão de um pacote e, em alguns casos, para recepção do pacote de reconhecimento correspondente. Nos protocolos que usam salto em frequência também deve haver tempo suficiente para realizar a troca de canal. Dessa forma, é inviável realizar estimativa de qualidade de enlace em tempo

real, a menos que intervalos de tempo sejam dedicados apenas para esse fim, o que pode provocar uma grande sobrecarga, aumentando a latência para a entrega dos pacotes. Dessa forma, o uso de nós dedicados é uma possível solução para realizar estimação de qualidade de enlace em tempo real nesse tipo de rede.

O ABMP utiliza tanto salto em frequência como adaptação de canal. Salto em frequência é utilizado para transmissão de pacotes em *broadcast* (os *beacons*), que são usados para sincronizar os nós finais da rede. Isso é feito para lidar com as variações espaciais na qualidade dos canais, uma vez que pode ser difícil escolher um único canal que apresente boa qualidade para todos os enlaces. Além disso, a lista de canais utilizados para transmitir os pacotes em *broadcast* é configurada dinamicamente para evitar o uso de canais que apresentam uma baixa qualidade para um número significativo de nós.

Para a transmissão de pacotes de dados *unicast* é utilizado um mecanismo de adaptação de canal, em que os canais são selecionados com base nas características dos enlaces específicos entre os nós finais e os seus receptores. Embora o ABMP seja um protocolo baseado em *beacons*, os nós finais não precisam receber todos os *beacons* para manter a comunicação. Com essa abordagem, o desempenho da rede é menos afetado por problemas na recepção dos *beacons*, em comparação com outros protocolos baseados em *beacons*, como os definidos pelos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.4e. Os resultados dos estudos realizados nesta tese indicam que o protocolo proposto apresenta desempenho superior aos protocolos de acesso ao meio definidos pelos novos padrões para RSSFI em termos de taxa de entrega de pacote, atraso e determinismo.

Os algoritmos e protocolos desenvolvidos nesta tese foram avaliados e comparados com outras abordagens por meio de simulações e estudos experimentais. Outra contribuição da tese é o desenvolvimento de um modelo de simulação para RSSFs industriais, que considera os efeitos de atenuação por multipercurso, sombreamento, as características não estacionárias do canal sem fio em longos períodos de tempo, a decorrelação entre diferentes canais e a assimetria dos enlaces.

1.1 Principais Contribuições

As principais contribuições desta tese são listadas a seguir:

- Realização de estudos experimentais para a caracterização do canal sem fio em ambientes industriais;
- Desenvolvimento de modelos para realizar a estimativa de qualidade de enlace, considerando as características do canal sem fio nas duas direções, e a influência de fontes de interferência externas, utilizando amostras de RSSI e informações obtidas a partir de pacotes de dados recebidos;

- Projeto, implementação e validação em ambiente industrial de um novo tipo de nó (nó LQE), e um novo estimador para estimação de qualidade de enlace em tempo real;
- Desenvolvimento de um modelo para simulação de protocolos multicanais para RSSFIs;
- Proposta de um novo protocolo de acesso ao meio, baseado no estimador de qualidade de enlace desenvolvido nesta tese, que utiliza salto em frequência para pacotes transmitidos em *broadcast* e adaptação de canal para a transmissão dos pacotes de dados *unicast*;
- Avaliação do protocolo proposto e comparação com protocolos empregados nos padrões para RSSFI, por meio de estudos teóricos e de simulação.

1.2 Organização do Texto

Os capítulos subsequentes estão organizados da seguinte maneira:

- O conceito de Rede de Sensores sem Fio Industrial é apresentado em detalhes no Capítulo 2, incluindo uma descrição das características desse tipo de rede, exemplos de aplicações e os padrões existentes;
- No Capítulo 3, os desafios para implementação de uma RSSFI são apresentados, incluindo uma discussão sobre problemas de ruído e interferência e sobre os modelos para caracterização do canal de comunicação sem fio em ambientes industriais. Resultados obtidos por meio de experimentos em ambientes industriais *indoor* e *outdoor* são descritos para demonstrar as características do canal sem fio nesse tipo de ambiente;
- No Capítulo 4, os conceitos relacionados ao projeto de protocolos multicanais para RSSFs e sobre estimação de qualidade de enlace são discutidos. Também são descritos vários trabalhos relacionados à pesquisa realizada nesta tese;
- O Capítulo 5 apresenta um novo modelo para simulação de protocolos multicanais em RSSFI, que considera diversos aspectos importantes do canal sem fio em ambientes industriais. No capítulo também é descrito um estudo de simulação para comparação de diferentes estimadores de qualidade de enlace disponíveis na literatura;
- O Capítulo 6 aborda o estimador de qualidade de enlace proposto nesta tese e o nó LQE. Experimentos em um ambiente industrial real são descritos para validar a proposta;
- O Capítulo 7 apresenta o novo protocolo de acesso ao meio proposto nesta tese. Estudos de simulação foram realizados para comparar o protocolo proposto com outros cinco protocolos, que foram implementados com base nas recomendações dos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.4e;
- As considerações finais e as propostas de trabalhos futuros são descritas no Capítulo 8.

CAPÍTULO 2

Redes de Sensores sem Fio Industriais

Em uma Rede de Sensores sem Fio Industrial (RSSFI), nós sensores são instalados em máquinas e realizam o monitoramento de parâmetros importantes dos processos industriais. Os dados obtidos por meio dos sensores podem ser processados localmente e as informações geradas são transmitidas por meio de um canal de comunicação sem fio até um nó que recebe todos os dados gerados pela rede, denominado nó sorvedouro. As informações colhidas pelo nó sorvedouro são disponibilizadas para análise ou armazenamento em uma central de monitoramento, que pode opcionalmente disponibilizar essas informações em outras redes, por meio de um *gateway*.

A partir das informações obtidas na central de monitoramento, pode-se reparar ou substituir equipamentos antes que um prejuízo maior possa ocorrer [2]. Os pacotes podem ser transferidos diretamente dos nós sensores para o nó sorvedouro ou por meio de roteadores intermediários. Além disso, as informações obtidas por meio dos nós sensores podem ser utilizadas como entrada para sistemas de controle.

Tradicionalmente, sistemas de automação industrial são construídos com o uso de comunicação cabeada [25]. Esses sistemas apresentam alto custo de instalação e manutenção e pouca flexibilidade. Para que uma rede de sensores cabeada possa ser instalada, uma infraestrutura de rede precisa ser implantada, o que pode significar altos custos para adaptação da indústria e transposição de barreiras físicas para instalação de cabos de comunicação. Além disso, caso seja necessário realizar modificações na topologia da rede, devido à alteração do local de um nó sensor ou à inserção ou remoção de nós na rede, a infraestrutura de rede precisar ser adaptada, o que também pode representar um alto custo. Em muitos casos, o custo para instalação dos cabos e sensores é muito maior que o custo dos próprios sensores [1].

Nesse contexto, a utilização de redes sem fio apresenta um conjunto de vantagens em relação à utilização de redes cabeadas, como a facilidade e a rapidez na implantação e manutenção das redes, além do seu baixo custo. Em uma RSSFI, nós sensores podem ser implantados sem que seja necessário modificar a topologia da fábrica e sem a necessidade de instalação de infraestrutura de rede até os locais de monitoramento. Além disso, os nós sensores podem ser

implantados em locais de difícil acesso e em sistemas móveis, em que o uso de redes cabeadas pode ser muito difícil ou inviável (ex: monitoramento de torque no eixo de máquinas girantes [26]).

Apesar das vantagens apresentadas pelo uso de uma RSSFI para implementação de sistemas de monitoramento e controle em ambientes industriais, a implantação desse tipo de tecnologia apresenta alguns desafios. As redes sem fio possuem um meio de comunicação inerentemente não confiável; desta forma, erros de transmissão são muito mais comuns do que em redes cabeadas. Os nós em uma RSSFI podem sofrer com interferência a partir de outros nós na rede, de outras redes de sensores localizadas no mesmo ambiente, de outras redes sem fio que utilizam a mesma faixa de frequência, como redes Wi-Fi ou *Bluetooth* [5], além de outros equipamentos que geram interferência, como fornos micro-ondas [3].

Em ambientes industriais existem muitas obstruções, objetos e máquinas, usualmente construídos com materiais metálicos, que são muito refletivos. Dessa forma, a perda de percurso pode ser alta nesses ambientes [6]. Além disso, devido à natureza refletiva dos objetos presentes no ambiente, o canal sem fio no ambiente industrial apresenta um grande espalhamento de retardo RMS [27, 28], devido ao perfil de multipercurso do ambiente.

Os nós sensores possuem restrições de recursos, apresentando baixo poder de processamento e em alguns casos restrições de consumo de energia [4]. Muitos sistemas de monitoramento industrial necessitam processar sinais heterogêneos que mudam rapidamente e devem ser obtidos utilizando uma alta taxa de amostragem [5] [29]. Além disso, esses sistemas requerem alta confiabilidade. Para algumas aplicações, como controle em ambiente industrial, além dos requisitos de confiabilidade, existem outros relacionados ao atraso para a recepção dos pacotes. Nesse tipo de aplicação a operação da rede deve ocorrer de forma determinística, uma vez que as informações sendo monitoradas precisam ser entregues aos sistemas de controle de forma periódica, obedecendo aos prazos de entrega de cada pacote. Devido a essas limitações, principalmente com relação à baixa taxa de transmissão e à falta de confiabilidade, e os requisitos de aplicações industriais, a implementação de sistemas baseados nessa tecnologia se torna ainda mais desafiadora.

2.1 Aplicações de Redes de Sensores sem Fio Industriais

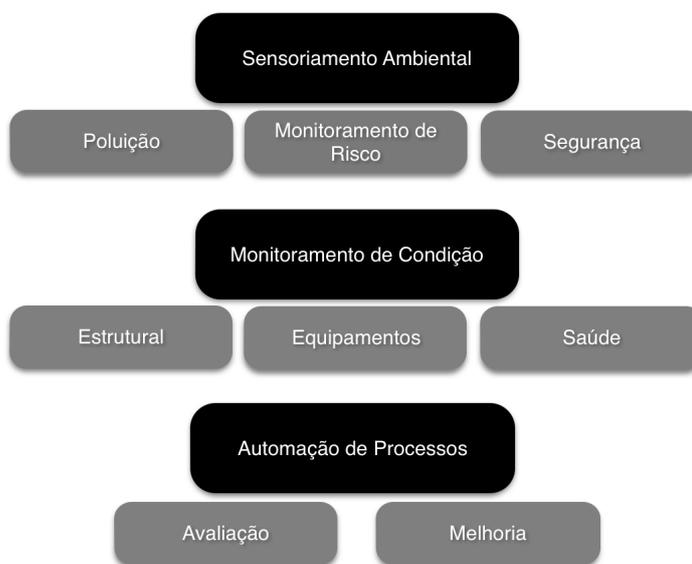
Existem na literatura poucos trabalhos sobre o desenvolvimento de aplicações baseadas em RSSFI para monitoramento e controle em ambiente industrial, devido principalmente à complexidade dos requisitos dos sistemas e às restrições para implementação [29]. Além dos requisitos funcionais e não funcionais das aplicações industriais, que muitas vezes incluem a alta confiabilidade e baixa latência na transmissão das informações, as RSSFIs precisam ser simples, possuir uma arquitetura flexível, fácil de instalar e manter, possuir longo tempo de vida, e apresentar custo baixo [30].

Tabela 2.1 Classes de aplicações industriais.

Categoria	Classe	Aplicação	Descrição
Segurança	0	Ação de emergência	Sempre crítico
Controle	1	Controle de malha fechada	Frequentemente crítico
	2	Controle de malha fechada com supervisão	Usualmente não crítico
	3	Controle de malha aberta	Controlado por humano
Monitoramento	4	Alerta	Consequência operacional de curto prazo
	5	Log (<i>download</i> e <i>upload</i>)	Nenhuma consequência imediata

As classes de aplicações industriais definidas pela Sociedade Internacional de Automação (*International Society of Automation – ISA*) [31] são mostradas na Tabela 2.1. Dessas classes de aplicações, apenas as da Classe 0 têm uso em redes sem fio não recomendado [32], devido à grande criticidade das aplicações que se encaixam nesta classe. Por outro lado, diversas aplicações, que se encaixam entre as classes 1 e 5, podem fazer uso de redes sem fio para a sua implementação. No entanto, as tecnologias e protocolos utilizados devem ser capazes de satisfazer os requisitos de cada uma das classes de aplicação.

Na Figura 2.1 é mostrado um exemplo de taxonomia de aplicações industriais que podem ser implementadas utilizando RSSFI [30]. De acordo com essa definição, as aplicações se encaixam em três grandes grupos: sensoriamento ambiental, monitoramento de condição e automação de processos. As aplicações de sensoriamento ambiental podem explorar o monitoramento de parâmetros críticos para o funcionamento dos processos industriais, a avaliação do nível de poluição, monitoramento de riscos e o monitoramento de parâmetros que possam comprometer a segurança dos processos, dos produtos produzidos e das pessoas envolvidas nos processos.

**Figura 2.1** Tipos de aplicações de RSSFI (adaptado de [30]).

As aplicações para monitoramento de condição podem realizar o monitoramento estrutural, em que sensores são instalados em elementos da infraestrutura da indústria, como pontes e túneis. Muitas aplicações realizam o monitoramento de equipamentos, visando realizar a detecção e a predição de falhas, diminuindo os custos com manutenção e evitando que prejuízos ocorram devido às falhas. A ocorrência de falhas em equipamentos industriais provoca prejuízos tanto relativos ao conserto ou a substituição dos equipamentos, como relacionados à parada da produção até que o problema seja solucionado. Nessa categoria de aplicações também se encaixam as aplicações de monitoramento das condições de saúde de pessoas no ambiente industrial. Essas aplicações se encaixam no contexto de *Body Area Networks* (BAN) [33].

Como exemplos de sistemas de monitoramento de equipamentos, alguns trabalhos descrevem sistemas baseados em RSSFI para monitoramento de motores de indução trifásicos, que são os principais equipamentos utilizados para conversão eletromecânica em indústrias e estão presentes na maioria dos processos industriais [34]. Em [35] é proposto um sistema digital para avaliação de consumo de energia, diagnóstico, controle e supervisão de sistemas elétricos por meio de uma RSSFI. O sistema é composto por dois tipos de dispositivo para aquisição, processamento e transmissão dos dados: módulos sensores inteligentes e unidades remotas de aquisição de dados. Apenas os primeiros utilizam rede sem fio para transmissão dos dados e realizam monitoramento de temperatura. O trabalho teve foco principalmente no consumo de energia dos nós sensores e não apresentou estudos detalhados sobre erros de transmissão e sobre a qualidade do canal de comunicação.

Em [1] é descrito um sistema de monitoramento de eficiência em motores. Nesse sistema, os nós transmitem os sinais de tensão e corrente dos motores monitorados, sem processamento local, por meio da RSSFI. A estimação dos parâmetros é realizada em uma unidade central de monitoramento. Foram realizados experimentos para verificar a qualidade do canal sem fio em um ambiente industrial, por meio do indicador de qualidade de *link* (*Link Quality Indication* – LQI). Também foram realizadas medições do ruído de fundo no ambiente. A RSSFI foi implementada utilizando rádios totalmente compatíveis com o Padrão IEEE 802.15.4. No entanto, os protocolos de acesso ao meio definidos por esse padrão não são adequados para a implementação de RSSFI, uma vez que utilizam apenas um canal em toda a rede e não possuem mecanismos para lidar com as variações espaciais e temporais na qualidade dos canais.

Em [36] é descrito um sistema baseado em sensores de vibração, análise acústica e corrente para detecção de falhas em motores de indução trifásicos, utilizando processamento embarcado e transmissão de dados por meio de uma RSSFI. No sistema descrito em [36], apenas um nó final foi utilizado para validação do sistema em laboratório, ou seja, não foi validado em um ambiente industrial real.

Em [37,38] é descrito um sistema baseado em um processador digital de sinais para monitoramento de torque, fator de potência, eficiência e velocidade em motores de indução utilizando RSSF. No entanto, os testes do sistema foram conduzidos em laboratório, o que não caracteriza

um experimento realista, já que não considera o efeito causado pelo perfil de multipercurso dos ambientes industriais na qualidade do canal sem fio.

Em [3] é descrito um sistema embarcado integrado a uma RSSFI para monitoramento de torque e eficiência em motores de indução trifásicos. O sistema foi validado em laboratório considerando uma rede com dois nós finais, em um galpão com características de ambientes industriais. Estudos sobre a influência da interferência de redes Wi-Fi e fornos micro-ondas na qualidade de comunicação de rádios IEEE 802.15.4 foram conduzidos. Os resultados mostraram que a Taxa de Perda de Pacote (TPP) da RSSFI pode chegar a 90% caso exista uma rede Wi-Fi no ambiente operando em um canal que sobrepõe o canal da RSSFI. A interferência do forno micro-ondas provocou uma TPP de cerca de 60%. O trabalho descrito em [3] não propõe mecanismos para lidar os problemas de interferência identificados. É possível mitigar os problemas de interferência por meio de um gerenciamento adequado da alocação de canais ou por meio de mecanismos de alocação dinâmica de canal.

Em [39] é descrito um sistema de monitoramento de temperatura, para aplicação em ambientes industriais hostis, utilizando uma RSSFI. Um protocolo customizado foi desenvolvido, considerando múltiplos coordenadores, para melhorar a qualidade de serviço da rede e tentar garantir visada direta para todos os nós sensores. Para aplicações de monitoramento de temperatura em ambientes industriais, o período entre leituras subsequentes dos sensores deve ser de no máximo 2,5 s. No sistema descrito em [39] um período igual a 0,25 s foi considerado, que é o período utilizado por sistemas disponíveis no mercado baseados em redes cabeadas.

As aplicações para automação de processos podem estar relacionadas com a avaliação da qualidade dos produtos produzidos pelos processos industriais, bem como a avaliação da eficiência no uso de recursos no ambiente industrial, como aplicações relacionadas à otimização de consumo de água e energia. Sistemas inteligentes de monitoramento de consumo de energia e controle de eficiência se encaixam no contexto de *Smart Grid*, que faz uso de tecnologias de informação e comunicação para otimizar os processos de geração, distribuição e utilização de energia [40].

Aplicações para melhoria de processos envolvem a aquisição de dados por meio de sensores para alimentação de sistemas de controle, que utilizam atuadores para controlar e otimizar os processos. Esse tipo de aplicação vem sendo explorada no contexto de agricultura de precisão [41,42]. Um exemplo de sistema para monitoramento e avaliação da qualidade dos produtos produzidos é descrito em [43], em que uma RSSFI para monitoramento de temperatura e pH em barris para processamento de couro em ambiente industrial foi implantada. Os resultados focam principalmente na validação dos valores de temperatura e pH obtidos. Foi realizado um experimento consistindo no monitoramento de um barril durante 108 horas e foi verificada uma TPP média de 13%. No experimento foi utilizado apenas um nó final, posicionado a 30 metros de distância do nó sorvedouro. Não foram fornecidas outras informações, além da TPP, para análise da qualidade do meio de comunicação.

A implementação de sistemas de controle industrial utilizando redes sem fio é muito desafiadora devido às restrições de latência e determinismo desses sistemas. Dessa forma, algumas aplicações podem não suportar perdas de pacote e grandes variações de latência na transmissão de informações. No entanto, utilizando técnicas para melhoria da qualidade de serviço de redes de sensores e atuadores sem fio, pode ser possível a implementação de sistemas de controle não críticos; ou seja, que suportem certo nível de variação na qualidade do canal. Alguns trabalhos sobre aplicações de controle sem fio na indústria têm como objetivo tornar os controladores mais robustos e tolerantes a falhas de transmissão e variação do atraso [44].

Em [45] é proposto um sistema de controle preditivo em rede adaptado para utilização de RSSF. A aplicação de controle utilizada para validação da proposta suporta um erro eficaz menor ou igual a 12. Utilizando a implementação geral do controlador, esse limiar de erro só pode ser alcançado quando a rede apresenta TPP menor que 40%. Utilizando a nova abordagem, baseada na predição dos valores medidos em momentos de rajadas de erro de pacote, foi possível manter o erro eficaz do sistema de controle menor que 12 para taxas de perda de pacote de até 70%. De toda forma, mesmo para esquemas de controle robustos, uma garantia mínima de qualidade de serviço deve ser oferecida.

Em [46] um sistema de controle aperiódico é descrito, baseado em uma RSSF que segue o Padrão IEEE 802.15.4. Para o sistema descrito em [46], taxas de transmissão de pacote iguais a 0,3 pacotes por segundo e 1,56 pacotes por segundo são consideradas. Resultados experimentais obtidos em laboratório demonstraram a eficiência do mecanismo proposto com respeito ao desempenho de controle e de comunicação. No entanto, os experimentos foram realizados em um ambiente de laboratório e não em ambientes industriais reais. Em ambientes industriais muitas falhas de transmissão podem ocorrer devido às características do canal sem fio nesses ambientes.

2.2 Padrões para Redes de Sensores sem Fio Industriais

2.2.1 Padrão IEEE 802.15.4

O Padrão IEEE 802.15.4 é designado para aplicações de RSSF e define as camadas física e de acesso ao meio, provendo comunicação sem fio com baixo consumo de energia e baixo custo para aplicações que não requerem alta taxa de transferência de dados. O padrão opera em bandas não licenciadas e um total de 27 canais para comunicação são definidos. Mais detalhes sobre a camada física definida pelo Padrão IEEE 802.15.4 [47] são mostrados na Tabela 2.2.

Como as bandas utilizadas pelo padrão são não licenciadas, os rádios que seguem esse padrão compartilham o meio de comunicação com outros dispositivos que implementam outras tecnologias, como rádios IEEE 802.11 (Wi-Fi) e IEEE 802.15.1 (*Bluetooth*). Embora esses padrões compartilhem a mesma banda, é possível que múltiplas redes coexistam no mesmo ambiente com mínima interferência entre si, se os canais forem alocados de maneira adequada.

Tabela 2.2 Informações sobre a camada física definida pelo IEEE 802.15.4.

Faixa de Frequência	Tipo de Modulação	Taxa de <i>bits</i>	Taxa de símbolos	Quantidade de Canais
868 MHz	BPSK	20 <i>kbit/s</i>	20 kbaud	1
915 MHz	BPSK	40 <i>kbit/s</i>	40 kbaud	10
2,4 GHz	O-QPSK	250 <i>kbit/s</i>	62,5 kbaud	16

A taxa de *bits* máxima no Padrão IEEE 802.15.4 é de 250 *kbit/s* nominal, quando operando na banda de 2,4 GHz. No entanto, o canal pode ser sub-utilizado, dependendo do protocolo de acesso ao meio utilizado pelos nós. Por exemplo, se o protocolo de acesso ao meio for o CSMA/CA, como definido pelo Padrão IEEE 802.15.4, os nós esperam por pelo menos um período de *backoff* antes de tentar transmitir um pacote, mesmo se o meio de comunicação estiver livre. Estudos experimentais descritos em [48] mostraram que a taxa de *bits* máxima real é em torno de 153 *kbit/s* quando o CSMA/CA é utilizado. Para algumas aplicações industriais essa taxa de transferência pode ser suficiente, mas outras aplicações requerem a aquisição de uma grande quantidade de dados e necessitam transmitir muitas informações pela rede [3, 5]. Utilizando processamento local nos nós sensores, é possível reduzir a quantidade de dados transmitidos pela rede.

Além dessa limitação, é importante notar que a taxa de transferência de *bits* para um determinado nó sensor pode ser muito menor que 153 *kbit/s* ao considerar o compartilhamento do meio de comunicação com múltiplos nós na mesma RSSF e o baixo nível de qualidade do meio de comunicação devido à presença de fontes de interferência e pelo desvanecimento em pequena e larga escala no ambiente industrial.

O Padrão IEEE 802.15.4, lançado em 2003, define dois modos de operação. O primeiro é denominado *non-beacon mode*, e é baseado apenas no CSMA/CA. O segundo modo de operação é denominado *beacon mode*, em que uma estrutura denominada *superframe* é definida. Os *superframes* são delimitados por pacotes (*beacons*) transmitidos pelo coordenador e são então divididos em 16 intervalos de tempo iguais. O *superframe* possui uma porção ativa e uma porção inativa. A porção ativa é dividida em período de acesso por contenção (*Contention Access Period – CAP*) e período livre de contenção (*Contention-Free Period – CFP*). No CAP os dispositivos utilizam CSMA/CA baseado em intervalos de tempo (*slotted-CSMA/CA*) para se comunicar, enquanto que no CFP as transmissões são realizadas sem o uso do CSMA/CA. Para aplicações que requerem uma taxa de transferência específica, o coordenador pode dedicar porções da parte ativa, denominadas Intervalo de Tempo Garantido (*Guaranteed Time Slot – GTS*), para determinados nós.

Em uma rede IEEE 802.15.4 os nós podem ser de dois tipos: FFD (*Full Function Device*) ou RFD (*Reduced Function Device*). Um nó FFD pode agir como coordenador, nó final ou roteador intermediário. Nós RFD podem agir apenas como nós finais [49]. A topologia da rede

pode ser organizada de três formas: estrela, árvore ou em malha. Na Figura 2.2 são mostradas as três topologias.

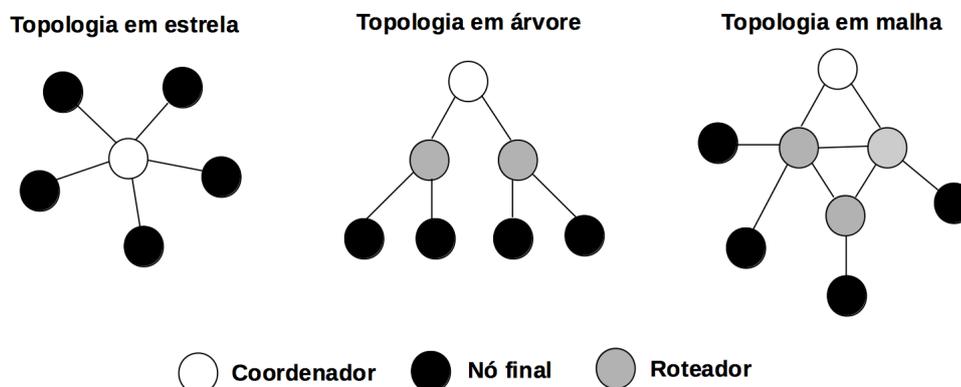


Figura 2.2 Topologias suportadas pelo Padrão IEEE 802.15.4.

Na topologia em estrela todos os nós sensores se comunicam diretamente com o nó coordenador (ou sorvedouro). Nesse caso, o meio de comunicação é compartilhado entre todos os nós finais e não pode haver transmissões em paralelo, uma vez que todos os nós são capazes de interferir entre si. Uma alternativa para permitir transmissões em simultâneo é utilizar múltiplos transceptores no nó sorvedouro, de modo que subconjuntos diferentes de nós finais utilizem canais diferentes para se comunicar. A topologia em estrela é adequada para RSSFs que possuem poucos nós e é implantada em um espaço relativamente pequeno, pois toda a comunicação ocorre em apenas um salto e a distância entre os nós finais e o nó sorvedouro é limitada pelo alcance dos rádios.

Uma rede em árvore é formada a partir de uma hierarquia, na qual cada conjunto de nós finais se comunica com um determinado roteador, que por sua vez se comunica com o coordenador. Esse é o tipo de topologia mais comum para implantação de protocolos multicamada [50]. Nessa topologia pode haver comunicação em simultâneo nas sub-redes. Caso todos os nós da RSSF se comuniquem utilizando o mesmo canal, pode haver colisões entre pacotes transmitidos em diferentes sub-redes, mas por meio da utilização de múltiplos canais pode-se diminuir a quantidade de colisões. Esse tipo de topologia é adequado para RSSFs com muitos nós e que abrangem uma grande área.

Uma rede em malha funciona de modo *ad hoc*, em que um roteador pode se comunicar com qualquer outro diretamente; ou seja, sem a necessidade de intermediação por parte do coordenador. Nessa topologia a rede é auto-organizável, podendo se ajustar automaticamente, tanto na sua inicialização como na entrada ou saída de novos nós na rede. A topologia em malha permite também aumentar a abrangência da rede, visto que a comunicação de nós distantes com o coordenador pode ser feita a partir de múltiplos saltos, por meio dos roteadores. Para RSSFIs é mais adequado utilizar topologia em estrela ou em árvore, uma vez que a rede pode ser implantada de forma planejada nesses ambientes. Alguns padrões para RSSFI definem o

uso de topologias em malha, em que os nós finais podem transmitir pacotes por meio de rotas redundantes para aumentar a confiabilidade, mas a definição das rotas ocorre geralmente de forma estática e centralizada.

Alguns padrões para camadas superiores foram propostos para RSSFs baseadas no Padrão IEEE 802.15.4. Entre eles, um dos mais usados é o padrão ZigBee [51–53], que define aspectos da camada de rede e aplicação. Os protocolos definidos pelo padrão ZigBee possuem características desejáveis para RSSFs, como o baixo consumo de energia e a capacidade de ser executado em dispositivos com baixo poder de processamento e baixo custo. O ZigBee suporta diferentes topologias e é muito utilizado para a construção de redes em malha.

O padrão ZigBee não é adequado para aplicações industriais, uma vez que não garante o atendimento aos requisitos impostos por essas aplicações em termos de confiabilidade e determinismo [54]. O padrão ZigBee não possui mecanismos de coexistência e é utilizada uma abordagem de alocação estática do canal; ou seja, não existe mecanismo para mudança de canal, caso o canal em uso passe a oferecer baixa qualidade, devido à existência de fontes de interferência no ambiente ou problemas de multipercurso.

Os rádios que implementam o padrão ZigBee utilizam apenas o mecanismo de controle de acesso ao meio para tentar minimizar a quantidade de colisões [55]. No entanto, a utilização do CSMA/CA não garante a qualidade de serviço da rede. Por exemplo, embora os rádios IEEE 802.15.4 sejam capazes de detectar transmissões de rádios IEEE 802.11, o contrário pode não ocorrer, uma vez que os rádios IEEE 802.15.4 possuem baixa potência de transmissão [56, 57].

O protocolo MiWi [58], desenvolvido pela MicrochipTM, é uma alternativa para construção de redes baseadas no Padrão IEEE 802.15.4. Esse protocolo também suporta a construção de redes em malha. Embora seja semelhante ao ZigBee, o MiWi apresenta um mecanismo para realização de mudança dinâmica de canal, denominado *Frequency Agility*. Para escolher o novo canal, um nó FFD, denominado *initiator*, realiza uma varredura para obter o nível de energia em todos os canais e após isso envia uma mensagem em *broadcast* para os outros nós da rede informando o novo canal a ser utilizado. Caso algum nó não receba o pacote enviado em *broadcast*, um processo de resincronização é realizado após um determinado número de pacotes serem transmitidos sem sucesso. A resincronização consiste em verificar todos os canais até encontrar o canal atualmente em uso.

Embora seja uma alternativa para melhorar a qualidade de comunicação, o mecanismo *Frequency Agility* ainda apresenta uma forte dependência da camada de aplicação, uma vez que a aplicação determina o momento em que uma possível troca de canal deve ocorrer. Além disso, deve-se atentar para a relação de compromisso entre a acurácia na escolha do melhor canal para a rede e a sobrecarga de processamento nos nós. A sobrecarga imposta ao nó *initiator* é alta para realizar as varreduras nos canais, de modo a manter a rede sempre em um canal com boa qualidade. Por outro lado, os nós podem passar muito tempo sem oferecer informações durante o processo de resincronização. Outro ponto a se observar é que esse mecanismo não leva em consideração as variações espaciais na qualidade dos canais.

O padrão ZigBee Pro inclui um mecanismo para troca de canal semelhante ao proposto no protocolo MiWi, mas o padrão não especifica como o coordenador da rede deve tomar a decisão para trocar os canais [59].

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

2.2.2 WirelessHart

O WirelessHART é considerado o primeiro padrão aberto voltado para aplicações de monitoramento e controle que utilizam redes sem fio em ambiente industrial [60], tendo sido lançado em 2007. Esse padrão se baseia na camada física do IEEE 802.15.4, mas implementa a camada de acesso ao meio de forma diferente. O WirelessHART utiliza apenas 15 canais definidos na banda de 2,4 GHz, uma vez que o canal 26 não é permitido em alguns países [15]. O acesso ao meio é realizado utilizando TDMA. O uso do TDMA visa reduzir colisões e diminuir o consumo de energia [61], uma vez que os nós apenas permanecem em estado ativo nos intervalos de tempo destinados a eles.

A comunicação ocorre baseada em uma estrutura denominada *superframe*, que é composta por um conjunto de intervalos de tempo e se repete continuamente. Cada intervalo de tempo dentro do *superframe* pode ser alocado a um ou mais nós e transmissões simultâneas podem ocorrer, por meio de canais diferentes, e para receptores diferentes. Os intervalos possuem duração de 10 ms e acomodam a transmissão de um pacote de dados pelo transmissor e de um pacote de reconhecimento (ACK) pelo receptor. Para o correto funcionamento do protocolo definido no WirelessHART, os nós precisam manter a sincronização de relógio durante toda a operação da rede.

O WirelessHART define a utilização de um mecanismo de salto em frequência para mitigar os efeitos de interferência. Para evitar que os rádios utilizem canais com baixa qualidade é definido um mecanismo denominado *blacklisting* (lista negra). Nesse mecanismo, os canais que apresentarem baixo nível de qualidade não são utilizados na sequência pseudo-aleatória gerada pelo mecanismo de salto em frequência. No entanto, a configuração da lista negra não é feita

automaticamente, e sim por um administrador de rede. Levando em consideração as características muito dinâmicas dos canais nas RSSFIs, tanto espacialmente como temporalmente [9], uma abordagem centralizada de definição da lista negra pode não prover boa qualidade de serviço.

Na camada de rede, o WirelessHART é baseado em uma rede em malha com rotas redundantes. Essa característica, que não é encontrada no ZigBee e MiWi, permite aumentar a confiabilidade e tolerância a falhas. As rotas são definidas de forma centralizada por um administrador de rede. Essa unidade centralizada também é responsável por definir o padrão para o salto em frequência e por escalonar o tempo entre todos os nós da rede, garantindo o correto funcionamento do mecanismo TDMA. Embora o uso de rotas redundantes não seja suportado pelos protocolos de rede dos padrões ZigBee e MiWi, protocolos que usam rotas redundantes também podem ser implementados em rádios totalmente compatíveis com o Padrão IEEE 802.15.4.

Para tentar garantir a entrega dos pacotes, os nós podem utilizar três intervalos de tempo em cada *superframe*. Os dois primeiros são utilizados para transmissão e retransmissão (em caso de a primeira tentativa falhar) em uma rota pré-definida. O terceiro intervalo é utilizado para transmitir o mesmo pacote por meio de uma segunda rota [62]. Como cada intervalo utiliza um canal diferente, neste cenário cada pacote pode ser transmitido até três vezes dentro de um mesmo *superframe* utilizando diferentes parâmetros (rota ou canal), de modo que o enlace se torna robusto a problemas que afetam canais ou rotas específicas.

Em [15] são apresentados estudos de desempenho de rádios WirelessHART sujeitos à interferência de redes IEEE 802.11g (Wi-Fi), nos canais 1, 6 e 11. Os resultados mostraram que durante períodos de interferência a TPP chegou a 27,2%. Foi observada uma latência de aproximadamente dois segundos para a rede operando livre de fontes de interferência e em torno de 2,7 segundos quando a rede estava sujeita à interferência das redes Wi-Fi. A latência depende da estrutura temporal definida, que é influenciada pela quantidade de nós e pela quantidade de intervalos de tempo alocados para cada nó, e da probabilidade de entrega de pacotes. Observa-se que, sem um gerenciamento adequado da lista negra, a qualidade de comunicação pode ser muito prejudicada por fontes de interferência. Em [12] também foram apresentados resultados experimentais sobre o desempenho de uma rede WirelessHART. Nesses experimentos foi observada uma latência de um segundo entre o nó final e o *gateway* da rede. No entanto, os experimentos foram realizados sem considerar fontes de interferência e em um ambiente de laboratório, que possui características distintas das encontradas em ambientes industriais reais.

2.2.3 ISA100.11a

A Sociedade Internacional de Automação (ISA) desenvolveu o padrão ISA100.11a [31], que também é designado para aplicações industriais e teve a sua primeira versão lançada em 2009. Assim como o WirelessHART, o ISA100.11a é baseado na camada física do IEEE 802.15.4 e

utiliza os 16 canais da banda de 2,4 GHz (o canal 26 é opcional), mas define sua própria camada de acesso ao meio. A camada de acesso ao meio também é baseada em TDMA, salto em frequência e lista negra, para aumentar a imunidade contra fontes de interferência. No ISA100.11a os intervalos de tempo podem ser configurados para ter 10 ms, como no WirelessHART, ou 12 ms [63].

Uma importante diferença do ISA100.11a com relação ao WirelessHART é que, em nível de aplicação, ele foi projetado para suportar diversos padrões de redes industriais, e não apenas o padrão HART. Além disso, o esquema de salto em frequência é mais flexível, fornecendo três padrões diferentes. O primeiro, denominado *slotted*, define um canal diferente para cada transmissão, enquanto que o segundo, denominado *slow*, realiza troca de canais em intervalos de tempo bem definidos e mais longos. O uso do padrão *slow* permite a transmissão de pacotes com menor latência, mas aumenta o consumo de energia, uma vez que os nós precisam ficar ativos por um intervalo de tempo maior. O terceiro é uma combinação dos dois primeiros [13]. A utilização de um padrão híbrido para o salto em frequência permite acomodar a transmissão de pacotes periódicos, que fazem uso do salto em frequência de acordo com o padrão *slotted*, e a transmissão de pacotes por parte de nós que trabalham baseados em eventos, que fazem uso do período de troca lenta de canais para transmitir mensagens que necessitam de um atraso menor [54]. A camada de rede do ISA100.11a também é diferente, uma vez que permite a utilização de cabeçalhos compatíveis com o protocolo IP [60].

Em [59] é descrito um estudo para verificar o desempenho de rádios ISA100.11a e ZigBee Pro no contexto de aplicações aeroespaciais. Os rádios ISA100.11a possuem custo consideravelmente maior quando comparados com rádios totalmente compatíveis com o Padrão IEEE 802.15.4, mas é capaz de suportar melhor a presença de interferências. Nos experimentos realizados em [59] os rádios ISA100.11a mantiveram bom desempenho de comunicação mesmo na presença de interferência, enquanto que os rádios ZigBee apresentaram uma queda de desempenho. No entanto, a latência das transmissões no ISA100.11a é bem maior.

Embora os padrões WirelessHART e ISA100.11a apresentem mecanismos para lidar com coexistência e para oferecer garantias de qualidade de serviço, ainda existe uma dependência do correto gerenciamento da lista negra para manter a rede operando com boa confiabilidade. Nesse contexto, estudos sobre identificação de fontes de interferência e estimação de qualidade de enlace se mostram muito relevantes também para esses padrões.

2.2.4 Padrão IEEE 802.15.4e

Mais recentemente, em 2012, o Padrão IEEE 802.15.4e [16] foi lançado. O objetivo desse padrão é definir soluções para aplicações que requerem alta confiabilidade, como é o caso de muitas aplicações industriais. Cinco modos de operação são definidos no IEEE 802.15.4e: *Time Slotted Channel Hopping (TSCH)*, *Deterministic and Synchronous Multi-Channel Extension (DSME)*, *Low Latency Deterministic Network (LLDN)*, *Asynchronous Multi-Channel Adapta-*

tion (AMCA), e *Radio Frequency Identification Blink* (BLINK). No entanto, apenas os modos TSCH, DSME e LLDN têm sido explorados na literatura até recentemente [17]. Em geral, os modos de operação definidos no IEEE 802.15.4e são baseados em TDMA ou salto em frequência para reduzir colisões e mitigar os efeitos de interferência e da atenuação por multipercurso, bem como para satisfazer os requisitos de aplicações industriais em termos de confiabilidade e determinismo.

Uma das principais diferenças entre o novo Padrão IEEE 802.15.4e, em comparação com o Padrão IEEE 802.15.4 definido previamente, é o uso de múltiplos canais. O modo TSCH define o uso de salto em frequência e o modo DSME define o uso de salto em frequência ou adaptação de canal. Quando a rede usa adaptação de canal, dois nós podem se comunicar utilizando o mesmo canal por um longo período de tempo. Uma troca de canal apenas ocorre quando o canal em uso passa a apresentar baixa qualidade. Dessa forma, um procedimento para avaliar a qualidade dos enlaces de forma contínua se faz necessário para permitir o uso do mecanismo de adaptação de canal. A implementação desse procedimento não é definida pelo padrão [17].

Modo TSCH

O modo TSCH é baseado em TDMA e salto em frequência, assim como os protocolos de camada MAC dos padrões WirelessHART e ISA100.11a. Nesse mecanismo, os nós precisam estar com os relógios sincronizados. No padrão é definido um mecanismo de sincronização, que pode ser feito baseado em pacotes de dados recebidos ou pacotes de reconhecimento (ACK) recebidos, de modo a evitar o uso de pacotes extras para sincronização de relógio. O padrão não define como deve ocorrer o escalonamento no tempo e na frequência, de modo que algumas pesquisas vêm sendo desenvolvidas para propor mecanismos para o escalonamento de redes TSCH [64]. O TSCH também permite o uso de lista negra para evitar o uso de canais com baixa qualidade. No entanto, o padrão não define mecanismos para realizar o gerenciamento da lista negra de forma dinâmica.

Em redes TSCH, a comunicação ocorre baseada em uma estrutura denominada *slotframe*. Cada *slotframe* é composto por um conjunto de intervalos de tempo, em que cada intervalo de tempo é dedicado a um ou mais nós. Quando um intervalo de tempo é ocupado por dois nós que comunicam com o mesmo receptor e usando o mesmo canal, o acesso deve ocorrer por contenção, dentro do intervalo de tempo, usando um algoritmo baseado no CSMA/CA. Quando apenas um único nó realiza comunicação em um determinado intervalo de tempo e para um determinado canal, o acesso ocorre sem contenção. O *slotframe* repete continuamente de forma automática, e todos os nós devem manter a mesma noção global de tempo. Tipicamente a alocação dos intervalos de tempo é configurada por camadas superiores quando um nó vai entrar na rede. Os nós saltam em frequência utilizando todo o conjunto de canais disponível, de modo a evitar uma grande queda de desempenho devido a problemas que afetam apenas um subconjunto dos canais [16].

Na Figura 7.7 é apresentado um exemplo de *slotframe* com oito intervalos de tempo (S0 a S7). Cada intervalo de tempo possui 10 ms, assim como ocorre nas redes WirelessHART, e acomoda a transmissão de um pacote de dados e do pacote ACK correspondente. Se um determinado transmissor não receber o pacote ACK dentro do mesmo intervalo de tempo, ele pode retransmitir o pacote no próximo intervalo alocado para ele.

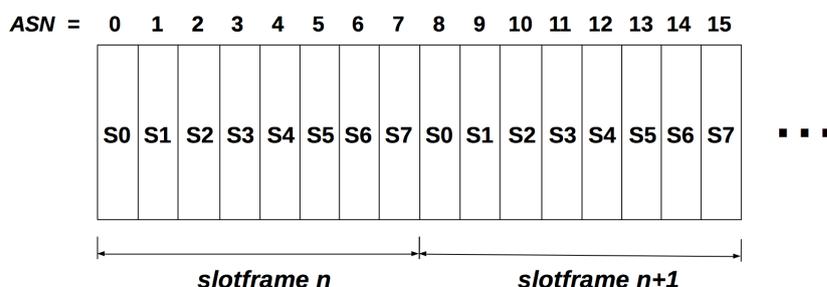


Figura 2.3 Exemplo de *slotframe* com oito intervalos de tempo para uma rede TSCH.

O canal (*ch*) a ser utilizado em um determinado intervalo de tempo, e considerando um dado receptor, é calculado, de forma geral, por meio da expressão [16]

$$ch = \text{macHoppingSequenceList}[\text{COUNTER} \bmod \text{macHoppingSequenceLength}],$$

em que COUNTER consiste em algum contador que deve ser compartilhado entre o transmissor e o receptor [16], macHoppingSequenceList é a lista de canais que podem ser utilizados pelo mecanismo de salto em frequência e macHoppingSequenceLength é o tamanho da lista de canais. Caso mais de uma transmissão ocorra no mesmo intervalo de tempo, os valores de COUNTER para cada par de receptor e transmissor devem idealmente ser diferentes e resultarem em canais diferentes, para evitar colisões. Quanto maior a quantidade de transmissões em simultâneo e quanto menor a lista de canais, maior a probabilidade de haver colisão na definição dos canais. No entanto, esses problemas podem ser evitados ou mitigados com um bom planejamento da rede ou a partir do uso de algoritmos de escalonamento que evitem que nós vizinhos se comuniquem no mesmo intervalo de tempo e usando o mesmo canal de comunicação.

Em [18] um experimento foi realizado para investigar o desempenho de uma rede IEEE 802.15.4e no modo TSCH em um ambiente de cabine de aeronave e com fontes de interferência devido a redes Wi-Fi. Assim como no experimento descrito em [15], para redes WirelessHART, o desempenho de uma rede que utiliza TSCH pode sofrer grande degradação caso não se faça um correto gerenciamento da lista negra. Nos experimentos descritos em [18] a TPP média da RSSF foi de cerca de 35% no cenário com fontes de interferência e utilizando todos os 16 canais disponíveis no mecanismo de salto em frequência. Em um outro experimento, utilizando apenas quatro canais, que sofrem menos com interferência, a TPP média foi de 10%. Em um experimento sem salto em frequência e utilizando um canal livre de interferência, a TPP média foi de cerca de 5%. Esse resultado encoraja o desenvolvimento de mecanismos adaptativos,

como os propostos nesta tese, para configurar dinamicamente a lista negra ou para permitir a troca de canais apenas sob demanda, quando o canal atualmente em uso passa a apresentar baixa qualidade para um determinado enlace.

Em [65, 66] foi proposto o uso de salto em frequência adaptativo, de modo a evitar canais afetados por fontes de interferência. Para isso, dois intervalos de tempo em cada ciclo são dedicados para obtenção de valores de RSSI e identificação do ruído nos canais. Baseando-se nas medições de RSSI, a cada novo ciclo, a lista negra é atualizada, de modo a desconsiderar os canais que apresentam maior nível de ruído. Em [66] foram realizados experimentos considerando dois tipos de filtros para os valores de RSSI (suavização exponencial e suavização exponencial auxiliada por filtro de Kalman) e considerando diferentes tamanhos da lista negra. Observou-se que quanto maior o tamanho da lista negra, melhor o desempenho de comunicação. Esse resultado corrobora com os resultados apresentados em [18], em que quanto menor a quantidade de canais utilizados para comunicação; ou seja, quanto maior a lista negra, melhor o desempenho de comunicação. No entanto, esse tipo de comportamento só ocorre se houver um monitoramento da qualidade dos canais, para que a lista negra seja configurada dinamicamente. Em cenários em que não ocorre esse monitoramento, o uso de salto em frequência, com uma maior diversidade de canais, é uma boa alternativa para manter bom nível de qualidade de comunicação.

Uma limitação da abordagem apresentada em [65, 66] é que apenas problemas de interferência são considerados. Outros aspectos que podem afetar a qualidade dos enlaces, como sombreamento e assimetria, não são levados em consideração. Além disso, o monitoramento da qualidade do canal é realizado por todos os nós da rede e utilizam intervalos de tempo que poderiam ser utilizados para comunicação, o que gera uma sobrecarga nos nós e provoca um aumento na latência. Outra limitação do trabalho é que a variação espacial na qualidade dos canais não é considerada.

Modo DSME

O modo DSME é o mais complexo e flexível entre os cinco modos do IEEE 802.15.4 [17]. Esse modo é derivado do modo *beacon* do IEEE 802.15.4, descrito na Seção 2.2.1, e é capaz de acomodar tráfegos periódicos e aperiódicos, por meio do uso de períodos de acesso por contenção (*Contention Access Period - CAP*) e períodos de acesso livre de contenção (*Contention Free Period - CFP*), utilizando intervalos de tempo dedicados (GTS). A maior diferença do DSME em relação ao modo *beacon* do IEEE 802.15.4 é que o ele permite o uso de um maior número de GTSs e também permite a comunicação em múltiplos canais, durante o período livre de contenção. Dessa forma, dois ou mais nós podem transmitir simultaneamente em um mesmo intervalo de tempo, usando canais diferentes, o que aumenta a taxa de transferência geral da rede.

Alguns nós da rede, denominados coordenadores, transmitem periodicamente pacotes em *broadcast*, denominados *Enhanced Beacons* (EB), que contêm todas as informações necessá-

rias para sincronizar as transmissões dos nós da rede. A comunicação ocorre de acordo com uma estrutura denominada *superframe*. Os *superframes* são delimitados por pacotes EB, transmitidos pelo coordenador.

Na Figura 2.4 é apresentado um exemplo da estrutura de *superframe* definida pelo modo DSME [16]. Cada *superframe* é composto por um CAP e um CFP. Diferente do modo *beacon* do IEEE 802.15.4, não existe período inativo. No CAP, os nós podem acessar o canal de comunicação usando CSMA/CA ou ALOHA [17]. O CAP pode ser utilizado para transmissão de pacotes de novos nós que querem ingressar na rede, para pacotes de solicitação de GTS, bem como para transmissão de pacotes de emergência pelos nós sensores. Os pacotes EB são transmitidos sempre utilizando o mesmo canal, definido no processo de iniciação da rede [16], que é também usado durante o CAP. No CFP os nós acessam o canal de comunicação sem contenção e múltiplos canais podem ser utilizados.

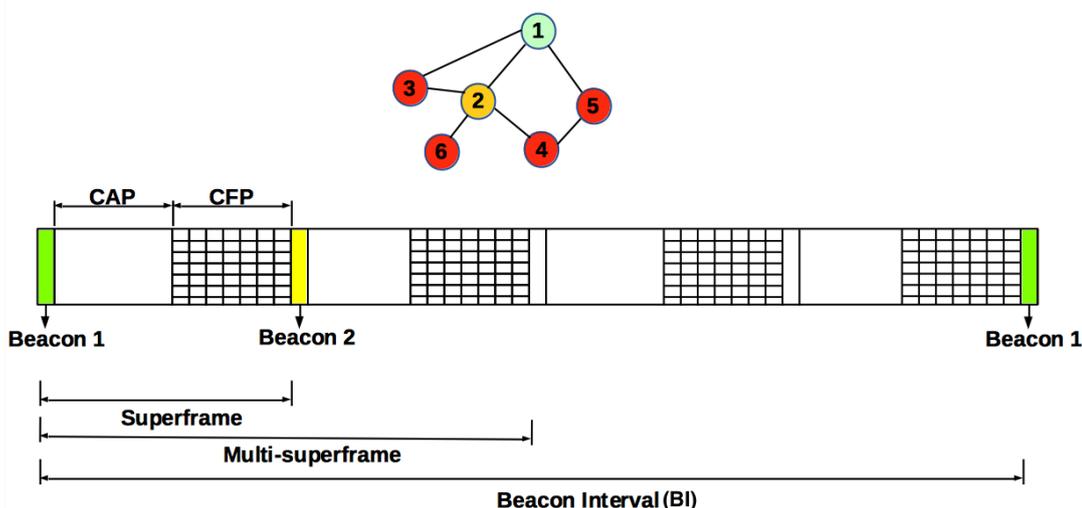


Figura 2.4 Exemplo de uma estrutura de *superframe* para uma rede DSME.

Múltiplos *superframes* podem ser agrupados em uma estrutura denominada *multi-superframe*, e múltiplos *multi-superframes* podem ser agrupados em um mesmo intervalo de *beacon* (*Beacon Interval* - BI). Essa estrutura temporal é configurada de acordo com alguns parâmetros: *macSuperframeOrder* (SO), *macMultisuperframeOrder* (MO) e *macBeaconOrder* (BO), em que $0 \leq SO \leq MO \leq BO \leq 14$. O parâmetro SO define o tamanho dos *superframes*, MO define o tamanho dos *multi-superframes*, e BO define o BI. No exemplo mostrado na Figura 2.4, é utilizada a seguinte relação entre os parâmetros: $MO = SO + 1$ e $BO = MO + 1$. Cada *superframe* possui 16 intervalos de tempo. Dessa forma, o valor de SO define a duração de cada intervalo de tempo. Opcionalmente, o número de CAP pode ser reduzido dentro de um *multi-superframe*, por meio de um mecanismo denominado *capReduction*. Quando o *capReduction* está habilitado, apenas o primeiro *superframe* dentro de cada *multi-superframe* possui o CAP.

Nas redes DSME existem três tipos de nós: coordenador PAN, coordenador e nó final. O coordenador PAN envia um EB a cada BI e é o nó sorvedouro da rede. O coordenador atua como nó sorvedouro para alguns nós finais da rede. Os coordenadores enviam *beacons* pelo menos uma vez em cada *multi-superframe*, no intervalo de tempo dedicado para a transmissão de *beacons*, para registrar sua presença na rede [67]. Na Figura 2.4, o Nó 1 é o coordenador PAN, o Nó 2 é um coordenador, os outros nós são nós finais. Os coordenadores encaminham pacotes dos nós finais que não conseguem alcançar o coordenador PAN diretamente. Em uma mesma rede, múltiplos coordenadores são permitidos.

O modo DSME define dois tipos de diversidade de canal, que podem ser usados durante o CFP, são eles: salto em frequência e adaptação de canal. A Figura 2.5 ilustra dois exemplos de escalonamento para o CFP, utilizando salto em frequência em (a), e adaptação de canal em (b).

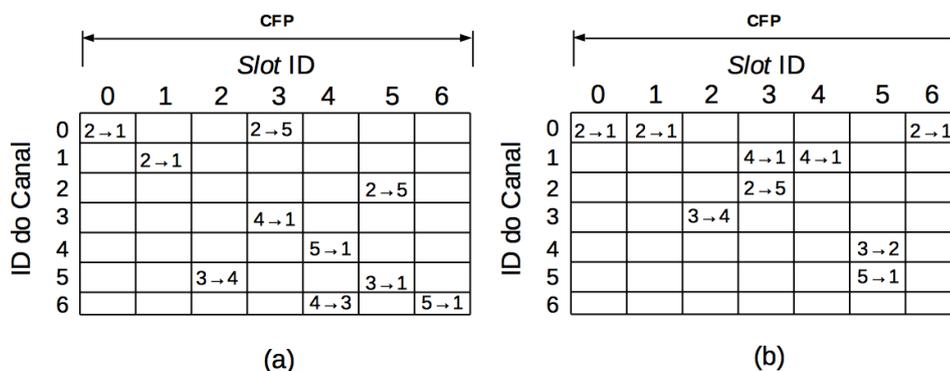


Figura 2.5 Mecanismos de diversidade de canal definidos para redes DSME.

Quando salto em frequência é utilizado, os nós recebem pacotes em diferentes canais, dependendo do identificador único do nó (chamado de *channel offset*), o ID do intervalo de tempo (*Slot ID*), o ID do *superframe* e o número sequencial do EB enviado pelo coordenador. Como todos os nós compartilham essas informações, eles podem determinar o canal em que um determinado receptor irá receber pacotes em um certo intervalo de tempo. Por exemplo, no exemplo ilustrado na Figura 2.5(a), o Nó 1 recebe pacotes utilizando o Canal 0 no primeiro intervalo de tempo, o Canal 1 no segundo intervalo de tempo, e assim por diante. Os nós que recebem pacotes dentro do mesmo *superframe* precisam ter valores diferentes para o *channel offset*, de modo a evitar colisões.

Quando a adaptação de canal é utilizada como o modo de diversidade de canal, um canal fixo pode ser alocado para um certo intervalo de tempo dentro do *superframe*, para um determinado par de transmissor e receptor. No exemplo ilustrado na Figura 2.5(b) o Canal 0 foi alocado para a comunicação entre o nó 2 e o nó 1 em todos os intervalos de tempo. Uma troca de canal apenas ocorre quando o canal em uso começa a apresentar baixa qualidade. O padrão não define como ocorre o monitoramento da qualidade dos canais em uso e também não define como selecionar os canais a serem usados [17]. Nesta tese é proposto um mecanismo para estimação de qualidade de enlace em tempo real, descrito no Capítulo 6, que pode ser integrado

a redes DSME. No Capítulo 7 é descrita e avaliada uma implementação do DSME que utiliza o estimador de qualidade de enlace proposto.

O modo DSME permite o uso de reconhecimento em grupo (*Group ACKnowledgment - GACK*), em que dois intervalos de tempo do *multi-superframe* são alocados para os pacotes GACK (G1 e G2). O coordenador usa o G1 para reconhecer todos os pacotes transmitidos antes do intervalo de tempo do G1 e o G2 para reconhecer todos os pacotes transmitidos após o intervalo de tempo do G1 e antes do intervalo de tempo do G2. Se GACK não é utilizado, todos os pacotes transmitidos para os coordenadores são reconhecidos individualmente [16]. Com esse mecanismo, um nó pode retransmitir um pacote perdido dentro do mesmo *multi-superframe*, caso um intervalo antes do G1 e outro intervalo entre G1 e G2 sejam alocados para o nó.

Embora ofereça algumas características interessantes, o modo DSME ainda deixa muitos aspectos em aberto, como a implementação do mecanismo de adaptação de canal, por exemplo. Além disso, ainda não existe uma implementação completa desse modo de operação do IEEE 802.15.4e [17]. Os resultados descritos nesta tese podem ajudar no desenvolvimento de soluções para melhorar o desempenho da comunicação multicanal e na implementação dos mecanismos de adaptação de canal em redes DSME.

Em [68] e [69] o desempenho de redes que usam o modo DSME é avaliado em comparação com o modo *beacon* do IEEE 802.15.4. Os experimentos verificaram que para alguns cenários a taxa de transferência geral da rede pode ser 12 vezes maior para redes DSME e com um menor consumo de energia, devido ao acesso baseado em TDMA. Nos experimentos foi utilizado salto em frequência, e não foi empregado gerenciamento dinâmico da lista negra. Em [69] a influência de interferência a partir de redes Wi-Fi foi avaliada, mas outros problemas que afetam a qualidade do canal sem fio em ambientes industriais, como sombreamento e atenuação por multipercurso, não foram considerados.

Em [70] são descritos estudos de simulação para verificar o desempenho de redes DSME e alguns mecanismos para otimizar o consumo de energia são propostos. No entanto, o artigo foca principalmente no consumo de energia e não considerou nos experimentos os problemas que podem afetar a qualidade do canal sem fio, como interferência e atenuação. Além disso, embora nas simulações descritas em [70] o uso do mecanismo de adaptação de canal tenha sido considerado, nenhum detalhe sobre a implementação desse mecanismo é fornecido.

Em [67] é realizada uma comparação entre DSME e TSCH, considerando aplicações para automação de processos. Foram realizadas simulações para verificar o atraso, a confiabilidade e a escalabilidade de cada modo. O TSCH apresentou melhores resultados para redes pequenas, com até 30 nós. Para redes maiores, com mais de 30 nós, o DSME apresentou melhores resultados. As simulações descritas em [67] foram realizadas considerando parâmetros realistas para o sombreamento log-normal, mas o efeito da atenuação por multipercurso e as características não estacionárias do canal sem fio não foram consideradas. Além disso, apenas o mecanismo de salto em frequência do DSME foi analisado.

Em [71] é descrita uma comparação entre TSCH e DSME, em termos de consumo de energia e desempenho de comunicação. Nos cenários avaliados, o consumo de energia para a rede DSME foi ligeiramente melhor do que para a rede TSCH, bem como o desempenho de comunicação. Para aplicações que enviam poucos dados, o TSCH subutiliza a banda, devido ao tamanho fixo dos intervalos de tempo. Nos experimentos descritos no artigo, apenas salto em frequência foi considerado para a rede DSME e sem reconhecimento de pacote em grupo.

Modo LLDN

O modo LLDN é destinado a aplicações que requerem uma baixa latência e um alto determinismo, ou seja, que apresentem pequena variação na latência e no intervalo de tempo entre a recepção de dois valores consecutivos de um determinado sensor. Apenas topologia em estrela é considerada e o acesso ao meio é realizado utilizando TDMA. No LLDN os intervalos de tempo são menores em relação aos utilizados nos modos THSC e DSME. Por definição, em uma rede LLDN todos os nós se comunicam utilizando um único canal [17].

A comunicação no modo LLDN ocorre de acordo com uma estrutura denominada *superframe*. Cada *superframe* inicia com um pacote *beacon* transmitido em *broadcast* pelo coordenador, e é seguido por até dois intervalos de tempo usados para gerenciamento, que são opcionais. Após isso são definidos vários intervalos de tempo dedicados para transmissão dos nós finais [16]. Quando apenas um nó é associado a um intervalo de tempo, não é necessário utilizar endereço, uma vez que o nó pode ser identificado pelo identificador do intervalo de tempo, que já é conhecido pelo coordenador. Dessa forma, é possível transmitir pacotes menores e reduzir a latência da rede.

Devido ao uso de TDMA, a comunicação entre os nós finais e o coordenador da rede (nó central da topologia em estrela) é livre de colisões, de modo que é possível garantir boa qualidade de comunicação. No entanto, problemas no canal sem fio, relacionados ao sombreamento, multipercurso, interferência ou assimetria, podem degradar o desempenho da rede. Além disso, devido à utilização de uma topologia em estrela, pode ser difícil acomodar uma rede com muitos nós. Uma possível solução para esse problema é utilizar um nó coordenador com múltiplos transceptores e dividir a rede em grupos que utilizem um canal em comum. Estratégias para a estimação de qualidade de enlace e alocação de canais, como as discutidas nesta tese, poderiam ser utilizadas para melhorar a qualidade de serviço dessas redes.

Em [72] é descrita uma implementação do LLDN utilizando rádios compatíveis com o Padrão IEEE 802.15.4. O estudo teve como objetivo verificar a viabilidade de implementar aplicações que requerem intervalos de até 10 ms entre a recepção de duas medições consecutivas de um sensor. No cenário em que os nós sensores enviam 2 bytes de carga útil, foi possível acomodar oito nós finais, com um atraso máximo de 9,996 ms. No cenário em que os nós sensores enviam 4 bytes de carga útil, foi possível acomodar sete nós finais, com atraso máximo de 9,536 ms. Uma limitação da análise realizada em [72] é que os experimentos foram realizados em um ambiente controlado, sem interferência externa, e com os nós posicionados muito perto

uns dos outros. Dessa forma, a taxa de entrega de pacote foi de 100% durante todo o experimento. Em um ambiente industrial real pode ser praticamente impossível alcançar uma taxa de entrega de pacote de 100% e nesse caso os valores de latência podem ser piores na prática em relação aos demonstrados no artigo.

Alguns autores propuseram técnicas de diversidade de canal e comunicação multicanal para redes LLDN. Em [73] é proposto um protocolo multicanal baseado no LLDN, denominado MC-LLDN. O MC-LLDN tem como objetivo aumentar a escalabilidade de redes LLDN por meio do uso de uma topologia multinível (em árvore), agregação de dados e comunicação utilizando múltiplos canais. Dessa forma, é possível acomodar transmissões simultâneas na rede, em canais diferentes. Por meio o uso de agregação de dados nos roteadores, menos intervalos de tempo precisam ser dedicados para o encaminhamento de pacotes para o coordenador, o que provoca uma grande redução na latência. A principal limitação do MC-LLDN é que os canais são alocados de forma estática para as sub-redes, o que torna o protocolo incapaz de lidar com as variações que podem ocorrer na qualidade dos canais no decorrer do tempo.

O protocolo proposto em [74] é uma evolução do MC-LLDN, denominado PriMuLa, que incorpora seleção adaptativa de canais para as sub-redes. Uma limitação do PriMuLa, que é devido às características das redes LLDN, é que o mesmo canal é alocado para todos os nós na mesma sub-rede. No entanto, variações espaciais na qualidade do canal podem ocorrer, bem como problemas de assimetria. Além disso, para realizar seleção dinâmica de canais, deve-se utilizar um mecanismo de estimação de qualidade de enlace que opere em tempo real e que não cause sobrecarga nos nós sensores. As simulações para avaliar o PriMuLa foram realizadas considerando apenas problemas de sombreamento, por meio do uso de parâmetros realistas para o modelo de sombreamento log-normal. No entanto, outros problemas que podem afetar a qualidade dos enlaces, como a não estacionaridade do canal sem fio em ambientes industriais, não foram considerados.

2.3 Conclusões do Capítulo

Este capítulo apresenta o conceito de Rede de Sensores sem Fio Industrial e discutiu possíveis aplicações, as vantagens e desafios para a utilização deste tipo de tecnologia. Também foi realizada uma discussão sobre alguns padrões que são empregados para a implementação de redes de sensores, incluindo novos padrões designados para aplicações industriais, como o WirelessHART, o ISA100.11a e o IEEE 802.15.4e. Alguns desses padrões apresentam um custo elevado quando comparado com o Padrão IEEE 802.15.4, devido à necessidade de utilizar nós sensores com maior capacidade de processamento e fontes de *clock* mais precisas, para manter a sincronia necessária para o correto uso de TDMA, como no caso das redes WirelessHART, ISA100.11a e o modo TSCH do IEEE 802.15.4e. Em contrapartida eles possuem mecanismos de coexistência que podem prover uma melhor qualidade de serviço para as RSSFIs.

Embora os padrões ISA100.11a, WirelessHART e o modo TSCH utilizem mecanismos para minimizar problemas de interferência, sem um correto gerenciamento das redes a qualidade de serviço pode também ser prejudicada. O modo DSME define o uso de adaptação de canal, mas não define como esse mecanismo deve ser implementado. Dessa forma, mesmo considerando os novos padrões para RSSFIs, alguns desafios ainda estão em aberto e devem ser alvos de pesquisas para o desenvolvimento de soluções adequadas para RSSFIs e que permitam a essas redes operarem com alta confiabilidade e determinismo. No próximo capítulo, os desafios para a implantação de uma RSSF em ambientes industriais e as características do canal sem fio nesses ambientes são discutidos em mais detalhes. Também são abordados possíveis problemas que podem ocorrer na implantação de redes que utilizam os padrões descritos neste capítulo.

CAPÍTULO 3

Desafios Para a Implantação de Redes de Sensores sem Fio Industriais

Apesar das vantagens apresentadas pelas RSSFIs, como o baixo custo e a grande flexibilidade, e das possibilidades de aplicações existentes para ambientes industriais, a utilização desse tipo de tecnologia em ambientes severos apresenta muitos desafios. Este capítulo tem como objetivo discutir em mais detalhes esses desafios.

Como as RSSFs utilizam bandas não licenciadas para comunicação, problemas de interferência com outras tecnologias podem ocorrer. O canal sem fio no ambiente industrial apresenta características não favoráveis à comunicação sem fio, como o alto nível de atenuação e problemas de sombreamento. Muitos ambientes industriais também apresentam características que tornam o canal sem fio não estacionário em longos períodos de tempo, o que pode provocar mudanças bruscas nas características dos canais no decorrer do tempo [8, 75, 76].

Devido ao perfil de multipercurso em ambientes industriais refletivos, a largura de banda de coerência pode ser muito pequena, de modo que as características do canal de comunicação podem ser muito diferentes, mesmo em canais adjacentes. Outro fator importante a ser considerado é a variação espacial na qualidade dos canais, em que um determinado canal pode apresentar boa qualidade de comunicação para alguns nós e qualidade muito baixa para outros nós, mesmo que os nós em questão estejam posicionados próximos uns dos outros. Em alguns casos também pode haver problemas de assimetria de enlace, em que as duas direções de um enlace apresentam níveis de qualidade diferentes. Todos esses aspectos são discutidos neste capítulo.

3.1 Ruído e Interferência Eletromagnética em RSSF

Devido ao aumento na quantidade de aplicações que utilizam tecnologias de comunicação sem fio, o espectro disponível para comunicação tende a ficar mais congestionado, aumentando

a interferência e reduzindo a qualidade de serviço das redes que coexistem em um mesmo ambiente.

A abordagem de alocação estática de espectro tende a não funcionar de maneira satisfatória à medida que muitos dispositivos presentes no ambiente utilizam a mesma faixa de frequências [77]. Dessa forma, mecanismos que permitam uma utilização mais inteligente do espectro devem ser desenvolvidos para mitigar os problemas relativos à interferência de redes coexistentes.

Muitos dispositivos sem fio operam na banda destinada a aplicações industriais, científicas e médicas (*Industrial, Scientific and Medical* – ISM) de 2,4 GHz, como rádios *Bluetooth*, Wi-Fi e telefones sem fio. Além disso, outros dispositivos que não são destinados para comunicação podem causar interferência nessa faixa de frequências, como fornos micro-ondas.

Os padrões de comunicação sem fio, como o IEEE 802.11 e o IEEE 802.15.4, definem um conjunto de canais ao longo da banda. Como eles compartilham a banda, existe uma sobreposição entre os canais definidos por esses padrões. Na Figura 3.1 são mostrados os canais definidos pelos padrões IEEE 802.11 (Wi-Fi) e IEEE 802.15.4 na banda de 2,4 GHz. Apenas três canais (1, 6 e 11) do padrão IEEE 802.11 estão ilustrados na figura, mas o padrão define 14 canais (apenas 11 permitidos no Brasil) que são dispostos no espectro, de modo que existe sobreposição entre canais vizinhos. No Padrão IEEE 802.15.4 todos os canais são separados por uma banda de guarda de 5 MHz. Entretanto, devido à modulação utilizada na camada física, uma pequena fração do sinal é espalhada para fora do intervalo de 5 MHz [78]. Dessa forma, redes IEEE 802.15.4 que operam em um mesmo ambiente e em canais adjacentes podem interferir umas nas outras.

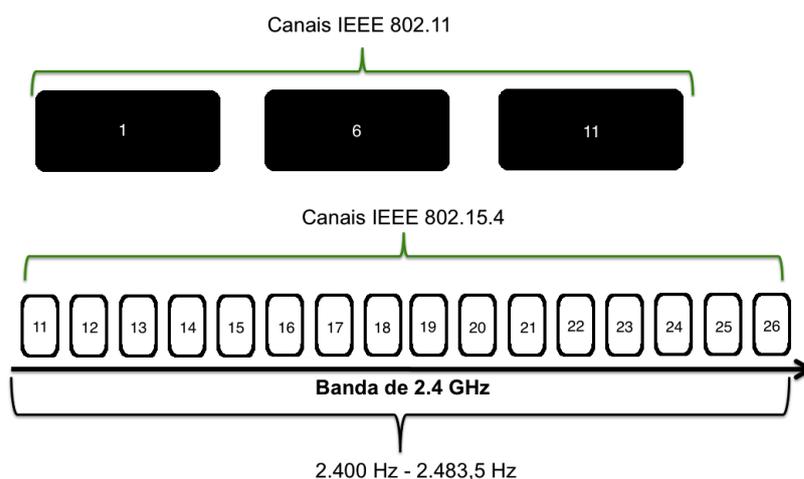


Figura 3.1 Canais definidos pelos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11 na banda de 2,4 GHz.

3.1.1 Estudos Experimentais para Avaliação do Ruído e Influência das Fontes de Interferência no Desempenho de RSSFs

Alguns trabalhos foram realizados para identificar possíveis fontes de interferência em diferentes ambientes [27, 28, 79–81]. Em [80] é descrito um estudo sobre a intensidade do campo elétrico de trabalho e a distribuição de probabilidade de amplitude (APD) do ruído em uma indústria de papel. A partir da APD é possível analisar o percentual de tempo em que um sinal impulsivo excede um determinado limite. Os resultados obtidos mostraram que os equipamentos mais comuns que podem causar interferência na faixa de 2,4 GHz são fornos micro-ondas, aquecedores industriais, sistemas de iluminação por radiofrequência e equipamentos de solda. No entanto, esses equipamentos nem sempre estão presentes na indústria.

Outras fontes de interferência usualmente encontradas nos ambientes industriais são motores elétricos, inversores de frequência e equipamentos de comunicação sem fio, como telefones sem fio e equipamentos para redes locais sem fio. Boa parte dessas interferências, principalmente as relacionadas aos equipamentos industriais, como motores e inversores de frequência, apresentam interferência na faixa de algumas centenas de megahertz, o que pode atrapalhar a comunicação em sistemas proprietários que utilizam essa faixa de frequência, mas não interferem em sistemas que usam a banda ISM de 2,4 GHz [27, 28].

Em [81] foram verificadas as faixas de frequência afetadas por um conjunto de fontes de interferência. Os resultados mostraram que motores de combustão e equipamentos de solda causam interferência apenas abaixo de 1 GHz. No ambiente onde foram realizadas as medições observou-se grande poluição no espectro na faixa de 2,4 GHz devido a outros sistemas de baixo alcance que utilizam essa faixa, como redes Wi-Fi e *Bluetooth*.

Alguns trabalhos foram realizados para verificar o desempenho de rádios IEEE 802.15.4 sujeitos à interferência de redes IEEE 802.11 (Wi-Fi), *Bluetooth* e fornos micro-ondas. Em [82] foi realizado um estudo experimental para verificar a correlação entre a Taxa de Perda de Pacote (TPP) e a potência média no canal de rádios IEEE 802.15.4 sujeitos à interferência de uma rede IEEE 802.11 e um forno micro-ondas. Os resultados mostraram que essas fontes de interferência aumentam significativamente o nível de energia nos canais, tendo influência direta no desempenho de comunicação dos rádios. Em alguns cenários, a TPP dos rádios IEEE 802.15.4 chegou a 90%, quando sujeitos à interferência da rede IEEE 802.11. Quando sujeitos à interferência do forno micro-ondas, a TPP no pior caso foi em torno de 50% quando a rede operava nos canais 21 e 23, que são centralizados nas frequências 2.455 MHz e 2.465 MHz, respectivamente. Observou-se correlação entre o nível de potência médio no canal e a TPP. No entanto, a relação entre potência média e TPP é diferente para cada tipo de fonte de interferência. Dessa forma, métricas mais elaboradas precisam ser desenvolvidas para estimar com maior acurácia a qualidade do canal de comunicação.

Em [3] foram realizados experimentos para investigar o impacto de uma rede IEEE 802.11 e um forno micro-ondas no desempenho de uma RSSF para monitoramento de motores em

ambiente industrial. Resultados semelhantes aos descritos em [82] foram observados, com a TPP chegando a cerca de 90% quando a RSSF estava sujeita à interferência de uma rede IEEE 802.11. Resultados semelhantes também foram descritos em [83]. Em [55] são descritos experimentos para verificar o impacto da distância entre transmissor e receptor e entre os nós sensores e as fontes de interferência (rádios *Bluetooth*, IEEE 802.11 e forno micro-ondas) em ambiente predial. Observou-se uma TPP de até 25% devido às interferências da rede IEEE 802.11 e forno micro-ondas para os cenários estudados. A interferência por parte dos rádios *Bluetooth* foi muito pequena. Isso se deve ao mecanismo de salto em frequência definido pelo padrão IEEE 802.15.1, que utiliza 79 canais de 1 MHz na faixa de 2,4 GHz.

3.2 Caracterização do Canal sem Fio em Ambientes Industriais

3.2.1 Perda de Percurso em Larga Escala

Em ambientes industriais usualmente existem muitos objetos e obstruções (muitos construídos com materiais metálicos), além de objetos móveis, como robôs, automóveis e pessoas. Isso influencia tanto no desvanecimento em larga escala como na atenuação em pequena escala. Alguns estudos experimentais foram realizados para verificar os efeitos do ambiente industrial no canal sem fio [6, 84].

A potência do sinal recebido em um receptor depende da potência de transmissão, do ganho das antenas, da distância entre transmissor e receptor e dos efeitos causados pelo ambiente. A perda de percurso em dB para uma distância d entre transmissor e receptor é definida de acordo com a Equação 3.1. Nesse modelo de perda de percurso log-distância [85], a potência média do sinal recebido diminui logaritmicamente com a distância, sendo dada por

$$L(d) = L(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right). \quad (3.1)$$

A perda de percurso na distância d depende da perda em uma distância de referência d_0 e de um expoente de perda n . A Equação 3.1 considera o valor médio da perda de percurso para as distâncias d e d_0 , considerando todos os valores possíveis de perdas de percurso para essas distâncias. O valor de $L(d_0)$ pode ser determinado utilizando a perda de percurso de espaço livre, por meio da equação $L(d_0) = 20 \log(4\pi d_0/\lambda)$ ou por meio de medições em uma distância apropriada [6, 85], em que λ é o comprimento de onda da portadora.

Existe uma variação na potência do sinal recebido, dependendo do local onde é feita a medição. Para capturar essa variação, uma variável aleatória X_σ é somada à Equação 3.1 para obter

$$L(d) = L(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, \quad (3.2)$$

em que X_σ tem distribuição gaussiana de média zero e desvio padrão σ , com valores expressos em dB. Essa variação na potência recebida em diferentes pontos com a mesma distância entre transmissor e receptor é conhecida como sombreamento log-normal [85]. Além da variação no valor de potência recebida ao se considerar locais diferentes, mas com a mesma distância, esse valor também pode variar ao se considerar transmissões em diferentes faixas de frequência, mesmo com o transmissor e o receptor posicionados em locais fixos.

Em [6] são descritos resultados experimentais para determinação do expoente n e do sombreamento log-normal X_σ em ambientes industriais nas frequências de 900, 2.400 e 5.200 MHz. Foram realizados experimentos em uma indústria de processamento de metal e uma indústria de processamento de madeira. Foram considerados três tipos de ambientes: o primeiro permitia visada direta entre o transmissor e o receptor, enquanto que o segundo e terceiro tipos não permitiam visada direta. O terceiro tipo de ambiente apresentava mais estruturas circundantes aos rádios em comparação com o segundo tipo de ambiente, além de estruturas com altura maior que as antenas do transmissor (posicionada a 6 m do chão) e receptor (posicionada a 2 m do chão). Em [84] também foram realizados experimentos para determinação de n e X_σ em alguns ambientes representativos no contexto de aplicações de *Smart Grids*, incluindo ambientes industriais.

Para cada um dos tipos de ambiente e para cada uma das frequências, foram calculadas estimativas dos parâmetros n e X_σ do modelo apresentado na Equação 3.2. Foi considerado $d_0 = 15$ m e o valor de $L(d_0)$ foi obtido por meio de medições. Essa estratégia apresentou maior acurácia em comparação com a utilização de um valor fixo, baseado na perda de espaço livre. Na Tabela 3.1 são mostrados os parâmetros obtidos em [6] para a banda de 2,4 GHz nos três tipos de ambiente. Embora o valor do expoente de perda tenha sido semelhante para os três casos, pode-se observar uma diferença significativa nos valores de perda na distância de referência, uma vez que esses valores de referência foram obtidos por meio de medições realizadas nos três tipos de ambiente.

Tabela 3.1 Parâmetros do modelo de perda de percurso log-distância [6].

Tipo do Ambiente	$L(d_0)$	n	X_σ
Ambiente 1	67,43 dB	1,72	4,73 dB
Ambiente 2	72,71 dB	1,52	4,61 dB
Ambiente 3	80,48 dB	1,69	6,62 dB

Considerando os valores da Tabela 3.1 pode-se fazer uma análise teórica de alcance de rádios IEEE 802.15.4 nos ambientes industriais considerados. Nos gráficos das Figuras 3.2 e 3.3 é possível observar a potência de recepção considerando potências de transmissão de 0 dBm e 15 dBm, respectivamente. São mostradas curvas para o Ambiente 1 e para o Ambiente 3. Esses valores de potência de transmissão são encontrados em transceptores disponíveis no mercado. A potência de recepção é calculada de acordo com [85]

$$P_R(d) = P_T - L(d), \quad (3.3)$$

em que P_T é a potência de transmissão (em dBm) e $L(d)$ é a perda de percurso (em dB), obtida por meio da Equação 3.1, e utilizando os parâmetros mostrados na Tabela 3.1.

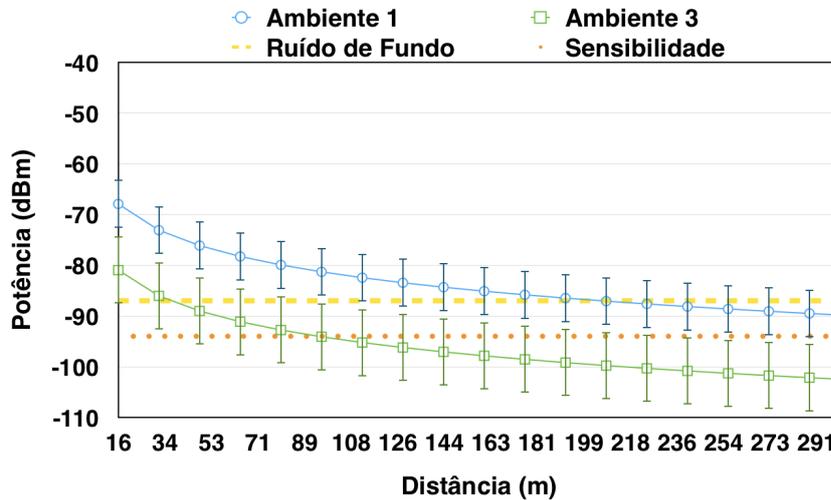


Figura 3.2 Potência de recepção para $P_T = 0$ dBm.

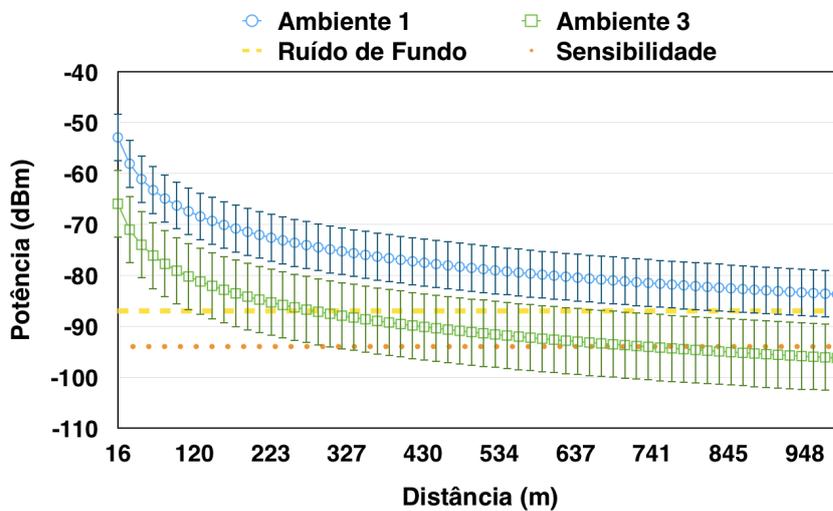


Figura 3.3 Potência de recepção para $P_T = 15$ dBm.

Nos gráficos também foram considerados os valores de desvio padrão para cada caso. Para avaliar o alcance dos rádios, são mostrados no gráfico o valor médio do ruído de fundo encontrado nos experimentos realizados em [6] (-87 dBm) e a sensibilidade dos rádios (-94 dBm). No entanto, o ruído de fundo pode ser menor para outros ambientes. Nos experimentos descritos em [1] o ruído de fundo foi em torno de -90 dBm, e em alguns casos ficou um pouco abaixo desse valor.

Utilizar rádios com baixa potência (0 dBm) em ambientes industriais pode não ser viável, devido à perda de percurso acentuada observada nos cenários analisados. Se for considerado

apenas o valor médio da potência recebida em determinada distância pode-se observar que, no pior caso (Ambiente 3), a uma distância de 30 metros o sinal já apresenta valor médio igual ao valor médio do ruído de fundo. Utilizando um rádio com 15 dBm o alcance é cerca de 10 vezes maior. Mesmo assim observa-se também uma perda acentuada, uma vez que os rádios com potência de transmissão de 15 dBm são projetados para alcances de até 1,2 km em visada direta. No Ambiente 1 (com visada direta), observa-se um alcance mais próximo do alcance especificado na folha de dados do transceptor.

A utilização de rádios com maior potência aumenta o consumo de energia da RSSF. Caso existam nós sensores alimentados por bateria, o tempo de vida da rede pode ser bastante reduzido. Além disso, aumenta-se o nível de interferência entre nós da mesma RSSF. Uma solução alternativa para aumentar o alcance da rede é a utilização de múltiplos saltos, por meio de roteadores intermediários. Pode-se também explorar técnicas de agrupamento de RSSF, que podem prolongar o tempo de vida da rede [86]. No entanto, para canais que apresentam altas taxas de erro de *bit*, a probabilidade de um pacote ser entregue utilizando múltiplos saltos pode se tornar muito pequena.

3.2.2 Atenuação em Pequena Escala e Multipercurso

Além da perda de percurso e sombreamento, deve-se também analisar a atenuação em pequena escala, devido a modificações rápidas que ocorrem no perfil de multipercurso do ambiente causado pelo movimento de objetos ao redor do transmissor e do receptor. Experimentos realizados em ambientes industriais descritos em [6] mostraram que a atenuação temporal segue a distribuição de Rice, considerando transmissor e receptor fixos. Essa distribuição descreve a atenuação em pequena escala quando existe um sinal estacionário dominante e componentes aleatórios se sobrepõem a esse componente principal [85]. Em ambientes industriais, existem usualmente vários raios invariantes no tempo, devido ao grande conjunto de estruturas estáticas no ambiente, e apenas uma pequena porção do perfil de multipercurso é afetada por objetos móveis [6]. A função densidade de probabilidade que descreve a envoltória de um sinal sujeito a desvanecimento Rice é

$$p_R(x) = \frac{x}{b^2} e^{-\frac{(x^2+A^2)}{2b^2}} I_0\left(\frac{Ax}{b^2}\right), x \geq 0, \quad (3.4)$$

em que $I_0(\cdot)$ é a função de Bessel modificada de primeira espécie e ordem zero, A^2 é a potência do sinal estacionário dominante e $2b^2$ é a potência média dos componentes aleatórios dos múltiplos percursos.

A distribuição de Rice é descrita de acordo com um parâmetro K [87], definido por

$$K = 10 \log\left(\frac{A^2}{2b^2}\right), \quad (3.5)$$

em que K é a relação entre a potência do componente principal (A^2) e a potência nos outros componentes ($2b^2$). Portanto, o parâmetro K define a severidade da atenuação por multipercurso [87].

Nos ambientes industriais estudados em [6] o fator K possui um valor alto, entre 4 dB e 19 dB, enquanto que em outros tipos de ambiente, como ambientes de escritório, valores entre -12 dB e -6 dB foram observados, como discutido em [6]. Isso pode ser explicado pela natureza aberta dos prédios industriais, onde existem muitos objetos metálicos reflexivos, que permanecem fixos no ambiente. Assim, existem muitos raios invariantes no tempo e apenas uma pequena parte do perfil de multipercurso é afetada por objetos móveis.

Em [88] é descrito um estudo sobre as propriedades dos erros em nível de *bit* e de símbolo em ambientes industriais. Para ambientes com atenuação por multipercurso, os erros são uniformemente distribuídos nos *bits* dos pacotes corrompidos e a memória do canal é de apenas quatro *bits*; ou seja, a duração de um símbolo para o IEEE 802.15.4. O uso de *Forward Error Correction* (FEC) foi proposto. No entanto, a maioria dos pacotes com erro durante os experimentos não chegaram a ser recebidos pelo receptor, em cenários com atenuação por multipercurso. Dessa forma, para obter boa qualidade de serviço é também necessário escolher canais ou rotas que sofrem menos com os efeitos do multipercurso.

3.2.3 Modelagem do Desvanecimento e Atenuação para Longos Períodos de Tempo

O canal sem fio pode ser modelado como estacionário no sentido amplo, por um período curto de tempo, apesar das movimentações ao redor do transmissor e do receptor. No entanto, as características do canal podem mudar significativamente em um período de poucas horas devido a mudanças ocorridas na topologia do ambiente. O movimento de objetos, metálicos ou não, pode causar modificações aleatórias no canal no decorrer do tempo, que não são levadas em consideração nas distribuições utilizadas para modelar canais sem fio sujeitos a problemas de multipercurso. Isso pode requerer novo cálculo dos parâmetros das distribuições, uma vez que esses parâmetros podem se tornar obsoletos no decorrer do tempo [8].

Em [75] uma caracterização do canal em um ambiente industrial foi realizada para avaliar as características do canal em um longo período de tempo (20 horas). Os resultados mostraram que a distribuição de Rice apresenta bom ajuste apenas para pequenos períodos de tempo, em que o valor médio da potência recebida permanece constante. O movimento de uma grande estrutura metálica pode modificar o perfil de multipercurso relacionado ao conjunto de raios que permanecem invariantes por um longo período de tempo, o que modifica o valor médio da potência recebida, embora o transmissor e o receptor permaneçam estáticos. No experimento, a potência recebida variou em torno de -55 dBm durante sete horas, e após esse período o valor médio mudou abruptamente para -46 dBm. Em alguns casos, ocorre também a redução na potência média de forma abrupta. Neste último caso, uma troca de canal ou rota poderia ser

necessária para manter a qualidade do enlace, devido à variação do perfil de multipercursos do ambiente. Um experimento descrito em [76] também apresentou comportamento similar.

Em experimentos realizados durante o desenvolvimento desta tese, comportamento similar no canal sem fio também foi observado. Na Figura 3.4 é possível ver a potência recebida no nó sorvedouro, referente a transmissões de três nós finais em simultâneo. Estes dados foram obtidos durante 50 horas de operação da RSSF no ambiente industrial mostrado na Figura 3.5. O nó sorvedouro dessa RSSF estava posicionado na sala acima da sala onde os nós finais foram instalados.

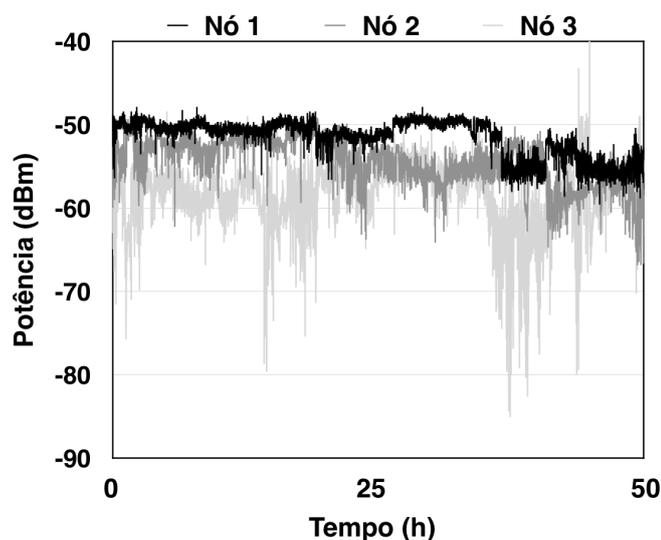


Figura 3.4 Comportamento não estacionário do canal em ambiente industrial.

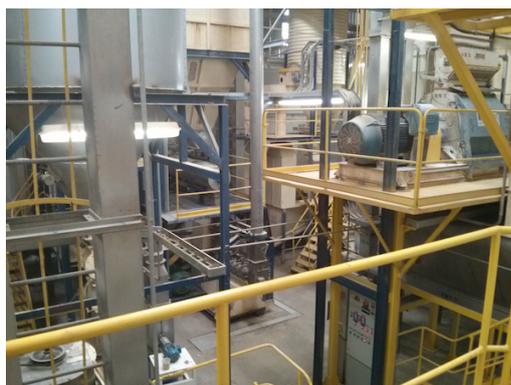


Figura 3.5 Indústria onde os experimentos foram realizados.

Em geral, os valores de potência foram elevados, uma vez que os nós finais estavam posicionados próximos ao nó sorvedouro (aproximadamente 10 m) e a potência de transmissão era igual a 15 dBm. Embora os nós finais estivessem posicionados lado a lado, com menos de um metro de distância de um para outro, é possível observar diferenças nos valores médios obtidos para cada nó, além de mudanças nas características dos canais no decorrer do tempo. Por exemplo, a potência média dos pacotes recebidos a partir do Nó 1 permaneceu maior que o

valor médio dos pacotes recebidos a partir do Nó 2 na maior parte do tempo, mas durante certo intervalo de tempo a potência média para o Nó 2 foi maior. A Figura 3.6 permite analisar em mais detalhes as mudanças bruscas que ocorreram na qualidade do canal para a conexão entre o nó sorvedouro e o Nó 1, considerando um intervalo de 30 min.

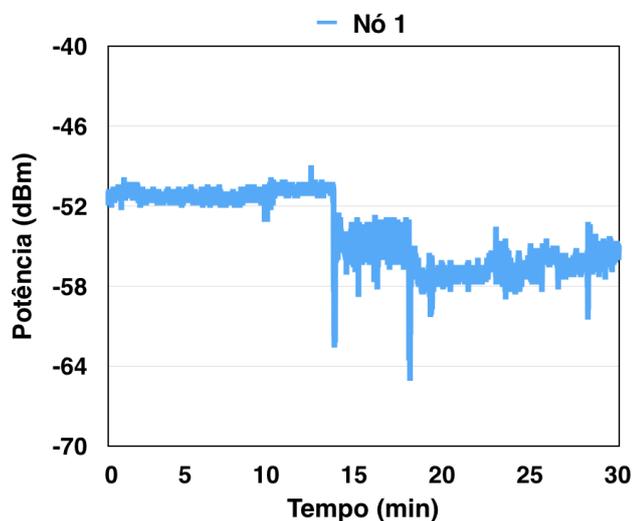


Figura 3.6 Comportamento não estacionário do canal em ambiente industrial para um período de 30 min.

A partir dos resultados pode-se comprovar o comportamento não estacionário do canal para longos períodos de tempo. As mudanças ocorrem de forma independente para diferentes enlaces e para diferentes canais; ou seja, em um certo momento a qualidade de um enlace pode piorar bruscamente, enquanto que a qualidade de outro enlace pode apresentar uma melhora em sua qualidade. Esse aspecto deve ser levado em consideração no projeto de protocolos multicanais adaptativos, que sejam capazes de lidar com as mudanças que ocorrem na qualidade dos canais no decorrer do tempo e sejam capazes de alocar canais com boa qualidade para todos os nós na rede.

Em [8] uma distribuição composta foi usada para capturar tanto os efeitos de sombreamento, que causam modificações no valor médio de potência recebida no decorrer do tempo, quanto as alterações devido à atenuação por multipercurso. O modelo foi denominado Nakagami- m /Log-normal. O parâmetro da distribuição de Nakagami- m define o nível de atenuação e os parâmetros da distribuição log-normal definem o efeito do sombreamento. Dependendo do valor atribuído a m , a distribuição Nakagami- m pode ser aproximada à distribuição de Rice [87].

A validação da distribuição foi realizada utilizando valores obtidos por meio de experimentos em ambientes industriais e considerando a Função Cumulativa de Probabilidade (FCP) das distribuições de probabilidade de Rice, Rayleigh, Nakagami- m , Log-normal e Nakagami- m /Log-normal. A validação foi baseada na cauda inferior, uma vez que a maior parte dos erros de transmissão ocorre para essa faixa de valores [8]. Verificou-se que as distribuições tradicionalmente utilizadas para modelar a atenuação superestimam em até 10 vezes a ocorrência de desvanecimento profundo. A distribuição para sombreamento log-normal apresentou

maior relação com os valores experimentais, no entanto para a região da cauda inferior a distribuição subestimou em 10 vezes a ocorrência de desvanecimento profundo. A distribuição Nakagami- m /Log-normal, por outro lado, conseguiu capturar os efeitos de desvanecimento e sombreamento para um longo período de tempo.

Em [89] foi aplicada detecção de mudança Bayseana no modelo de canal Nakagami- m para capturar as modificações bruscas que ocorrem nas características do canal em um longo período de tempo. A detecção de mudança Bayseana identifica o momento em que a distribuição de probabilidade de um processo estocástico muda. Para validação, foi gerada uma sequência de valores com distribuição Nakagami- m e foi realizada uma segmentação manual em quatro segmentos. Cada segmento apresentou valores diferentes para o parâmetro da distribuição.

Embora os trabalhos descritos em [8] e [89] tenham proposto modelos que capturam as modificações nas características dos canais em um longo período de tempo, os modelos são adequados apenas para a avaliação analítica do desempenho de comunicação, uma vez que ao gerar amostras seguindo as distribuições propostas, os valores instantâneos obtidos não correspondem aos observados na prática, embora a FCP do modelo apresente boa aderência à FCP obtida por meio de dados experimentais. Por isso, no Capítulo 5 é descrito um modelo de simulação, desenvolvido nesta tese, capaz de capturar as modificações nas características dos canais em longos períodos de tempo.

3.2.4 Perfil de Atraso de Potência e Largura de Banda de Coerência

Alguns trabalhos foram realizados para verificar o espalhamento de retardo RMS (*RMS delay spread*) e o espalhamento de retardo máximo (*maximum excess delay*) em ambientes industriais [27,28,90]. O espalhamento de retardo RMS representa a medida do tempo médio de resposta a um impulso no canal de rádio. O espalhamento de retardo máximo provê informações sobre o tempo máximo em que uma componente de multipercorso pode chegar ao receptor após a recepção da primeira componente. Ambientes que apresentam valores altos para essas métricas podem provocar interferência entre símbolos.

Em [27] [28] foram observadas as características de três tipos de ambientes industriais: ambientes muito refletivos, ambientes absorptivos e ambientes que se enquadram entre refletivos e absorptivos. Os resultados mostraram que ambientes refletivos apresentam muito mais componentes de multipercorso e apresentam espalhamento de retardo RMS e espalhamento de retardo máximo maiores em todas as faixas estudadas. Por exemplo, na faixa de 2,4 GHz, observou-se um atraso máximo em excesso de 860 ns no ambiente refletivo e 42 ns no ambiente com características absorptivas. O espalhamento de retardo RMS foi de 294,19 ns e 28,9 ns, respectivamente.

Em [90] foram descritas medições de propagação em ambientes industriais, visando avaliar fatores ambientais que influenciam na qualidade do canal, como a geometria do ambiente e as características dos objetos existentes no ambiente. O espalhamento de retardo RMS para

altas frequências (exemplo: 2,4 GHz) foi de 80 ns no pior caso. A diferença entre esse valor e os valores encontrados em [27] e [28] deve-se ao fato de os experimentos descritos em [90] terem sido realizados com antenas direcionais, o que diminui a quantidade de componentes de multipercurso.

Para ambientes externos o espalhamento de retardo RMS é maior em comparação com o encontrado em ambientes industriais internos. Para os canais de rádio móvel o atraso é da ordem de microssegundos e em ambientes internos os atrasos são na ordem de nanossegundos [85]. Como os rádios utilizados em RSSF possuem uma taxa de símbolos relativamente baixa, interferência intersimbólica pode não ser um problema para essas redes em ambientes internos. Por exemplo, o Padrão IEEE 802.15.4 apresenta uma taxa de símbolos de 62,5 *kbaud* na faixa de 2,4 GHz, o que representa um período de símbolo de 16 μs [91].

A largura de banda de coerência é o intervalo de frequência (Δf) em que os componentes de frequência são correlacionados. Dois sinais transmitidos em frequências que possuem separação maior que Δf são afetados de maneira diferente pelo ambiente [92]. A largura de banda de coerência pode ser definida como [93]

$$\Delta f \approx \frac{1}{\alpha \tau_{rms}}, \quad (3.6)$$

em que τ_{rms} é o espalhamento de retardo RMS, em segundos, e α é um fator que pode variar de acordo com a forma do perfil de atraso de potência.

O valor de α pode ser igual a 50 quando a correlação entre frequências é maior que 90% ou igual a 5 quando a correlação entre frequências é maior que 50% [94]. Considerando $\tau_{rms} = 294,19 \text{ ns}$ para um ambiente industrial [27] e considerando $\alpha = 5$, $\Delta f \approx \frac{10^9}{5 \times 294,19} \approx 680 \text{ kHz}$.

O Padrão IEEE 802.15.4 define 16 canais na faixa de 2,4 GHz, com largura de banda de 2 MHz e espaçamento entre canais de 5 MHz. Dessa forma, os canais são fracamente correlacionados em frequência. Experimentos descritos em [95] mostram que trocar o canal de comunicação pode levar a uma diferença de até 30 dB na potência recebida, em um ambiente de escritório. Em [96] são descritos experimentos para uma curta distância, em um ambiente sem efeitos de multipercurso e com visada direta. Mesmo considerando as características ideais do ambiente, diferenças de até 10 dB foram observadas para alguns canais. Nos experimentos descritos em [97], em um ambiente de escritório, foi observado que para distâncias maiores que 6,5 m entre transmissor e receptor, mesmo os canais adjacentes são descorrelacionados. Essa diferença pode ser ainda maior em canais com grande espalhamento de retardo RMS, como é o caso de muitos ambientes industriais.

Além do efeito do ambiente, os nós sensores possuem padrões de radiação que podem mudar significativamente de um canal para outro. Nos experimentos descritos em [96], para um ambiente *outdoor*, verificou-se que o Canal 11 apresentou melhor qualidade devido ao padrão de radiação da antena. Em experimentos *indoor* verificou-se que, em geral, o Canal 11 é me-

lhor, no entanto para algumas posições, a qualidade do Canal 11 foi bem pior em comparação como outros canais. Isso é explicado pelo efeito do perfil de multipercursos nos diferentes canais. Dessa forma, esses dois aspectos juntos, o padrão de radiação do nó sensor e os efeitos do ambiente, influenciam a qualidade do canal sem fio. Além disso, deve-se considerar a influência de fontes de interferência e a assimetria para determinar a qualidade dos canais de forma holística.

Experimentos realizados nesta tese também verificaram os efeitos da decorrelação entre os canais. Na Figura 3.7 são mostrados os valores de potência de recepção para pacotes recebidos em nove diferentes canais. Os valores foram filtrados utilizando um filtro da média, com janela de 20 amostras, de modo a permitir uma melhor análise do efeito do sombreamento em cada canal. No experimento, o receptor recebeu pacotes em cada canal durante três minutos, com uma taxa de 1 pacote/s. O transmissor (Figura 3.8) foi posicionado a 23 metros de distância do receptor. Foram utilizados rádios IEEE 802.15.4 (MRF24J40MA, da microchip) com potência de transmissão de 0 dBm e uma antena com 2,09 dBi de ganho. Os nós foram configurados remotamente utilizando um terceiro nó, que foi projetado para comunicar a cada nó envolvido no experimento o canal a ser utilizado em cada replicação. Isso foi feito para evitar modificações na posição dos nós envolvidos no experimento.

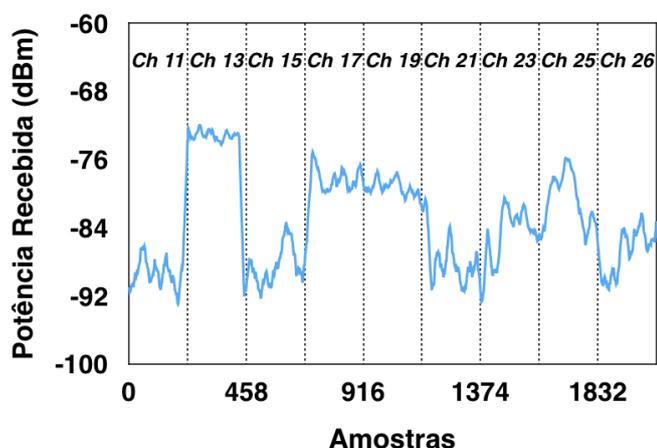


Figura 3.7 Resultado experimental com canais decorrelacionados.

É possível observar que o perfil de multipercursos afeta de forma diferente cada canal. Por exemplo, os canais 11 e 13 apresentaram uma diferença de aproximadamente 15 dB no valor médio de potência recebida.

Outro experimento foi realizado para investigar a Taxa de Recepção de Pacote (TRP) para diferentes canais, considerando nós estáticos, na indústria mostrada na Figura 3.8. Dois nós (transmissor e receptor) foram configurados para operar no Canal 11 e o transmissor foi configurado para transmitir pacotes durante 60 segundos. Após isso, os nós mudaram para o Canal 19 e o transmissor transmitiu pacotes durante 60 segundos. O transmissor e o receptor foram posicionados a 30 metros de distância, sem linha de visada direta. O resultado desse experimento pode ser visto na Figura 3.9. A TRP foi igual a 91% para o Canal 11 e igual a 51% para o

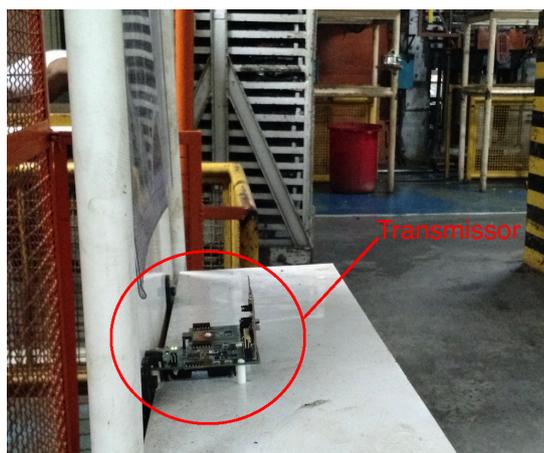


Figura 3.8 Ambiente onde os experimentos foram realizados.

Canal 19. É possível notar que, mesmo para o mesmo ambiente, distância, e praticamente o mesmo tempo, os canais apresentaram características bem distintas neste experimento, o que provocou uma diferença significativa no desempenho de comunicação.

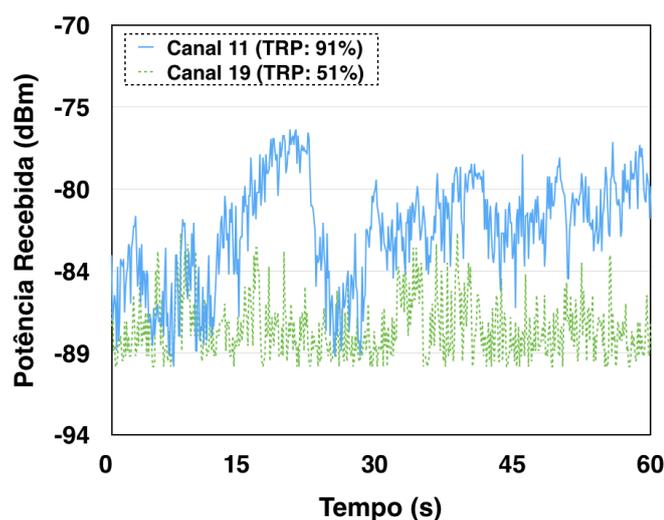


Figura 3.9 Potência recebida obtida nos experimentos utilizando diferentes canais.

Existem três soluções para lidar com as variações na qualidade dos enlaces em uma RSSF: modificar a posição dos nós, modificar a rota ou trocar de canal. As duas primeiras soluções não são aplicáveis em muitos casos, enquanto que a terceira solução sempre é possível. Experimentos descritos em [98] mostraram que para redes que utilizam múltiplos saltos, comunicação multicanal e roteamento adaptativo apresentaram desempenho similar para redes muito densas, mas para redes esparsas, o uso de comunicação multicanal apresentou melhor desempenho, uma vez que para esse cenário o roteamento adaptativo apresenta menor flexibilidade. Para redes com topologia em estrela, alocação dinâmica de canais pode ser a única alternativa. Como discutido no Capítulo 2, redes em estrela podem ser implementadas utilizando todos os padrões

para RSSFI. O modo LLDN do IEEE 802.15.4e, em seu formato original, só permite redes em estrela.

Além disso, embora trocar a rota ou a posição dos nós possa ser útil para lidar com problemas de atenuação por multipercurso e sombreamento, em alguns casos esses mecanismos não são capazes de lidar com problemas de interferência. As RSSFIs usualmente são planejadas e fazem uso de topologias em estrela, em árvore ou topologias em malha com rotas redundantes, com decisões centralizadas e estáticas de roteamento. Quando não é possível modificar a posição ou a rota de um nó, trocar o canal de comunicação pode melhorar a qualidade do enlace, considerando a decorrelação entre os diferentes canais.

3.3 Avaliação da Comunicação Multicanal em um Ambiente Industrial *Outdoor*

No decorrer da tese, vários resultados experimentais são descritos, obtidos principalmente em ambientes industriais *indoor*, como é o caso dos resultados mostrados nas outras seções deste capítulo e os resultados mostrados no Capítulo 6. Nesta seção, as características do canal sem fio são analisadas por meio de experimentos realizados em um ambiente industrial *outdoor*.

Mesmo considerando os mecanismos definidos pelos padrões discutidos no Capítulo 2 para lidar com os problemas de confiabilidade em RSSFIs, faz-se necessário discutir em mais detalhes as características do canal sem fio nos ambientes industriais, de modo a implantar essas redes de forma adequada. Por exemplo, quando usando salto em frequência, os nós geralmente saltam para um novo canal antes de cada transmissão. No entanto, sem um gerenciamento adequado da lista negra o desempenho da rede pode ser degradado de forma significativa [18]. Problemas relacionados à variação espacial na qualidade dos canais podem também afetar significativamente o desempenho de protocolos baseados em *beacon*, como é o caso do protocolo definido no modo DSME do IEEE 802.15.4e [19].

Baseado nos resultados experimentais descritos nesta seção, comentários sobre possíveis problemas e soluções para a implantação de RSSFIs, de acordo com as características dos diversos padrões definidos para esse tipo de rede, são discutidos. No Capítulo 7 um novo protocolo para RSSFI é proposto, que leva em consideração todas as características e problemas discutidos neste capítulo.

3.3.1 Metodologia do Experimento

Os nós sensores utilizados neste experimento possuem um transceptor MRF24J40MA, da microchip, com potência de transmissão de 0 dBm, uma antena PCB com ganho de 2,09 dBi e um micro-controlador PIC18F46J50. Oito nós finais (Nó 1 ao Nó 8) e um coordenador (Nó 9) foram posicionados no ambiente industrial *outdoor* ilustrado na Figura 3.10, de acordo com o esquemático mostrado na Figura 3.11. O ambiente industrial consiste em uma unidade de

tratamento de água e estação de injeção, que trata a água que vem junto com o petróleo, a partir de um campo de exploração, e envia a água, pressurizada, para um grupo de plataformas posicionadas a cerca de 25 km da estação, onde a água tratada é injetada dentro de um reservatório de hidrocarboneto. Durante os experimentos a estação estava operando normalmente. Os nós sensores foram posicionados ao lado de sensores cabeados que atualmente estão instalados na unidade. Na Figura 3.12 são mostrados dois nós sensores posicionados dentro da unidade industrial, ao lado dos sensores atualmente instalados.



Figura 3.10 Ambiente onde o experimento foi realizado.

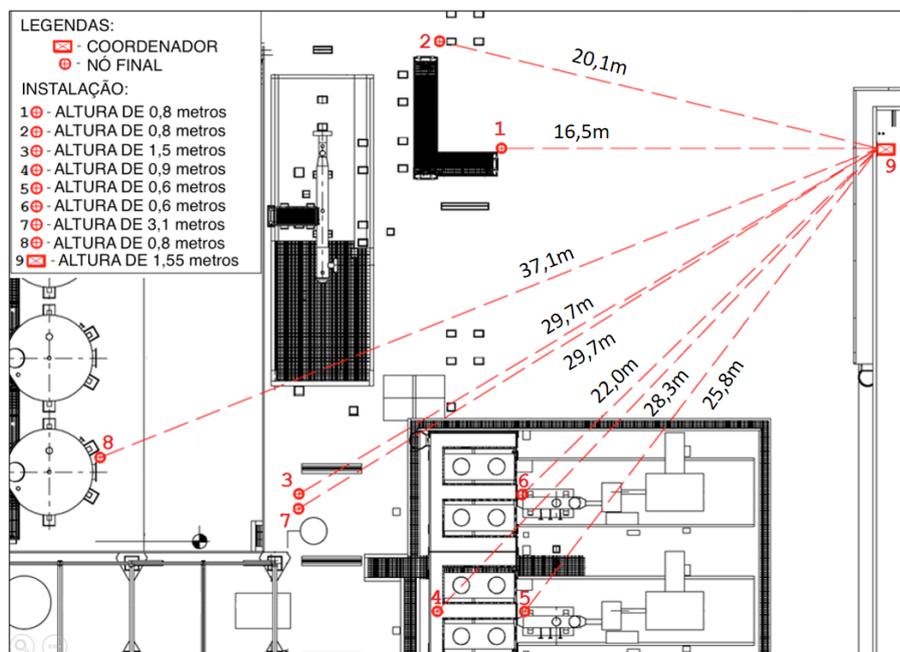


Figura 3.11 Esquemático do ambiente.

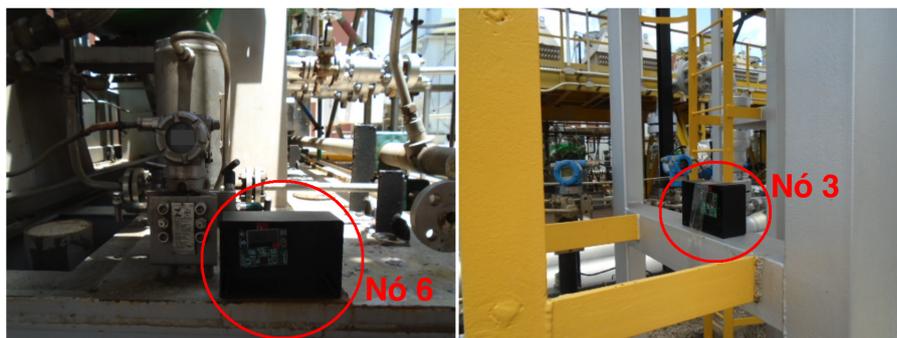


Figura 3.12 Nós sensores instalados na unidade industrial.

Para permitir que os nós se comuniquem utilizando todos os canais, e sem colisões, um protocolo simples baseado em TDMA e salto em frequência foi implementado. No protocolo, o acesso ao meio é realizado baseado em uma estrutura chamada *slotframe*, semelhante à definida pelo TSCH, mas com uso de pacotes de *beacon* a partir do coordenador para sincronizar os nós finais em cada ciclo. A estrutura de *slotframe* é ilustrada na Figura 7.7.

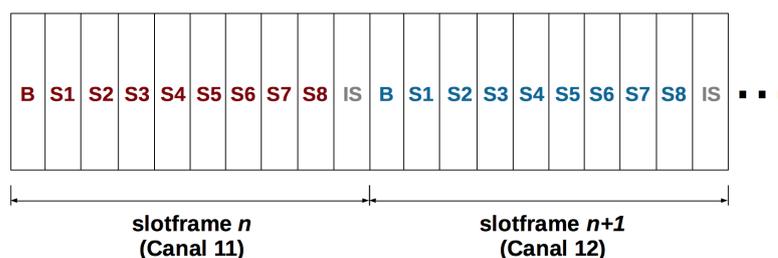


Figura 3.13 Estrutura de *slotframe* do protocolo implementado.

O *slotframe* se repete continuamente e é composto por 10 intervalos de tempo, um dedicado para cada nó na rede. No primeiro intervalo o coordenador transmite um pacote em *broadcast* (o pacote *beacon*) para todos os nós finais da rede, e espera por pacotes de dados que são transmitidos nos oito intervalos de tempo seguintes (*S1* a *S8*). Existe um intervalo inativo no final do *slotframe* (*IS*). Quando um nó final recebe um pacote *beacon* a partir 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 a duração de 100 ms. Esse protocolo foi desenvolvido para permitir a caracterização da comunicação utilizando múltiplos canais, para diferentes nós, em simultâneo, mas não foi desenvolvido considerando qualquer aplicação em específico.

Em cada *slotframe* um canal diferente é utilizado, de forma sequencial. Para acomodar o uso de salto em frequência, é necessário implementar um mecanismo para manter a rede sincronizada em caso de falha durante a recepção dos *beacons*. Para isto, um temporizador é utilizado nos nós finais para identificar que um *beacon* foi perdido. O coordenador envia um novo pacote *beacon* a cada 1 segundo, e o temporizador é configurado para expirar após 1,1 segundos. Se o nó receber um novo *beacon* antes de o temporizador expirar, ele é reiniciado.

Caso contrário, o nó passa a usar o próximo canal e espera pelo próximo *beacon*, o que mantém a sincronização.

Após a recepção de um *beacon*, os nós finais obtêm o RSSI do *beacon* e transmitem essa informação de volta para o coordenador. 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. Dessa forma, é possível observar as variações espaciais na qualidade dos canais dos enlaces entre o coordenador e todos os nós finais, bem como problemas de assimetria nos enlaces.

Os valores de RSSI providos pelo transceptor MRF24J40 variam entre 0 e 255. A folha de dados 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, é possível analisar as características dos canais e tirar importantes conclusões sobre a comunicação multicanal em um ambiente industrial *outdoor*.

Dois experimentos foram realizados, em dois dias diferentes, com os nós posicionados no mesmo lugar. A rede operou durante cerca de 4 h e 11 h, no primeiro e segundo dias, respectivamente. 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.

3.3.2 Resultados

A potência de recepção média e o desvio padrão para cada nó são mostrados na Figura 3.14, considerando os dados obtidos no experimento realizado no primeiro dia. É possível verificar que a potência média de recepção pode variar significativamente, mesmo para canais adjacentes e para o mesmo nó. Por exemplo, para o Nó 1 as diferenças para alguns canais foram maiores que 10 dB (ex: Canal 20 e Canal 25). Para os nós 4 e 5, que estavam posicionados em um local com muitas obstruções e sem linha de visada direta (como pode ser visto na Figura 3.11), nenhuma comunicação ocorreu enquanto os nós estavam operando no Canal 22, devido a um problema de desvanecimento profundo no canal, para alguma das direções (ou as duas) do enlace. A qualidade de todos os canais foi baixa para o Nó 5, mas para o Nó 4 alguns canais apresentaram boa qualidade, como o Canal 17. Problemas de desvanecimento profundo também ocorreram em 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.

A partir da Figura 3.14 também é possível analisar as variações espaciais na qualidade dos canais. Como um exemplo, os valores de potência de recepção para os nós 3 e 7 são analisados em detalhes para dois canais diferentes. Esses nós foram posicionados a uma mesma distância do coordenador, e com 1,6 m de diferença na altura. O Canal 17 apresentou alta qualidade para

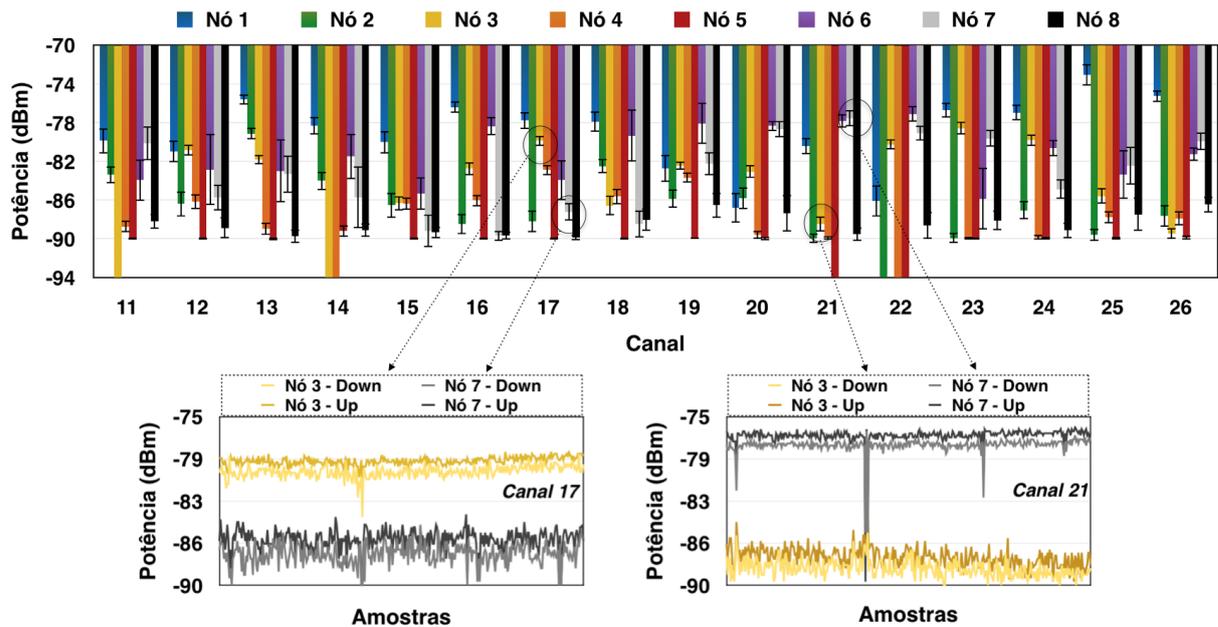


Figura 3.14 Variações espaciais na qualidade dos canais para diferentes nós, no primeiro dia de experimentos.

o Nó 3, mas uma qualidade significativamente menor para o Nó 7. Por outro lado, o Canal 21 apresentou alta qualidade para o Nó 7, mas uma baixa qualidade para o Nó 3. Na Figura 3.14 são mostrados os valores de potência de recepção para os dois sentidos dos enlaces. Existe uma alta correlação entre os valores observados nos dois sentidos, mas com uma pequena diferença no valor médio. Quando a potência de recepção está próxima ao limiar de sensibilidade do transceptor, como é o caso do Canal 21 para o Nó 3, essas pequenas diferenças podem provocar problemas de assimetria na qualidade do enlace, em que a taxa de entrega de pacote em uma das direções é significativamente inferior do que na outra.

Como evidenciado pelos resultados apresentados, é difícil garantir boa qualidade de serviço para todos os nós na rede quando apenas um canal é utilizado em toda a rede, como ocorre nos protocolos de acesso ao meio definidos pelo Padrão IEEE 802.15.4.

Mesmo para os novos padrões desenvolvidos para RSSFI, alguns problemas podem surgir devido às variações espaciais na qualidade dos canais, bem como problemas de assimetria. Por exemplo, no modo LLDN do Padrão IEEE 802.15.4e, acesso baseado em TDMA é usado para evitar colisões, considerando uma topologia em estrela e uma simples estrutura de *superframe*, de modo a alcançar valores de latência muito baixos [72]. No entanto, apenas um único canal é utilizado para todos os nós finais. Uma possível solução é utilizar múltiplos nós sorvedouros, em que cada um utiliza um canal diferente. Neste caso, quando o canal em uso por um determinado nó final passa a apresentar baixa qualidade, este nó pode trocar o canal e passar a se comunicar com outro nó sorvedouro. Para isto, algum mecanismo para estimar a qualidade dos enlaces em tempo real precisa ser utilizado, como a solução descrita nesta tese, no Capítulo 6. Também é necessário definir algum mecanismo para sincronizar a operação dos nós e a alocação dos

intervalos de tempo, em cenários com múltiplos nós sorvedouros. O protocolo descrito em [74] utiliza topologia em árvore e comunicação multicanal para redes LLDN, com seleção adaptativa de canal, mas o mesmo canal é utilizado dentro das sub-redes, de modo que ainda podem ocorrer problemas devido à variação espacial na qualidade dos canais dentro das sub-redes.

Mesmo para os protocolos que utilizam salto em frequência ou adaptação de canal, alguns problemas podem aparecer. Por exemplo, o modo TSCH do Padrão IEEE 802.15.4e, bem com os protocolos definidos nos padrões WirelessHART e ISA100.11a, usam TDMA e salto em frequência. Nesta abordagem, todos os canais podem ser utilizados pelo nós para realizarem as transmissões. No entanto, deve haver um correto gerenciamento da lista negra para garantir bom desempenho.

Um problema enfrentado na configuração da lista negra é que quando um canal é colocado na lista todos os nós param de usá-lo. Por exemplo, no resultado mostrado na Figura 3.14 o Canal 21 apresenta baixa qualidade para quatro nós, e poderia ser colocado na lista negra. No entanto, este canal é o que apresenta melhor qualidade para o Nó 7 e também apresenta boa qualidade para os nós 1 e 6. Caso o Canal 21 fosse colocado na lista negra, a qualidade de serviço para os nós 1, 6 e 7 poderia ser reduzida. Quando a qualidade de um canal é afetada por fontes de interferência externa, como considerado na solução descrita em [66], colocar um canal na lista negra para toda a rede pode ser uma boa solução, mas quando a variação espacial devido a problemas de multipercurso é considerada, realizar um bom gerenciamento da lista negra se torna uma tarefa mais desafiadora.

O modo DSME do Padrão IEEE 802.15.4e emprega salto em frequência ou adaptação de canal, durante os períodos livre de contenção. Utilizando 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 dado par de transmissor e receptor. Além disso, o mesmo canal pode ser utilizado por um longo período de tempo, caso não ocorra queda de qualidade. As redes DSME utilizam *beacons*, que são pacotes transmitidos em *broadcast* para sincronizar todos os nós da rede. O padrão define que um único canal deve ser utilizado para a transmissão dos *beacons*, bem como para as transmissões no período de acesso por contenção [16]. 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.

Na Figura 3.15 é realizada uma comparação entre os resultados obtidos nos dois dias. Na Figura 3.15(a) é mostrada a potência média recebida e a variância para todos os canais. A variância foi alta em todos os canais, uma vez que o mesmo canal apresenta características diferentes para os diferentes enlaces. Na Figura 3.15(b) é mostrada a potência média recebida e

a variância para os oito diferentes enlaces, considerando os 16 canais. Há também uma variância significativa, devido às diferenças nas características dos diferentes canais em cada enlace.

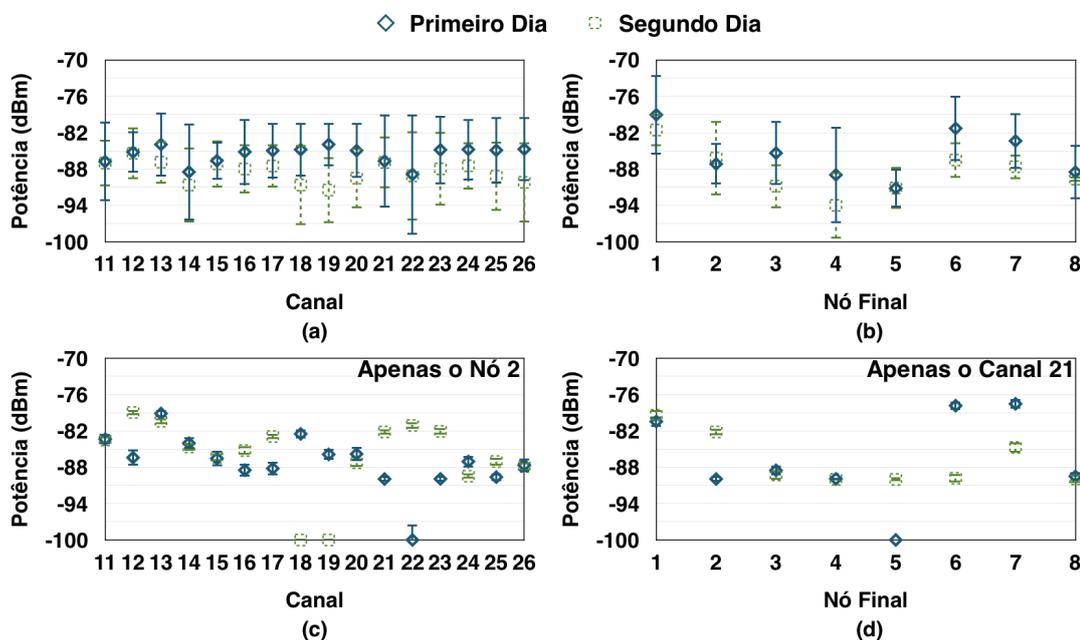


Figura 3.15 Resultados comparativos entre os dois dias de experimento.

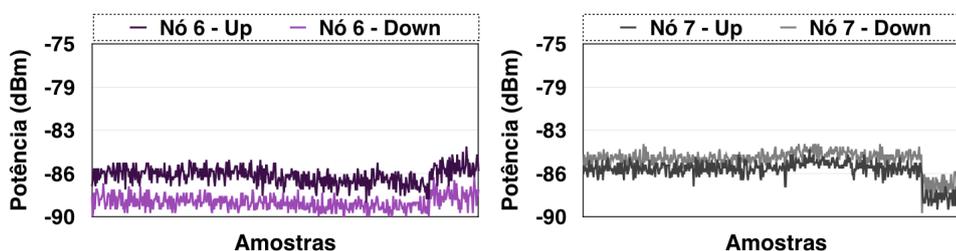


Figura 3.16 Mudança abrupta nas características do canal.

Na Figura 3.15(c) pode-se analisar os resultados para um nó específico (Nó 2) e para todos os canais em ambos os dias. Vale ressaltar que enquanto alguns canais tiveram um aumento na 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 profundo durante o segundo dia. Na Figura 3.15(d) pode-se analisar os resultados para um canal específico (Canal 21), e para os oito diferentes enlaces. É possível notar que as características dos canais variam de forma 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 maior qualidade no segundo dia para o Nó 2 em comparação com o primeiro dia.

Algumas variações abruptas na potência de recepção de alguns nós e canais também foram observadas durante o segundo dia, como pode ser visto na Figura 3.16. A qualidade do Canal 24 diminuiu após algum tempo para o Nó 7, enquanto que ao mesmo tempo a qualidade deste

mesmo canal aumentou para o Nó 6. Novamente, observou-se uma elevada correlação entre as duas direcções dos enlaces, mas com uma pequena diferença no valor médio de cada direcção do enlace.

O gráfico na Figura 3.17 relaciona a perda de percurso com a distância (d) entre transmissor e receptor, em que d_0 é a distância de referência. Os valores obtidos para o Nó 1 foram utilizados como referência ($d_0 = 16,5$ m).

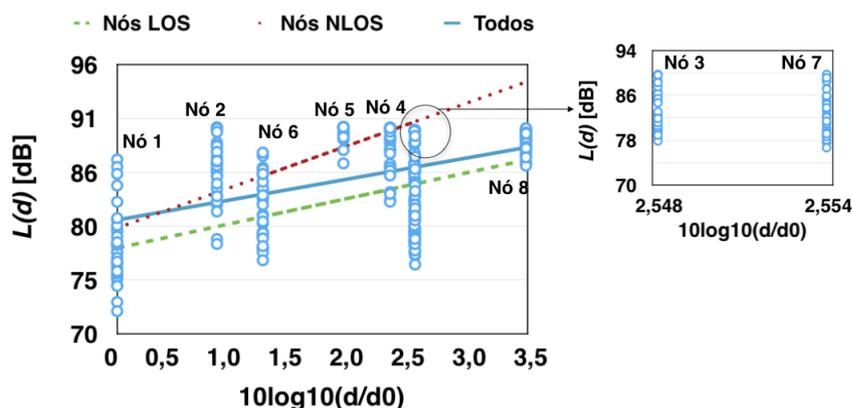


Figura 3.17 Relação entre a perda de percurso e a distância entre transmissor e receptor.

A partir deste experimento, o expoente de perda (n), o sombreamento log-normal (σ), e a perda de percurso na distância de referência $L(d_0)$ foram obtidos. Esses parâmetros podem ser aplicados na Equação 3.2 para obter a perda de percurso nos ambientes estudados. As curvas do modelo são mostradas na Figura 3.17 considerando três diferentes cenários: com todos os nós, apenas com os nós com linha de visada direta (Nódos LOS) (nós 3, 6, 7 e 8) e apenas com os nós sem linha de visada direta (Nódos NLOS) (nós 2, 4 e 5). O Nó 1 foi considerado em todos os casos como referência.

Tabela 3.2 Parâmetros do modelo de sombreamento log-normal.

	Expoente de Perda (n)	Sombreamento Log-normal (σ)	$L(d_0)$
Todos	2,0	4,53 dB	81,182 dB
Nódos LOS	2,43	4,54 dB	78,351 dB
Nódos NLOS	4,03	4,98 dB	80,352 dB

A Tabela 3.2 contém os parâmetros obtidos para os três cenários. Esses valores podem ser utilizados para simular RSSFIs *outdoor*. Para permitir uma simulação mais realista, é importante considerar todos os aspectos e conclusões discutidos neste capítulo, e também nós com linha de visada e sem linha de visada, com diferentes parâmetros para a perda de percurso e sombreamento. Além disso, os níveis de sombreamento em cada canal para os diferentes enlaces precisam ser modificados ao longo do tempo. Às vezes podem ocorrer mudanças abruptas nas características dos canais e as modificações ocorrem de forma diferente para os diferentes

canais e enlaces. Os protocolos para RSSFI precisam ser capazes de lidar com essas variações temporais e espaciais para manter uma boa qualidade de serviço ao longo do tempo.

3.4 Conclusões do Capítulo

Este capítulo apresentou os desafios para a implantação de RSSFs em ambientes industriais. As RSSFIs podem ser empregadas em diversas aplicações de monitoramento e controle na indústria, oferecendo uma solução de baixo custo e grande flexibilidade, quando comparadas com soluções que utilizam redes cabeadas.

Devido às características dos ambientes industriais, que apresentam muitos equipamentos e obstruções, problemas de interferência e atenuação podem surgir, tornando a qualidade de serviço dessas redes muito baixa em alguns casos. Para resolver o problema de falta de confiabilidade, novos mecanismos e protocolos, que levam em consideração as variações temporais e espaciais na qualidade dos canais, devem ser desenvolvidos. Também deve-se levar em consideração a decorrelação entre canais diferentes e problemas de assimetria de enlace. Neste capítulo vários resultados experimentais, obtidos a partir de estudos realizados durante o desenvolvimento desta tese, foram descritos, incluindo resultados em ambientes industriais *indoor* e *outdoor*.

É possível lidar com os problemas descritos neste capítulo por meio do uso de protocolos que permitam que a rede se adapte às variações que ocorrem na qualidade dos enlaces no decorrer do tempo. Alguns trabalhos focam no uso de roteamento adaptativo, em que os nós trocam de rota quando a qualidade da rota em uso se torna baixa, como é o caso do *Collection Tree Protocol* (CTP) [10]. Outros trabalhos focam no uso de alocação dinâmica de canais, em que os nós trocam o canal de comunicação quando o seu enlace com o receptor passa a apresentar baixa qualidade [11,99]. O Capítulo 4 apresenta uma discussão mais detalhada sobre protocolos multicanais e alocação dinâmica de canais.

Para avaliar protocolos para RSSFI, é necessário implementar modelos de simulação realistas, que levam em consideração os aspectos discutidos neste capítulo. No Capítulo 5 é descrito um novo modelo de simulação, que é capaz de capturar os efeitos de desvanecimento em larga escala, atenuação em pequena escala, sombreamento log-normal e as características não-estacionárias do canal sem fio em longos períodos de tempo. O modelo também considera as diferenças nas características dos diferentes canais e a assimetria dos enlaces. A partir do modelo, é possível simular protocolos multicanais para RSSFI de forma mais realista.

CAPÍTULO 4

Protocolos Multicanais e Estimação de Qualidade de Enlace em RSSF

Uma alternativa para lidar com os problemas da comunicação sem fio em ambientes industriais, e com a variação na qualidade dos canais no decorrer do tempo, é o desenvolvimento de protocolos que utilizam múltiplos canais. O uso de protocolos multicanais permite alcançar uma melhor utilização do espectro, aumentando a capacidade de transmissão da rede por meio da transmissão em simultâneo usando vários canais diferentes. Também é possível lidar com as variações espaciais na qualidade dos canais [100].

Algumas soluções usam múltiplos canais simultaneamente, com múltiplos transceptores nos nós, ou com a transmissão por diferentes canais em diversos locais da rede [54]. Outras soluções utilizam salto em frequência, como os protocolos definidos nos padrões WirelessHART, ISA100.11a e alguns modos do IEEE 802.15.4e [12, 13, 17]. Esses mecanismos são tipicamente implementados na camada MAC. Alguns trabalhos focam no uso de mecanismos de alocação dinâmica de canais [11, 99, 101], em que a RSSF troca de canal sob demanda, se a qualidade do canal em uso se torna baixa.

Nas próximas seções são discutidas as arquiteturas geralmente utilizadas para a implementação de protocolos multicanais e as diferenças das abordagens estáticas, dinâmicas e semidínamicas. Também são discutidas estratégias para estimação de qualidade de enlace para RSSF.

4.1 Arquiteturas de RSSFs Multicanais

Os protocolos multicanais possuem uma grande dependência da arquitetura da RSSF. A arquitetura mais simples que pode ser utilizada para a implementação de protocolos multicanais é baseada em uma rede com topologia em estrela, em que os nós finais são agrupados em um conjunto de sub-redes [50]. Cada sub-rede pode operar em um canal diferente. Na Figura 4.1 é ilustrado um exemplo dessa arquitetura, considerando a existência de três sub-redes.

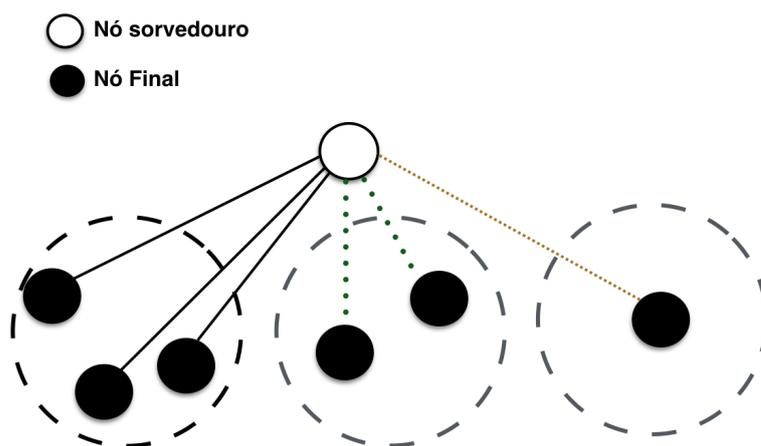


Figura 4.1 Arquitetura baseada em topologia estrela.

Caso um canal diferente seja utilizado em cada sub-rede, é possível se adaptar às variações espaciais na qualidade dos canais para as sub-redes diferentes, mas não é possível lidar com as variações espaciais dentro das sub-redes em alguns casos. Caso o nó sorvedouro possua apenas um transceptor, é necessário algum mecanismo de sincronização para permitir que o nó sorvedouro esteja no canal correto no momento de receber dados a partir dos nós de cada sub-rede. Nesse caso, não é possível que transmissões em simultâneo em canais diferentes ocorram. Se o nó sorvedouro for equipado com múltiplos transceptores, os nós de sub-redes diferentes podem transmitir em simultâneo. Caso seja feita uma alocação inteligente dos canais para cada sub-rede, não há interferência entre nós finais de sub-redes diferentes, mas pode haver interferência entre nós de uma mesma sub-rede, caso estratégias baseadas em contenção sejam utilizadas. Colisões podem ser evitadas por meio de acesso baseado em TDMA, como empregado na maioria dos protocolos definidos pelos novos padrões para RSSFI.

Devido às variações nas características dos canais que ocorrem em longos períodos de tempo, como discutido no Capítulo 3, para que a rede continue operando com certo nível de qualidade de serviço durante todo o tempo, pode ser necessário empregar estratégias para alocação dinâmica de canais para as sub-redes. A alocação deve levar em consideração a topologia da rede, de modo a evitar que sub-redes vizinhas utilizem o mesmo canal. Deve também existir algum mecanismo para estimar a qualidade dos enlaces em cada sub-rede, uma vez que pode haver variação espacial na qualidade dos canais. Também podem ocorrer problemas de variação espacial na qualidade dos canais dentro das sub-redes. Neste caso, deve-se escolher canais que ofereçam um mínimo de qualidade de serviço para todos os nós dentro da sub-rede. Outra estratégia é definir um canal independente para cada nó dentro de cada sub-rede ou utilizar salto em frequência. Em todos os casos, deve-se realizar a alocação de canais e o escalonamento do acesso aos canais de modo a evitar colisões entre as diferentes sub-redes.

A arquitetura ilustrada na Figura 4.1 é simples, mas apresenta pouca flexibilidade e não permite que ocorram transmissões em simultâneo dentro de uma mesma sub-rede, o que pode inviabilizar aplicações que requerem altas taxas de transferência [50]. Uma alternativa mais

flexível é a utilização de uma arquitetura em três camadas, em que cada sub-rede se comunica com um nó intermediário, denominado agregador ou líder de grupo (*Cluster Head – CH*). Com essa arquitetura é possível que haja comunicação em simultâneo em diferentes sub-redes e o CH de cada cluster fica responsável por agregar os pacotes dos nós finais para encaminhar para o nó sorvedouro. Para aumentar a capacidade da rede, o CH pode ser equipado com múltiplos transceptores, de modo que cada sub-rede pode ser subdividida. Nesse cenário, que é ilustrado pela Figura 4.2, os nós finais de cada sub-rede podem transmitir em simultâneo utilizando canais diferentes e os nós CH também podem transmitir em simultâneo para o nó sorvedouro, caso ele também possua múltiplos transceptores. As RSSFIs geralmente podem ser implantadas de forma planejada e os nós sorvedouro e CH podem ser instalados em locais com alimentação disponível.

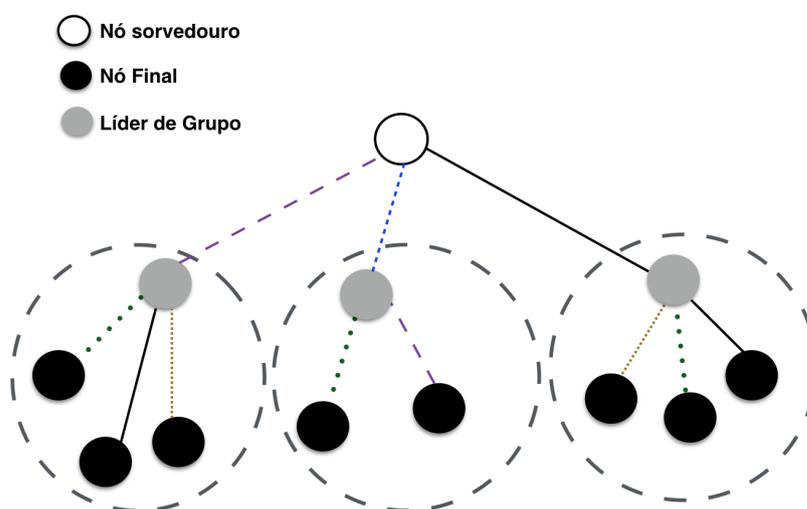


Figura 4.2 Arquitetura em três camadas.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 cada traçado diferente representa um canal diferente. Pode-se observar na Figura 4.2 que um mesmo canal pode ser utilizado em diferentes sub-redes. Isso se deve à limitação na quantidade de canais disponíveis. No entanto, o mecanismo de alocação de canais deve tentar reutilizar canais ao mesmo tempo em que minimiza a interferência entre os nós.

Uma possível evolução da arquitetura em três camadas é o uso de uma rede em malha entre os nós CH. Esse tipo de arquitetura pode ser empregada para redes que abrangem uma grande área geográfica [50]. A melhor arquitetura a ser utilizada depende dos requisitos da aplicação sendo considerada. Como as RSSFIs podem ser implantadas de maneira planejada, deve-se analisar as características das aplicações e as restrições existentes antes de definir a arquitetura a ser utilizada.

4.2 Classificação de Protocolos Multicanais

Os protocolos multicanais podem ser divididos em estáticos, dinâmicos e semidinâmicos [100]. Essa classificação considera RSSFs em que os nós sensores possuem apenas um transceptor,

com exceção do nó sorvedouro ou dos nós CH, em alguns casos. Esse cenário é o mais comum, uma vez que os nós sensores precisam ter baixo custo. A classificação possui relação com a frequência em que ocorre troca de canais na rede.

4.2.1 Protocolos Estáticos

As abordagens estáticas são as mais simples de implementar, uma vez que nenhum mecanismo de sincronização é necessário para garantir a comunicação entre os nós durante o funcionamento da rede. Além disso, nesses mecanismos não existe sobrecarga relacionada à troca de canais. Embora esses protocolos permitam otimizar a rede no momento da sua implantação, alocando canais de forma inteligente em diferentes partes da rede, eles não possuem a capacidade de se adaptar a variações nas características dos canais no decorrer do tempo, uma vez que a alocação dos canais é feita apenas no momento da configuração inicial da rede.

O protocolo *Tree-Based Multi-Channel Protocol* (TMCP) [102] é um exemplo de protocolo multicanal estático. No artigo são descritos experimentos que mostram que o uso de protocolos multicanais dinâmicos e síncronos podem ser inviáveis para RSSFs devido à sobrecarga necessária para manter sincronia de relógio entre os nós e à sobrecarga para trocas frequentes de canais. Para manter um bom desempenho se faz necessário executar algoritmos para resincronização da rede de forma constante, o que é muito custoso para os nós sensores, que possuem poucos recursos computacionais, e também pode atrapalhar o funcionamento de aplicações que requerem altas taxas de transmissão de dados. O primeiro passo do protocolo TMCP é a divisão da RSSF em subárvores disjuntas (ou sub-redes), possuindo o nó sorvedouro como raiz. Para construir as subárvores foi utilizado o algoritmo de busca em largura. Após isso, canais ortogonais são alocados para cada subárvore.

O algoritmo permite aumentar a taxa de transferência da rede por meio da transmissão em simultâneo nas diferentes subárvores, mas não é capaz de eliminar a interferência entre nós de uma mesma subárvore. Uma limitação do trabalho é que as variações dinâmicas na qualidade dos canais não são levadas em consideração. Em ambientes dinâmicos, como ambientes industriais, as características dos canais podem mudar drasticamente no decorrer do tempo, o que pode implicar em mudanças de topologia, devido à perda de conectividade entre nós. Além disso, os canais podem apresentar baixa qualidade em certos períodos de tempo, o que inviabilizaria a utilização desses canais em alguns momentos. Em [103] também é utilizada uma abordagem estática para alocação de canais baseado em subárvores disjuntas, visando minimizar o atraso da rede.

4.2.2 Protocolos Dinâmicos

Os protocolos multicanais dinâmicos permitem o uso de múltiplos canais em simultâneo, visando diminuir colisões por meio de estratégias de escalonamento que evitem que um mesmo canal seja utilizado em um mesmo intervalo de tempo por nós que podem causar interferência

entre si. Esses protocolos necessitam de um mecanismo de sincronização para garantir que o transmissor e o receptor estejam no mesmo canal no momento da comunicação.

Além da necessidade de sincronização, alguns problemas podem aparecer nessas abordagens, como problemas para transmissão de pacotes em *broadcast* e problemas para inclusão de novos nós na rede [100]. Em protocolos dinâmicos um rádio pode utilizar diferentes canais para realizar diferentes transmissões, de modo que é possível lidar com variações na qualidade dos canais. Usualmente o canal é escolhido antes de cada transmissão. No entanto, para melhorar o desempenho da rede é necessário algum mecanismo de estimação de qualidade dos enlaces e um correto gerenciamento da lista de canais que não devem ser utilizados em cada período de tempo [50]. Devido à sobrecarga relativa às frequentes trocas de canal em protocolos dinâmicos, essa abordagem apenas é adequada para aplicações que não possuam requisitos muito críticos de atraso [50]. Por exemplo, o modo LLDN do IEEE 802.15.4e usa apenas um único canal, além de outras estratégias, para alcançar valores de latência muito baixos [72].

Em [104] é proposto um protocolo multicanal dinâmico, implementado na camada MAC, em que o canal a ser utilizado é definido antes de cada transmissão. Quando os nós não estão transmitindo, medições são feitas para verificar se existem fontes de interferência externas causando ruído nos canais. Com base nessas medições, os canais recebem pesos e apenas canais com peso acima de um certo limiar são considerados na busca antes das transmissões. Uma vantagem dessa abordagem é que uma mesma RSSF pode operar com diferentes canais em diferentes localidades, respeitando a variação espacial na qualidade dos canais, mas o protocolo não garante convergência. Por exemplo, ao tentar transmitir, o transmissor pode escolher um canal que não está no grupo de canais aceitáveis do receptor.

Uma alternativa à utilização de mecanismos de sincronização nos nós para protocolos multicanais dinâmicos é a utilização de uma abordagem assíncrona, por meio da utilização de um canal de controle. Nesse caso, transmissão em *broadcast* também pode ser suportada por meio do canal de controle [100]. Essa estratégia possui a vantagem de não necessitar de sincronização de relógio entre os nós sensores, mas apresenta uma limitação devido à sobrecarga do processo de negociação no canal de controle, uma vez que periodicamente os nós precisam passar a escutar o canal de controle à espera de uma mensagem que indique o início de um período para troca de dados. Quando os nós estão esperando as mensagens de controle, os outros canais permanecem ociosos. Outra desvantagem é o gargalo com relação ao canal de controle, que pode passar a apresentar baixa qualidade em determinados momentos, principalmente em ambientes com variações dinâmicas na qualidade dos canais.

Os padrões para RSSFI WirelessHART, ISA100.11a, e os modos TSCH e DSME do IEEE 802.15.4e, apresentados no Capítulo 2, também utilizam uma abordagem dinâmica para comunicação, por meio da utilização de salto em frequência, que tem como objetivo tornar a rede mais imune a interferências e problemas de multipercurso.

4.2.3 Protocolos Semidinâmicos

Protocolos semidinâmicos apresentam um meio termo entre estático e dinâmico, permitindo troca de canais e transmissão em simultâneo em canais diferentes, mas as trocas de canal ocorrem menos frequentemente [50]. A troca de canais nesse tipo de protocolo pode ocorrer periodicamente ou responder a certos eventos. Essa abordagem é útil para aplicações que requerem uma alta taxa de transferência e também aplicações sensíveis ao atraso. Em algumas abordagens semidinâmicas, receptores são associados a canais fixos, enquanto que transmissores mudam para o canal de cada receptor quando desejam transmitir para ele [100]. Nesse caso, um mecanismo de sincronização também pode ser necessário, caso haja possibilidade de os canais dos receptores mudarem com o tempo.

Em [105] é descrito um mecanismo para utilizar múltiplos canais em RSSF, para minimizar o atraso fim a fim. Eles consideraram a existência de um *backbone* no ambiente, que oferece múltiplos caminhos até o nó sorvedouro, utilizando múltiplos canais. Antes de entrar na rede os nós realizam uma leitura de canal, de modo a descobrir o caminho até o sorvedouro que oferece menor atraso. Os nós também realizam medições periódicas para se manterem em um bom canal. Uma limitação desse trabalho é a suposição da existência de um *backbone* previamente implantado no ambiente que permite comunicação entre o nó final e o sorvedouro por múltiplos canais, o que pode tornar a implantação da rede muito custosa, principalmente se a rede abranger um grande espaço. Além disso, é feita apenas uma avaliação periódica da conexão de um salto entre o nó final e o *backbone*. Para avaliar a qualidade da conexão de um salto foi utilizado o LQI. Essa abordagem de estimação de qualidade do canal é limitada, como é discutido na Seção 4.3.

Em [106] são propostas três abordagens para alocação de canais de modo a minimizar os conflitos entre transmissões simultâneas. A primeira abordagem é baseada no receptor, em que os canais são alocados para os receptores da rede. A segunda abordagem é baseada nas conexões entre os nós, em que os canais são alocados para cada enlace entre dois nós, de modo que um mesmo nó pode receber pacotes por canais diferentes, a partir de transmissores diferentes. Essas duas primeiras abordagens visam tornar a rede livre de conflito de canais, sem interferência devido a transmissões simultâneas em um mesmo canal na rede. Nos dois casos a rede foi modelada como um grafo e foi criado um grafo auxiliar denominado grafo de conflitos, em que as arestas representam nós que interferem entre si. Após a modelagem do grafo de interferência, um algoritmo de coloração de grafos pode ser utilizado para minimizar a quantidade de canais utilizados, em que os canais são modelados como as cores no algoritmo.

Devido à limitação na quantidade de canais disponíveis, um terceiro mecanismo foi proposto, denominado MinMax. Esse mecanismo visa minimizar a quantidade máxima de interferência nos nós. Essa abordagem também utiliza um grafo de interferência. Os algoritmos são distribuídos e executados de forma iterativa. Como essa última abordagem não é capaz de deixar a rede totalmente livre de colisões, também foi implementada uma fase de escalonamento no

tempo para evitar colisões. A estratégia proposta em [106] realiza primeiro uma fase estática e distribuída de alocação de canais de modo a diminuir colisões. Após essa fase o protocolo pode funcionar de forma dinâmica, quando é utilizada uma abordagem baseada na conexão, uma vez que um nó precisa trocar de canal para receber pacotes de nós transmissores diferentes. Uma desvantagem do algoritmo é que ele foca apenas na mitigação de problemas de colisões entre os nós da rede, mas não provê algoritmos e mecanismos para adaptação a variações dinâmicas na qualidade dos canais. Outra desvantagem é a necessidade de sincronia de relógio entre os nós, o que pode ser um problema para implementações práticas, como discutido em [102].

Em [107] é descrita uma avaliação de estratégias de roteamento baseadas em árvores para aplicações *convergecast* utilizando um protocolo multicanal, levando em consideração as características do canal em ambientes representativos para aplicações de *smart grid*. Os ambientes considerados no estudo apresentam características de ambientes industriais, com obstruções e efeitos de multipercurso. Em aplicações *convergecast* os nós finais transmitem informações que convergem até um nó sorvedouro central. Para avaliar as estratégias de roteamento foi considerado o algoritmo *Received-Based Channel Assignment* (RBCA), que foi proposto em [108] e consiste em um mecanismo de alocação de canais em que canais são atribuídos aos receptores, de modo que os transmissores trocam de canal antes das transmissões para se adaptar aos canais dos receptores. O mecanismo associa a atribuição de múltiplos canais com TDMA, para evitar colisões e aumentar a capacidade da rede. Uma limitação desse trabalho é que foram levados em consideração valores de medições previamente realizadas para obter a perda de percurso de acordo com o modelo de sombreamento log-normal. No entanto, não foram consideradas as características não estacionárias do canal e nem os efeitos de atenuação por multipercurso. Mesmo se medições forem realizadas no momento da implantação da rede para estimação da qualidade dos enlaces entre todos os nós, a configuração da rede se tornará obsoleta com o tempo devido às variações que ocorrem em longos períodos de tempo.

4.3 Estimação de Qualidade de Enlace para RSSF

Os estimadores de qualidade de enlace (*Link Quality Estimators* - LQE) para RSSF devem levar em consideração as restrições de recurso dos nós sensores. Assim, algumas técnicas clássicas aplicadas a redes cognitivas podem não ser aplicáveis em RSSFs [104]. Para uma RSSFI o LQE precisa apresentar boa acurácia e boa estabilidade, para evitar que os protocolos realizem muitas trocas de rota ou de canal, devido a variações pequenas e rápidas na qualidade dos enlaces, o que causaria uma grande sobrecarga na rede. Por outro lado, os LQEs precisam identificar rapidamente mudanças abruptas e persistentes nas características do canal. Além disso, a estimação precisa ser realizada sem causar grande sobrecarga nos nós e na rede.

Alguns LQEs são baseados em métricas de camada física (estimadores baseados em *hardware*), como o LQI e o RSSI, e outros em métricas de camadas superiores (estimadores baseados em *software*), como a taxa de entrega de pacote e o número de retransmissões [9].

4.3.1 Estimadores de Qualidade de Enlace Baseados em *Hardware*

Os LQEs baseados em *hardware* não demandam muitos recursos computacionais dos nós sensores, uma vez que as métricas são providas diretamente pelo transceptor. No entanto, utilizar diretamente as informações providas pelo transceptor pode não ser suficiente, de modo que é necessário realizar algum processamento para extrair informações úteis das métricas.

Cada pacote recebido pelos rádios IEEE 802.15.4 possui um valor de RSSI e um valor de LQI associados a ele. O RSSI também pode ser obtido independente da recepção de um pacote e o seu valor é influenciado por qualquer dispositivo que gere interferência na faixa de frequência do canal em uso pelo rádio. O LQI pode ser medido apenas durante a recepção de um pacote, uma vez que o seu cálculo é baseado na análise do nível de distorção dos símbolos iniciais dos pacotes recebidos. Estudos experimentais mostraram que o LQI apresenta grande variância [9] [55], o que pode prejudicar a estimação da qualidade do canal. Esse problema pode ser mitigado utilizando uma média de vários valores de LQI [109].

Como o LQI é calculado apenas para pacotes recebidos, o LQI pode superestimar a qualidade do canal, quando a rede está sujeita a grandes taxas de perda de pacote [7]. Por exemplo, em um cenário em que existe uma fonte de ruído impulsivo no ambiente, vários pacotes podem ser perdidos no ar, enquanto que alguns pacotes podem ser recebidos com alta qualidade, durante momentos em que a fonte de interferência está inativa. Dessa forma, embora a taxa de perda de pacote seja alta, os valores de LQI obtidos podem indicar um canal com boa qualidade.

Além disso, como a implementação do LQI varia de acordo com o fabricante [110], é difícil desenvolver uma solução geral utilizando essa métrica. Por exemplo, em [9] e [55] o LQI apresentou grande variância nos experimentos, utilizando o transceptor CC2420 da Texas Instruments, e em [11] e [111] os valores de LQI variaram muito pouco, utilizando o transceptor MR24J40 da Microchip, mesmo para cenários diferentes.

Valores individuais de RSSI ou a média de poucos valores de RSSI possuem baixa correlação com a taxa de recepção de pacote em ambientes muito refletivos e com um alto nível de atenuação em pequena escala [7, 9], devido às variações aleatórias na potência recebida observada nesses ambientes. Em cenários com fontes de interferência, também se faz necessário obter valores de RSSI em momentos em que não há transmissão de pacotes pela RSSF, de modo a identificar fontes externas que geram interferência no canal. Caso sejam obtidos apenas valores de RSSI durante a recepção dos pacotes, a estimação usando RSSI pode superestimar a qualidade do canal, assim como pode ocorrer com o uso de LQI.

A partir do uso de LQEs baseadas em *hardware*, considerando valores obtidos apenas do lado do receptor, é possível apenas estimar a qualidade do canal sem fio, considerando um dos sentidos do enlace. Para obter uma visão geral da qualidade do enlace, considerando os dois sentidos, faz-se necessário obter dados também no transmissor, ou utilizar outros métodos baseados em *software*, como é o caso dos estimadores descritos na Seção 4.3.2, bem como do estimador de qualidade de enlace proposto nesta tese.

Alguns trabalhos utilizaram RSSI ou LQI para estimar a qualidade do canal sem fio em RSSF. Em [112] são propostas duas métricas para identificar a qualidade do canal baseado em vacâncias do canal. Embora essa métrica possa identificar a influência de fontes de interferência nos canais, ela não é capaz de identificar problemas de sombreamento e atenuação por multipercurso. Em [113] é proposto um algoritmo para identificar a presença de redes Wi-Fi, redes *Bluetooth* e fornos micro-ondas, utilizando amostras de RSSI. A análise é baseada na periodicidade das fontes de interferência. Assim como no trabalho descrito em [112], o algoritmo descrito em [113] também só considera problemas de interferência.

Em [114] é proposta uma métrica para estimar a qualidade do canal sem fio usando RSSI e LQI. Essa métrica mostrou boa correlação com a taxa de perda de pacote, nos experimentos realizados, e uma menor variância quando comparado com o uso de apenas RSSI ou LQI. Na presença de fontes de interferência e problemas de multipercurso essa abordagem pode apresentar resultados errôneos, uma vez que considera valores individuais de RSSI e LQI. Em [109] foi estudada a correlação entre RSSI, LQI e a TRP. O RSSI apresentou baixa acurácia nos experimentos descritos em [109]. Dessa forma, o trabalho focou apenas no uso de LQI. No entanto, métricas baseadas em LQI podem superestimar a qualidade do canal. Além disso, a implementação do LQI é dependente do fabricante.

Em [115] é proposto um classificador para identificar perturbações no canal sem fio, que é capaz de identificar se um canal possui linha de visada direta ou não e se existem fontes de interferência no ambiente. No entanto, a técnica proposta em [115] é capaz apenas de identificar a existência das perturbações, mas não provê qualquer métrica que possa ser utilizada por protocolos para otimizar o desempenho da rede de forma dinâmica. Além disso, a análise é realizada no nível de modulação, por meio de um rádio definido por *software*, o que pode ser impraticável utilizando rádios de prateleira para RSSF.

4.3.2 Estimadores de Qualidade de Enlace Baseados em *Software*

Os LQEs baseados em *software* usam informações obtidas a partir de camadas superiores, como a Taxa de Recepção de Pacote (TRP) e o número requerido de transmissões de pacote (*Required Number of Packet Transmissions* – RNP). O uso de métricas baseadas em TRP permite uma boa estimação para enlaces que possuem qualidade muito alta ou muito baixa, mas apresenta alguns problemas para enlaces intermediários. Em protocolos que usam retransmissão de pacotes, as métricas baseadas em TRP podem superestimar a qualidade do enlace, uma vez que não consideram o número de tentativas de transmissão antes de uma recepção com sucesso. As métricas baseadas em RNP estimam a quantidade de transmissões até uma recepção com sucesso no receptor. Os estimadores *Expected Transmission Count* (ETX) e Four-Bit (FB) são exemplos de estimadores baseados em RNP.

O ETX [20] é um estimador baseado no receptor, que considera assimetria de enlace a partir da estimação da TRP nos dois sentidos, de acordo com

$$e(w) = \frac{1}{p_b(w) \times p_f(w)}, \quad (4.1)$$

em que $e(w)$ é o valor de ETX, $p_b(w)$ é a TRP do sentido inverso do enlace; ou seja, do receptor para o transmissor (*backward link*), que é usado para transmissão de pacotes de reconhecimento ou pacotes de controle. $p_f(w)$ é a TRP do sentido direto do enlace (*forward link*); ou seja, do transmissor para o receptor, que é usado para transmissão de pacotes de dados. $p_b(w)$ e $p_f(w)$ são calculados utilizando um conjunto de w pacotes recebidos.

Pacotes de diagnóstico enviados em *broadcast* são utilizados para calcular p_b e p_f , o que causa sobrecarga em todos os nós e gera tráfego extra na rede. A correlação entre ETX, RSSI e LQI foi verificada em [116], para um ambiente de escritório *indoor* e para diferentes ambientes *outdoor*, usando valores individuais de RSSI e LQI. Nos experimentos não foi encontrada nenhuma correlação significativa entre essas três métricas. Como discutido na Seção 4.3.1, valores individuais de RSSI e LQI não são suficientes para estimar de forma adequada a qualidade do enlace. As duas estratégias para estimação de qualidade de enlace (uma passiva e uma ativa) implementadas no *IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks* (RPL) foram avaliadas em [117]. A estratégia que usa estimação ativa é baseada em pacotes de diagnóstico e ETX. Nos experimentos descritos em [117] o desempenho do estimador ativo foi melhor, mas essa abordagem causa sobrecarga nos nós sensores e na rede.

O FB implementa um estimador híbrido ativo/passivo e executado no transmissor [21], que usa quatro *bits* de informação. O primeiro *bit* é obtido a partir de uma métrica de camada física, para identificar a qualidade do canal durante a recepção de um pacote. O segundo *bit* (*ACK bit*) é obtido na camada de enlace, e considera os dois sentidos do enlace. Os outros dois *bits* são obtidos na camada de rede, e são úteis para decisões de roteamento [9].

O *bit* ACK é determinado utilizando pacotes de dados e pacotes de diagnóstico enviados em *broadcast*, que são combinados para calcular uma estimativa do ETX. O valor de ETX calculado utilizando pacotes de *broadcast* (e_b) é calculado de acordo com

$$e_b = \frac{1}{p_f(w_b, \alpha)}, \quad (4.2)$$

em que $p_f(w_b, \alpha)$ é uma estimativa da TRP, utilizando um filtro do tipo média móvel exponencialmente ponderada (*Exponentially Weighted Moving Average – EWMA*) com fator de ponderação α , e utilizando uma janela de w_b pacotes de diagnóstico.

O valor de ETX calculado utilizando pacotes de dados (e_d) é computado de acordo com

$$e_d = \frac{w_d}{a}, \quad (4.3)$$

em que a é o número de pacotes de reconhecimento recebidos para cada w_d pacotes de dados transmitidos. Se a é igual a zero, e_d é igual ao número de transmissões após o último pacote

de reconhecimento recebido. Os valores de e_b e e_d são combinados utilizando um filtro EWMA para obter o i -ésimo valor da métrica FB, de acordo com [21]

$$FB_i = \alpha \times FB_{i-1} + (1 - \alpha) \times e. \quad (4.4)$$

Para w_b pacotes de diagnóstico recebidos, um novo valor de FB é calculado substituindo e por e_b na Equação 4.4. Para w_d pacotes de dados transmitidos, um novo valor de FB é calculado substituindo e por e_d na Equação 4.4. Dessa forma, informações dos dois sentidos do enlace são consideradas, usando tanto pacotes de diagnóstico transmitidos em *broadcast* como pacotes de dados.

Em [118] é descrito um estudo de simulação para comparar cinco LQEs (incluindo ETX e FB) aplicadas ao protocolo CTP, para ambientes relevantes para aplicações de *smart-grid*. O CTP usa informações obtidas a partir dos LQEs para realizar roteamento adaptativo. Nos experimentos descritos no artigo, o ETX e o FB apresentaram melhor desempenho, uma vez que apenas estes estimadores consideram assimetria de enlace, entre os LQEs avaliados.

A maioria dos LQEs propostos na literatura não são suficientemente acurados porque eles usam apenas uma única métrica (ex: RSSI ou TRP) para realizar a estimação, o que provê apenas uma caracterização parcial do enlace [9]. Alguns LQEs que usam lógica *Fuzzy* para combinar diferentes aspectos da qualidade do enlace foram propostos na literatura. Em [119] foi proposto um LQE denominado *Fuzzy logic based Link quality Indicator* (FLI). O FLI usa a TRP, o coeficiente de variância da TRP e uma métrica para avaliar a distribuição de erros na recepção dos pacotes. As métricas são calculadas utilizando o número de pacotes de reconhecimento recebidos e perdidos no transmissor. O FLI apresentou um desempenho melhor que o FB nos experimentos descritos em [119]. No FLI a sobrecarga também é no transmissor, como é o caso do FB.

O F-LQE [22] é um estimador baseado em lógica *fuzzy* e executado no receptor. Quatro diferentes aspectos do enlace são utilizados para obter uma caracterização holística, são eles: taxa de entrega de pacote suavizada (SPRR), estabilidade (SF), assimetria (ASL) e qualidade do canal (SNR or LQI). O SPRR é a TRP filtrada utilizando um filtro EWMA. O SF é o coeficiente de variação da TRP. Para calcular a assimetria do enlace a TRP calculada nos nós vizinhos é utilizada. Os valores de TRP em cada nó são calculados por meio de pacotes de diagnóstico transmitidos em *broadcast*, e os valores calculados são transmitidos para os vizinhos junto dos pacotes de dados. Para calcular o valor da relação sinal-ruído (SNR) são utilizados dois valores de RSSI: o primeiro é obtido a partir de um pacote recebido e o segundo é obtido logo após a recepção do pacote e representa o ruído de fundo. A SNR é calculada subtraindo esses dois valores.

Finalmente, as quatro métricas são combinadas utilizando lógica *fuzzy* para computar a qualidade do enlace i de acordo com

$$\begin{aligned} \mu(i) &= \beta \min(\mu_{SPRR}(i), \mu_{SF}(i), \mu_{ASL}(i), \mu_{SNR}(i)) \\ &+ (1 - \beta) \text{média}(\mu_{SPRR}(i), \mu_{SF}(i), \mu_{ASL}(i), \mu_{SNR}(i)), \end{aligned} \quad (4.5)$$

em que $\mu_{SPRR}(i)$, $\mu_{SF}(i)$, $\mu_{ASL}(i)$, e $\mu_{SNR}(i)$ são as funções de aderência de cada métrica, que provêm um valor entre $[0, 1]$, que indica o nível em que o enlace pode ser considerado como tendo alta taxa de entrega de pacote, grande estabilidade, baixa assimetria e alta qualidade de canal, respectivamente. Em [22], o valor $\beta = 0,6$ foi utilizado. As funções de aderência são definidas como

$$\mu_{SPRR} = \begin{cases} 0, & \text{se } SPRR \leq 0,25; \\ 1, & \text{se } SPRR \geq 0,95; \\ \frac{4SPRR-1}{3}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\mu_{SF} = \begin{cases} 0, & \text{se } SF \geq 0,7; \\ \frac{-10SF+7}{7}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\mu_{ASL} = \begin{cases} 0, & \text{se } ASL \geq 0,5; \\ 1, & \text{se } ASL \leq 0,01; \\ \frac{-100ASL+50}{49}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\mu_{SNR} = \begin{cases} 0, & \text{se } SNR \leq 1; \\ 1, & \text{se } SNR \geq 8; \\ \frac{SNR-1}{7}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.9)$$

Para obter o valor final do F-LQE, o valor de $\mu(i)$ é normalizado para ficar entre 0 e 100 e suavizado utilizando um filtro EWMA. Nos experimentos descritos em [22], o F-LQE apresentou melhor desempenho do que o ETX e o FB.

O Opt-FLQE [23] é uma modificação do F-LQE para melhorar a reatividade e reduzir a complexidade computacional. Ele não usa o SF e para substituí-lo o Opt-FLQE usa uma métrica calculada no transmissor, o RNP suavizado (SRNP). Os valores de SRNP calculados no transmissor são transmitidos junto dos pacotes de dados para permitir que o receptor calcule a métrica Opt-FLQE. No Opt-FLQE, a função de aderência do SRNP (μ_{SRNP}) substitui o μ_{SF} na Equação 4.5. A função de aderência do SRNP é definida de acordo com

$$\mu_{SRNP} = \begin{cases} 0, & \text{se } SRNP \geq 4; \\ 1, & \text{se } SRNP \leq 1; \\ \frac{4-SRNP}{3}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.10)$$

O estudo de desempenho descrito em [23] mostrou que o Opt-FLQE é mais reativo que o F-LQE, e se mostrou mais confiável para ambientes de *smart-grid*. Em [120] o Opt-FLQE foi comparado com o ETX e o FB, aplicados ao algoritmo de roteamento RPL, para ambientes de

smart-grid. Para essa avaliação a métrica ASL não foi considerada, para reduzir a complexidade computacional, uma vez que as métricas SRNP e SPRR são suficientes para avaliar a assimetria do enlace. Nas simulações descritas em [120] o Opt-FLQE apresentou melhor desempenho em comparação com ETX e FB para todas as métricas avaliadas.

Em [24] é proposto o uso de FEC para realizar diagnóstico do canal sem fio para RSSF em ambientes industriais. A solução proposta é denominada *Lightweight Packet Error Discriminator* (LPED), e usa apenas informações obtidas por meio de pacotes de dados recebidos, sem o uso de pacotes de diagnóstico. Para identificar o tipo de perturbação no canal sem fio, a distribuição de erros dentro dos pacotes corrompidos é analisada, uma vez que tipos diferentes de perturbações provocam diferentes distribuições de erro dentro dos pacotes corrompidos.

Assim como na solução descrita em [115], o LPED é capaz de identificar problemas de atenuação por multipercurso e interferência no canal sem fio, mas não provê qualquer métrica para avaliar a qualidade do enlace em termos de algum indicador de desempenho da rede, como TRP ou RNP. O uso de métodos que apenas identificam a presença de perturbações no canal sem fio, usando informações de poucos pacotes recebidos, pode levar a rede a fazer mudanças nas rotas ou canais devido a variações rápidas na qualidade dos canais, o que pode prejudicar a estabilidade da rede. É importante diferenciar variações rápidas na qualidade do canal de variações persistentes.

O uso de FEC pode ser útil também para recuperar alguns pacotes corrompidos, mas quando bons canais ou rotas são utilizados (o que também é o objetivo do LPED), a SNR aumenta, e o uso de FEC pode se tornar desvantajoso, devido à redundância acrescentada nos pacotes. Usando a solução para estimação de qualidade de enlace proposta nesta tese, FEC também pode ser usado como complemento, dependendo da aplicação, e a informação obtida a partir do estimador de qualidade de enlace pode ser utilizada para decidir quando o uso de FEC é vantajoso.

Embora o LPED tenha baixa complexidade computacional, o tempo de execução no pior caso pode chegar a 30 ms, o que pode causar uma sobrecarga significativa nos nós responsáveis por realizar os cálculos, principalmente se o número de enlaces sendo monitorados for grande. Nos experimentos descritos em [24], pacotes com 30 *bytes* ou mais foram considerados. No entanto, para algumas RSSFIs, como redes LLDN, os pacotes podem ser significativamente menores (com apenas um ou dois *bytes*) [72]. Além disso, mesmo considerando que o tempo de decodificação é significativamente maior que o tempo de codificação, como discutido em [88], o uso de FEC pode causar sobrecarga significativa nos nós finais, uma vez que ocorre um aumento no tamanho dos pacotes transmitidos, o que causa um aumento no consumo de energia. Na solução proposta nesta tese, nenhuma sobrecarga é imposta aos nós finais e o estimador pode ser utilizado considerando pacotes de qualquer tamanho.

Pode ser difícil integrar os LQEs baseados em *software* descritos nesta seção com RSSFIs baseadas em TDMA, como é o caso dos padrões WirelessHART, ISA100.11a ou IEEE 802.15.4e, devido às restrições temporais dessas redes. Em alguns casos, pode ser difícil alo-

car intervalos de tempo dedicados à estimação de qualidade de enlace ou à transmissão de pacotes de diagnóstico. Além disso, o tempo necessário pra estimar a qualidade dos enlaces pode ser muito maior que o tamanho dos intervalos de tempo da rede. Os intervalos de tempo nas redes WirelessHART, ISA100.11a e nas redes TSCH possuem 10 ms de duração (em redes ISA100.11a intervalos de 12 ms também são usados) [17, 63]. O modo DSME do IEEE 802.15.4e é mais flexível e pode usar intervalos de tempo menores [17]. Em redes LLDN os intervalos de tempo podem ter duração de aproximadamente 1 ms [72]. Assim, o uso de nós dedicados, como proposto nesta tese, é uma possível solução para integrar a estimação de qualidade de enlace em tempo real em RSSFI, mesmo para as redes que possuem restrições severas de tempo.

É importante notar que o uso de nós dedicados ao monitoramento de qualidade de enlace não foi considerado nos trabalhos citados nesta seção. Também não foi considerado o uso de grandes conjuntos de amostras de RSSI para identificar a influência do perfil de multipercurso do ambiente na qualidade dos enlaces em uma RSSFI. Uma desvantagem da maioria das abordagens descritas nesta seção é que elas geram tráfego extra na rede, devido aos pacotes de diagnóstico. Além disso, elas causam sobrecarga em todos os nós da rede para calcular as métricas, incluindo os nós finais, que possuem restrições adicionais de recurso. O LPED não usa pacotes de diagnóstico, mas gera tráfego extra devido ao uso de FEC e também causa sobrecarga nos nós finais da rede.

Uma vantagem do LPED em comparação com as outras abordagens baseadas em *software* discutidas nesta seção é que é possível identificar o tipo de perturbação (atenuação por multipercurso ou interferência), o que pode ajudar os protocolos a tomarem a melhor decisão em cada caso. A desvantagem é que apenas uma direção do enlace é avaliada, o que pode não ser suficiente para protocolos que utilizam reconhecimento de pacotes. O protocolo CSMA/CA do Padrão IEEE 802.15.4, bem como os protocolos descritos em outros padrões para RSSFI consideram o uso de reconhecimento por pacote, como nos padrões WirelessHART, ISA100.11a, TSCH e DSME [17, 63].

A solução proposta nesta tese, descrita no Capítulo 6, é capaz de avaliar a qualidade do enlace nos dois sentidos e de identificar problemas de interferência e multipercurso de forma separada. Com o uso de nós dedicados, a sobrecarga imposta aos nós sensores é mínima, o que permite a estimação de qualidade de enlace em tempo real mesmo para RSSFIs com restrições severas de tempo, bem como para RSSFIs que usam reconhecimento por pacote. O LQE proposto foi comparado com o Opt-FLQE [23] em um ambiente industrial. O Opt-FLQE é o LQE mais recente entre os citados nesta seção, e é capaz de estimar a qualidade dos enlaces nos dois sentidos. Além disso, ele foi desenvolvido para ser apropriado para aplicações de *smart-grid*, em ambientes severos.

4.4 Conclusões do Capítulo

Este capítulo discutiu o uso de múltiplos canais em protocolos para RSSF. Como os nós sensores são capazes de utilizar diferentes canais, é possível explorar essa característica para aumentar a capacidade da rede ou mitigar os problemas que afetam a qualidade dos canais.

Foram discutidas as arquiteturas utilizadas por protocolos multicanais e as características de protocolos estáticos, dinâmicos e semidinâmicos. Os protocolos estáticos são mais simples, mas menos flexíveis, uma vez que não são capazes de se adaptar a variações na qualidade dos canais. Os protocolos dinâmicos permitem a utilização de múltiplos canais em simultâneo e permitem lidar melhor com as variações na qualidade dos canais e com problemas de interferência. No entanto esses protocolos podem apresentar grande sobrecarga para sincronização dos nós sensores e também pode ser necessário realizar o gerenciamento dinâmico da lista de canais considerados para comunicação, de modo a manter uma boa qualidade de serviço. Os protocolos semidinâmicos aparecem como um meio termo, em que os nós sensores utilizam diferentes canais, mas as trocas de canal ocorrem com menos frequência.

Independente da abordagem utilizada, para que a RSSF permaneça operando com boa qualidade de serviço no decorrer do tempo, deve-se utilizar uma abordagem de alocação dinâmica de canais, em que os canais sendo utilizados pela RSSF são trocados caso passem a apresentar um baixo nível de qualidade. O primeiro passo para realizar alocação dinâmica de canais é realizar a estimação da qualidade dos enlaces. Neste capítulo também foram apresentados alguns conceitos sobre estimação de qualidade de enlace e foram apresentados vários trabalhos relacionados.

No próximo capítulo um novo modelo para simulação de protocolos multicanais, que considera as características do canal sem fio em ambientes industriais, é apresentado. Alguns estimadores de qualidade de enlace apresentados neste capítulo são avaliados por meio de um estudo de simulação, usando o novo modelo proposto. No Capítulo 6 um novo estimador de qualidade de enlace é proposto e validado por meio de estudos experimentais. Finalmente, no Capítulo 7 um novo protocolo multicanal adaptativo é proposto e avaliado.

CAPÍTULO 5

Modelo para Simulação de Protocolos Multicanais em Redes de Sensores sem Fio Industriais

Embora vários protocolos multicanais tenham sido propostos na literatura, existe uma dificuldade em avaliá-los e comparar as diferentes abordagens, devido à falta de um *testbed* comum e a carência de simuladores que apresentem modelos acurados para simular ou emular características dos múltiplos canais simultaneamente. Muitos protocolos multicanais são implementados apenas em simuladores com suposições simplistas [100]. Para avaliar os reais benefícios de protocolos multicanais deve-se levar em consideração um modelo realista de propagação e também o atraso relativo à troca de canais [50]. Alguns artigos descreveram estudos de simulação para RSSFI [23, 67, 121, 122], mas nenhum deles considerou as características não estacionárias do canal sem fio em um longo período de tempo e nem a decorrelação entre diferentes canais.

Em ambientes industriais, diferenças nas características dos canais podem ser observadas devido ao perfil de multipercurso do ambiente, uma vez que os canais são decorrelacionados em frequência e a influência do multipercurso é diferente em canais diferentes [14]. Além disso, mudanças na topologia do ambiente (ex: a movimentação de uma grande estrutura metálica) podem provocar mudanças nas características dos canais ao longo do tempo, o que pode causar diferenças no valor médio da potência recebida, mesmo o transmissor e receptor permanecendo estáticos. Dessa forma, o canal sem fio no ambiente industrial pode permanecer com as mesmas características durante várias horas e após esse período uma mudança brusca nas características do canal pode ocorrer [75].

O modelo de simulação proposto neste capítulo foi implementado e integrado ao simulador Castalia [123], que é baseado no *framework* Omnet++ [124]. Castalia é um simulador baseado em eventos discretos desenvolvido em C++. Seu módulo de rádio é baseado em rádios reais utilizados em plataformas embarcadas para RSSF, incluindo o suporte aos transceptores CC2420 e CC1000, e ao modelo de sombreamento log-normal. Castalia é um simulador específico para

redes de sensores, diferente de outros simuladores de código aberto utilizados pela comunidade acadêmica, como o *Network Simulator 3* e o OPNET, ou outros *frameworks* do OMNeT++, como o INET. O Castalia permite simular variações temporais na potência recebida utilizando amostras pré-definidas, que simulam o comportamento de um canal sujeito à atenuação por multipercurso. No entanto, por padrão o modelo implementado no simulador considera que o canal é estacionário, ou seja, suas características permanecem as mesmas durante todo o tempo. A implementação padrão do simulador também não considera a decorrelação entre diferentes canais.

Um estudo de simulação foi realizado para avaliar alguns estimadores de qualidade de enlace (LQEs) descritos na literatura. A partir desse estudo foi possível verificar que entre os LQEs avaliados, o Opt-FLQE apresenta o melhor desempenho para RSSFIs, uma vez que é capaz de reagir mais rapidamente às mudanças bruscas que ocorrem na qualidade do enlace, em comparação com os outros LQEs, e apresenta boa acurácia. No entanto, alguns problemas com esse estimador foram identificados e discutidos. No Capítulo 6 o Opt-FLQE é comparado com o LQE proposto nesta tese, por meio de estudos experimentais em um ambiente industrial. No Capítulo 7 é descrito um estudo de simulação mais detalhado, considerando várias topologias de rede e vários protocolos multicanais.

5.1 Modelo de Simulação para o Desvanecimento em Longos Períodos de Tempo

Para modelar o canal sem fio por um longo período de tempo utilizou-se uma abordagem baseada em uma cadeia de Markov de dois estados. Uma cadeia de Markov é um processo estocástico de Markov que toma valores inteiros. Em geral, as variáveis aleatórias que definem um processo estocástico não são independentes, podendo apresentar relações de dependência bastante complexas. Os processos de Markov, por outro lado, apresentam uma forma simples de dependência e são úteis para a modelagem de vários problemas encontrados na prática [125]. Um processo estocástico é denominado processo de Markov se satisfizer à propriedade de Markov. A propriedade de Markov diz que a probabilidade do estado do processo no instante $k + 1$ depende apenas do estado do processo no instante k . As cadeias de Markov podem ser representadas graficamente por um diagrama de estados.

No modelo proposto neste capítulo, o efeito do desvanecimento no canal ao longo do tempo pode ser modelado como uma cadeia de Markov de dois estados, como ilustrado na Figura 5.1.

Enquanto a cadeia de Markov permanece no estado P , as características do canal permanecem inalteradas. Os valores de potência recebida de um determinado enlace entre dois nós podem ser gerados considerando um sinal sob desvanecimento Rice. A perda de percurso em larga escala é modelada utilizando o modelo de sombreamento log-normal. A transição para o estado T ocorre com probabilidade p . Quando isso ocorre, os parâmetros do modelo do ca-

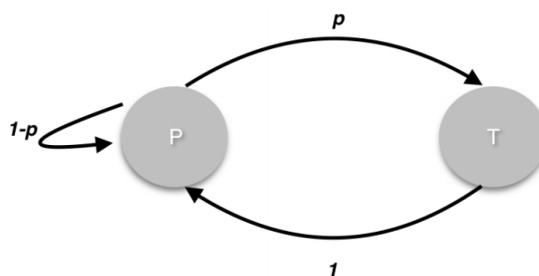


Figura 5.1 Diagrama de transição de estados de uma cadeia de Markov com dois estados.

nal são modificados e portanto uma mudança abrupta acontece na qualidade dos canais. Após modificar os parâmetros dos modelos, a cadeia de Markov retorna para o estado P com probabilidade igual a um.

É definido um tempo médio de mudança (T_c) para o modelo, em minutos, que é usado para definir o valor de p . Na implementação do modelo, o intervalo de mudança de estado da cadeia de Markov foi configurado para ser igual a um minuto, o que resulta em $p = \frac{1}{T_c}$. Com esse parâmetro, é possível simular ambientes que permanecem inalterados por muito tempo, bem como ambientes em que ocorrem mudanças mais frequentes na topologia. Os resultados de simulação obtidos usando o modelo são compatíveis com resultados experimentais realizados em ambientes industriais [8, 14, 76]. A distribuição de Rice foi utilizada para modelar a atenuação por multipercursos, mas outras distribuições poderiam ser utilizadas, como a distribuição Nakagami- m . Diferentes modelos para a atenuação podem ser integrados de forma simples ao modelo de simulação.

O primeiro passo para redefinir os parâmetros do canal, quando a cadeia de Markov atinge o estado T , é a definição do valor médio da potência de recepção $P_R(d)_{\text{dBm}}$, considerando uma distância d entre transmissor e receptor, de acordo com

$$P_R(d)_{\text{dBm}} = P_T - L(d), \quad (5.1)$$

em que P_T é a potência de transmissão, $L(d)$ é a perda de percurso, calculada utilizando a Equação 3.2. Considerando uma mesma distância entre transmissor e receptor, $P_R(d)_{\text{dBm}}$ pode apresentar uma variação aleatória, referente ao sombreamento log-normal (X_σ), o que pode aumentar ou diminuir o valor médio de potência recebida.

Os valores instantâneos de potência recebida são obtidos somando o valor de $P_R(d)_{\text{dBm}}$ com o valor relativo à atenuação em pequena escala, que é obtido por meio da simulação de um canal sujeito a desvanecimento Rice. Em [6] são descritos experimentos para determinar o fator de Rice (K) para diferentes cenários em um ambiente industrial. Esses valores foram usados como parâmetros para as simulações realizadas nesta tese. O fator K de Rice é definido de acordo com a Equação 3.5.

Para gerar os valores relativos à atenuação em pequena escala, seguindo a distribuição de Rice, foi utilizada uma biblioteca implementada em C++ denominada IT++ [126]. Essa bi-

bliblioteca possui um conjunto de classes e funções que podem ser utilizadas em aplicações de processamento de sinais e simulação de sistemas de comunicações, incluindo a implementação da distribuição de Rice para a simulação da transmissão de sinais sujeitos à atenuação por multipercurso.

Para modelar as variações que podem ocorrer na severidade da atenuação em pequena escala, é possível também configurar um valor de desvio padrão para o fator K (K_σ). Assim, sempre que uma mudança nas características do canal ocorre, um novo valor de K é definido, usando uma distribuição normal com o valor médio de K e o desvio padrão K_σ como parâmetros. Nos experimentos realizados nesta tese, descritos no Capítulo 3, bem como em experimentos descritos em outros trabalhos [8], foi observado que a severidade da atenuação por multipercurso também pode mudar de forma abrupta, junto com modificações no valor médio de potência recebida.

Como os diferentes canais são descorrelacionados em frequência, para simular protocolos multicanais todos os canais disponíveis devem ser simulados de forma simultânea com parâmetros individuais por canal. Neste cenário, trocar o canal de comunicação pode melhorar a qualidade de serviço da rede, quando o canal em uso apresenta baixa qualidade. Mais especificamente, para cada enlace entre dois nós, é necessário armazenar 32 valores de $P_R(d, t)_{\text{dBm}}$ e K , que são os parâmetros para modelar o sombreamento e a atenuação em pequena escala para as duas direções do enlace, nos 16 canais disponíveis para comunicação. Quando um novo pacote é transmitido na rede, o valor de potência recebida é gerado considerando os parâmetros armazenados para o enlace e canal usado na transmissão. Isso permite capturar as características dos canais descorrelacionados e também a assimetria dos enlaces.

Os parâmetros do canal sem fio são definidos no *script* de simulação do simulador Castalia de acordo com a Tabela 5.1

Tabela 5.1 Definição dos parâmetros do canal sem fio no *script* de simulação do Castalia.

```
SN.wirelessChannel.pathLossExponent = 1.69
SN.wirelessChannel.PLd0 = 80.48
SN.wirelessChannel.d0 = 15
SN.wirelessChannel.sigma = 6.62
SN.wirelessChannel.K = 12.3
SN.wirelessChannel.K_sigma = 5.4
SN.wirelessChannel.meanTimeChange = 85
SN.wirelessChannel.seed = 0
```

Os quatro primeiros parâmetros são usados para calcular a perda de percurso e o sombreamento, e os parâmetros K e K_σ são usados para calcular a atenuação em pequena escala. O parâmetro *meanTimeChange* define o tempo médio em que uma mudança ocorre nas características dos canais, em minutos. O parâmetro *seed* define a semente utilizada para gerar os valores aleatórios de potência recebida durante a simulação. Se o valor de *seed* for igual a zero, uma semente diferente é gerada para cada simulação realizada, caso contrário a mesma sequên-

cia de valores é gerada para diferentes simulações. O uso de um valor fixo para o *seed* é útil para comparar diferentes protocolos e algoritmos considerando as mesmas condições de canal.

Para realizar a integração do modelo proposto com o Castalia foram feitas modificações na classe *WirelessChannel*. Após a integração, uma simulação foi realizada, considerando um transmissor e um receptor. Os parâmetros utilizados nessa simulação são detalhados na Tabela 5.2. O tempo médio de mudança adotado é consistente com valores experimentais descritos em [8, 75, 89], em que o canal permanece estacionário por algumas horas, em alguns casos.

Para os parâmetros dos modelos de sombreamento log-normal e de Rice, foram utilizados valores obtidos em experimentos realizados em um ambiente industrial, descritos em [6], considerando um cenário sem visada direta entre transmissor e receptor. Foi utilizada uma potência de transmissão de 0 dBm, uma vez que essa é a potência de transmissão dos rádios utilizados nos experimentos descritos nesta tese. Para esse teste inicial, foi considerada uma taxa de transmissão de pacote de 0,2 pacotes/s, que é suficiente para algumas aplicações de monitoramento. No entanto, o objetivo principal desse primeiro teste foi observar o comportamento do canal sem fio nos múltiplos canais, a partir do uso do novo modelo proposto.

Tabela 5.2 Parâmetros usados na simulação.

Distância entre os nós	20 metros
Camada física e MAC	IEEE 802.15.4 - CSMA/CA
Taxa de <i>bits</i>	250 <i>kbit/s</i>
Potência de transmissão	0 dBm
Taxa de transmissão de pacotes	0,2 pacotes/s
Tempo médio de mudança (T_c)	85 minutos
Expoente de perda de percurso (n)	1,69
Distância de referência (d_0)	15 metros
Perda de percurso na distância de referência ($L(d_0)$)	80,48 dB
Desvio padrão do sombreamento (X_σ)	8,13 dB
Fator de Rice (K)	12,3 dB
Desvio padrão do fator de Rice (K_σ)	5,4 dB

Na Figura 5.2 são mostradas as curvas de potência dos sinais captados no receptor (obtida a partir dos pacotes recebidos) e no transmissor (obtida a partir dos pacotes de reconhecimento), durante quatro horas de simulação. É possível observar uma mudança abrupta que ocorre nas características do canal, bem como a assimetria entre as duas direções do enlace. Este comportamento é realista em ambientes dinâmicos, que causa variações no decorrer do tempo, como é o caso de muitos ambientes industriais. Os resultados obtidos a partir do modelo de simulação são consistentes com resultados obtidos a partir de experimentos em ambientes industriais realizados durante esta tese, e também resultados descritos em outros trabalhos que avaliaram o canal sem fio por longos períodos de tempo em ambientes industriais [8, 75, 89], como demonstrado no Capítulo 3.

Para construir o gráfico mostrado na Figura 5.2, foi realizada uma simulação utilizando o Canal 11. Outras sete replicações da simulação foram realizadas, utilizando diferentes canais, e

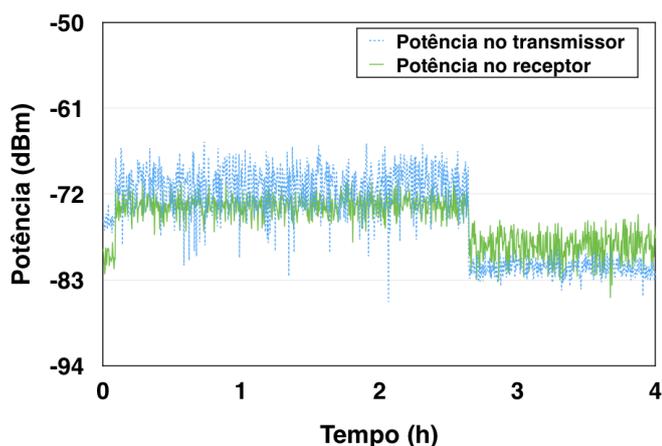


Figura 5.2 Assimetria no enlace e variações temporais nas potências de recepção nos dois sentidos do enlace.

com o mesmo valor para o parâmetro *seed*. Na Figura 5.3 são mostrados os valores de potência de recepção para os oito canais considerados. As primeiras 100 amostras obtidas para cada replicação foram utilizadas para plotar o gráfico. Os valores foram filtrados com um filtro da média, de modo a analisar melhor os efeitos do somreamento e para permitir uma melhor comparação com os resultados experimentais descritos no Capítulo 3. Os resultados mostrados nas Figuras 5.2 e 5.3 são similares com os resultados experimentais mostrados nas Figuras 3.6 e 3.7 do Capítulo 3.

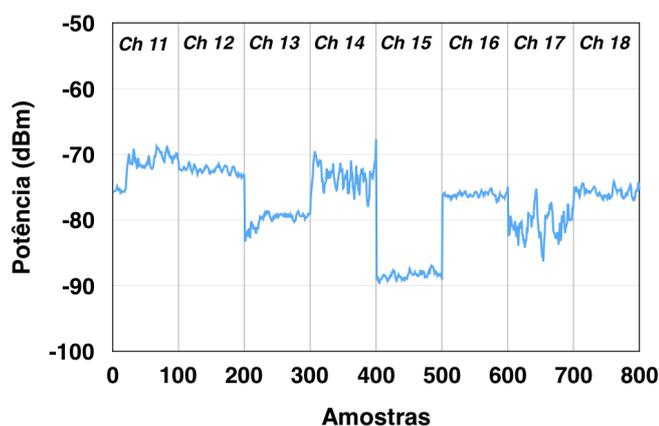


Figura 5.3 Potência recebida para diferentes canais.

5.2 Avaliação de Estimadores de Qualidade de Enlace

Nesta seção é descrito um estudo de simulação para avaliar alguns estimadores de qualidade de enlace (*Link Quality Estimators* - LQE) que foram descritos no Capítulo 4: ETX [20], Four-Bit [21], F-LQE [22] e Opt-FLQE [23]. Por meio da utilização do modelo de simulação descrito

neste capítulo, é possível analisar a acurácia e a reatividade desses estimadores, considerando o comportamento não estacionário do canal sem fio em ambientes industriais.

5.2.1 Parâmetros da Simulação

Dois nós foram utilizados, um transmissor e um receptor, com reconhecimento de pacote e retransmissão (máximo de quatro tentativas de retransmissão por pacote). Os dois nós enviam pacotes de diagnóstico (*beacons*) periodicamente. Os *beacons* são transmitidos em *broadcast*, sem reconhecimento de pacote e sem retransmissão, e são utilizados por todos os estimadores. Os parâmetros da simulação são detalhados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Parâmetros usados na simulação.

Distância entre os nós	20 e 35 metros
Camada física e MAC	IEEE 802.15.4 - CSMA/CA
Taxa de <i>bits</i>	250 <i>kbit/s</i>
Potência de transmissão	0 dBm
Tempo de simulação	5 horas
Taxa de transmissão de pacote	1 pacote/s
Taxa de transmissão de <i>beacons</i>	0.2 pacotes/s
Tempo médio de mudança (T_c)	85 minutos
Expoente de perda de percurso (n)	1,52
Distância de referência (d_0)	15 metros
Perda de percurso na distância de referência ($L(d_0)$)	72,71 dB
Desvio padrão do sombreamento (X_σ)	4,61 dB
Fator de Rice (K)	12,3 dB
Desvio padrão do fator de Rice (K_σ)	5,4 dB
Ruído de fundo	-90 dBm

Os valores utilizados para o modelo de sombreamento log-normal, para a distribuição de Rice e para o ruído de fundo foram obtidos a partir dos experimentos descritos em [6], em ambientes industriais. A taxa de transmissão de pacote utilizada na simulação (1 pacote/s) é suficiente para muitas aplicações de monitoramento, como monitoramento de temperatura ou diagnóstico de falhas em motores [127]. A taxa de transmissão de *beacons* é menor, de modo a causar menor sobrecarga na aplicação.

Como os dados sobre a operação de todos os nós em todos os instantes de tempo podem ser obtidos a partir do *trace* gerado pelo simulador, é possível saber o número exato de transmissões e de recepções em um dado período de tempo, o que é praticamente impossível considerando apenas os dados disponíveis em um nó específico. Dessa forma, foi possível calcular a Taxa de Recepção de Pacote (TRP) para as duas direções do enlace, considerando todos os pacotes transmitidos na rede (pacotes de dados, pacotes retransmitidos, pacotes de reconhecimento e *beacons*). Dessa forma, uma métrica denominada TRP Real (TRPR) foi utilizada como valor

de referência para todas as métricas. a TRPR é calculada a partir da multiplicação da TRP nas duas direções do enlace em um dado intervalo de tempo. O intervalo de tempo para o cálculo de novos valores de TRP considerados neste estudo foi de 10 s.

5.2.2 Resultados

Todos os LQEs avaliados apresentaram boa acurácia para enlaces com qualidade muito alta. Assim, os resultados mostrados nesta seção focam na avaliação dos LQEs para enlaces de qualidade intermediária, e durante mudanças bruscas nas características do canal sem fio. Nos gráficos, os valores de F-LQE e Opt-FLQE são plotados juntos, com o TRPR como referência. As métricas ETX e Four-Bit são plotadas juntas, utilizando o valor de $\frac{1}{TRPR}$ como referência. Os resultados são mostrados para dois cenários: Cenário 1, com 20 metros de distância entre os nós, e Cenário 2, com 35 metros de distância entre os nós.

Resultados para o Cenário 1

No Cenário 1, a distância era relativamente pequena, e a qualidade geral do enlace foi boa durante a simulação. No entanto, algumas variações podem ocorrer, e os LQEs precisam estar aptos a identificar rapidamente mudanças abruptas que ocorrem na qualidade do canal sem fio. Os gráficos nas Figuras 5.4(a) (F-LQE e Opt-FLQE) e Fig. 5.4(b) (ETX e Four-Bit) mostram a qualidade do enlace para um período de 42 minutos, em que uma mudança abrupta nas características do canal ocorreu, e a TRPR caiu aproximadamente 15%, em média.

Todos LQEs identificaram a mudança brusca que ocorreu na qualidade do enlace. O Opt-LQE e o Four-Bit reagiram após aproximadamente um minuto, enquanto que F-LQE e ETX começaram a reagir apenas após cerca de sete minutos. Os gráficos nas Figuras 5.4(c) e Fig. 5.4(d) ajudam a entender este comportamento. Após 54 minutos, uma mudança abrupta nas características do canal ocorreu, mas apenas o *up link* (do transmissor para o receptor) apresentou uma queda de qualidade. O F-LQE e o ETX são estimadores baseados no receptor, e usam *beacons* para estimar a qualidade do enlace. Dessa forma, como a taxa de transmissão de *beacons* é relativamente pequena (um *beacon* é transmitido a cada cinco segundos), e considerando a baixa TRP do *up link*, esses LQEs apresentaram um grande atraso para identificar a mudança na qualidade do enlace. Com uma taxa de transmissão de *beacons* maior é possível tornar o F-LQE e o ETX mais reativos, mas isso causaria uma sobrecarga maior nos nós sensores.

O Four-Bit é um estimador executado no transmissor, dessa forma ele pode identificar rapidamente uma queda na qualidade do *up link*, uma vez que ele utiliza pacotes de dados para calcular o valor de e_d , como descrito na Seção 4.3.2. O Opt-FLQE é executado no receptor, mas usa uma métrica calculada no transmissor, a RNP suavizada (SRNP). Como os valores de SRNP são transmitidos junto com os pacotes de dados, que são transmitidos com uma taxa cinco vezes maior que os *beacons*, o receptor obtém mais rapidamente uma atualização do valor de SRNP, e pode ajustar o valor da métrica.

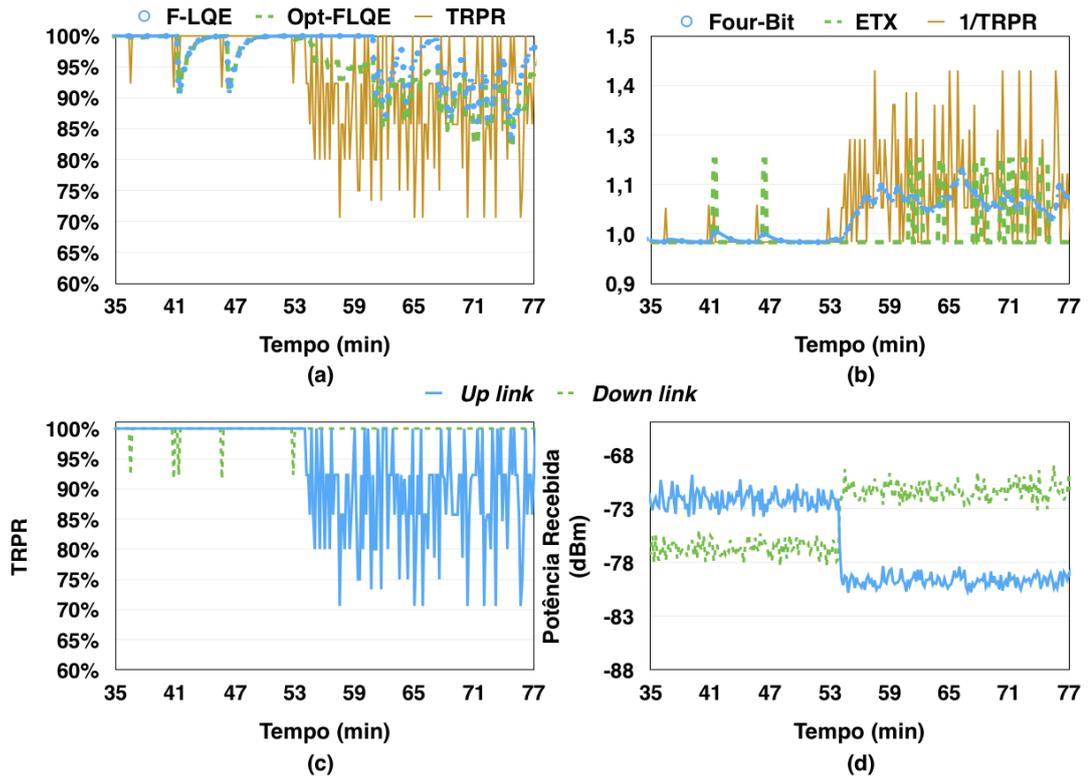


Figura 5.4 Gráficos na parte de cima - qualidade do enlace durante 42 minutos para o Cenário 1. Gráficos na parte de baixo - TRPR e potência recebida para as duas direções do enlace durante 42 minutos.

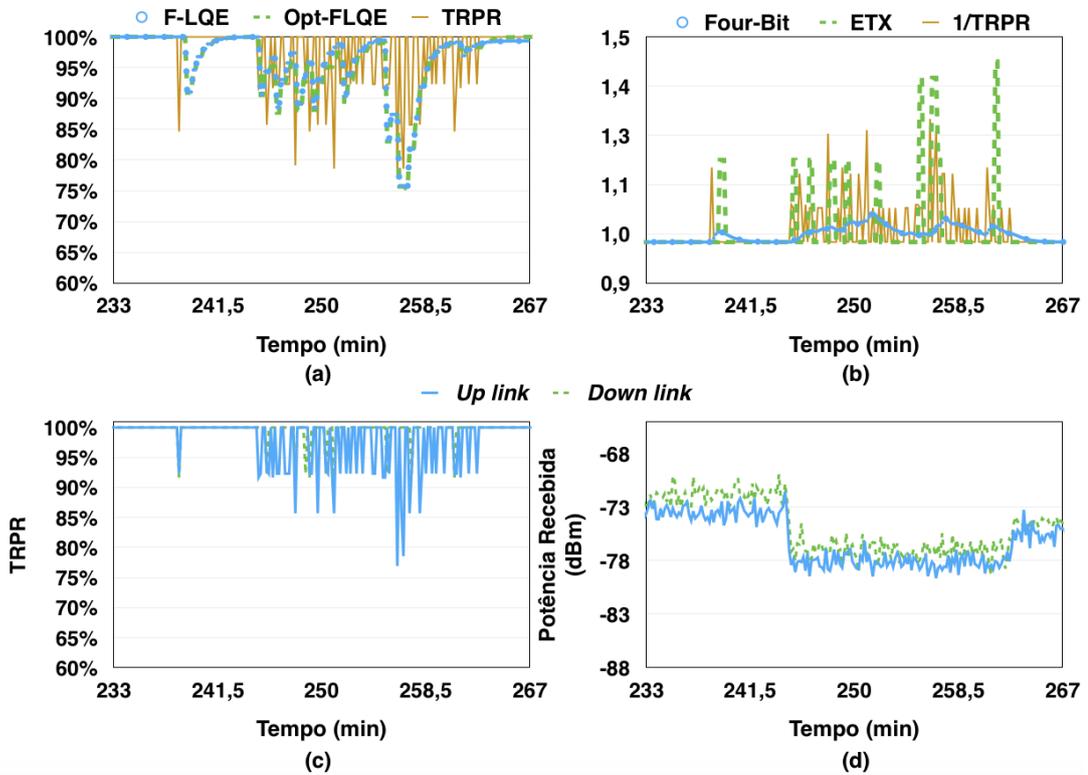


Figura 5.5 Gráficos na parte de cima - qualidade do enlace durante 34 minutos para o Cenário 1. Gráficos na parte de baixo - TRPR e potência recebida para as duas direções do enlace durante 34 minutos.

A partir dos gráficos mostrados nas Figuras 5.5(a) e Fig. 5.5(b) pode-se ver a qualidade do enlace em um período de 34 minutos, em que duas mudanças abruptas nas características do canal ocorrem. A TRPR caiu cerca de 5% e depois aumentou cerca de 5%. Nesse caso, todas as métricas notaram a mudança na qualidade do enlace de forma rápida. Isso pode ser explicado pela análise dos gráficos das Figuras 5.5(c) e Fig. 5.5(d). Os dois sentidos do enlace tiveram uma pequena queda de qualidade e após cerca de 20 minutos um pequeno aumento na qualidade, mas o valor médio de TRP permaneceu maior que 95% durante todo o tempo, para as duas direções, o que permitiu que os LQEs conseguissem notar rapidamente a pequena mudança na qualidade do enlace.

Resultados para o Cenário 2

Neste cenário a distância foi maior e a qualidade geral do enlace foi menor do que no Cenário 1. A partir dos gráficos das Figuras 5.6(a) e Figure 5.6(b) pode-se ver a qualidade do enlace para um período de 32 minutos, em que uma mudança abrupta nas características do canal ocorreu e a TRPR caiu aproximadamente 50%. Diferente dos resultados mostrados na Figura 5.4, todas as métricas notaram a mudança na qualidade do enlace de forma rápida. Isso ocorreu porque apenas a qualidade do *down link* caiu significativamente, o que permitiu que tanto os estimadores que usam métricas calculadas no receptor quanto no transmissor conseguissem identificar rapidamente a queda na qualidade do enlace.

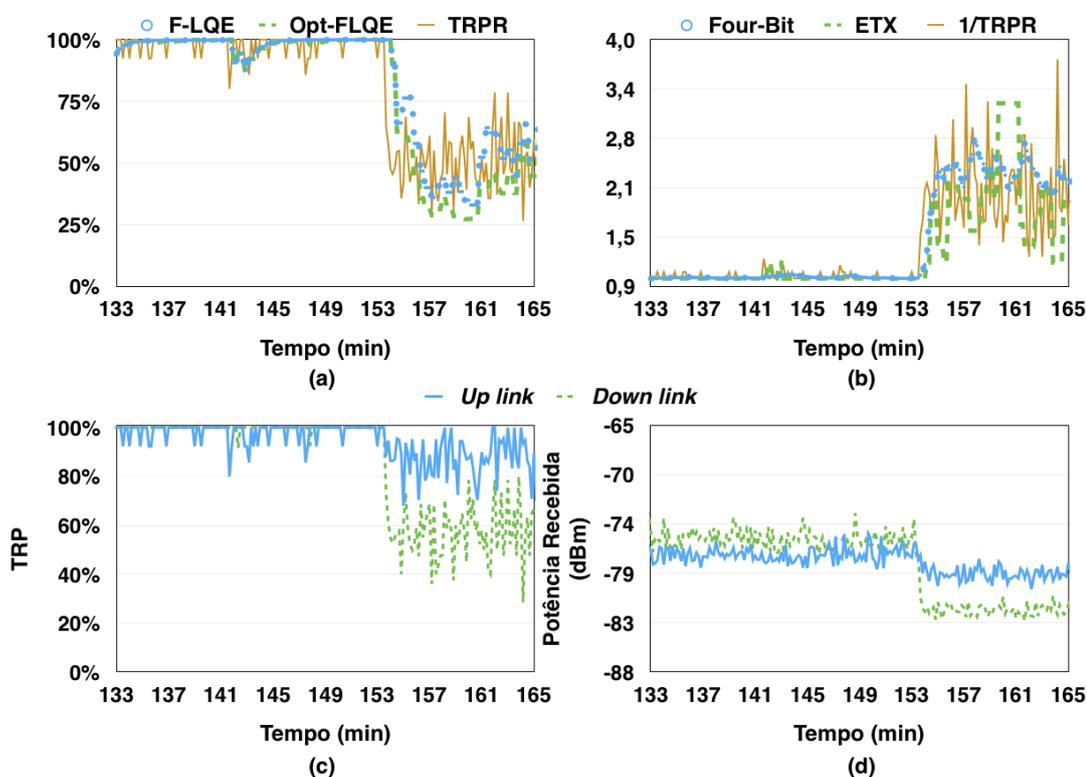


Figura 5.6 Gráficos na parte de cima - qualidade do enlace durante 32 minutos para o Cenário 2. Gráficos na parte de baixo - TRPR e potência recebida para as duas direções do enlace durante 32 minutos.

A partir dos gráficos das Figuras 5.7(a) e Fig. 5.7(b) pode-se ver a qualidade do enlace para um período de 35 minutos, em que uma mudança abrupta ocorreu nas características do canal, e a TRPR caiu mais de 80%. Neste caso, o *down link* apresentou uma queda significativa de qualidade, o que levou a TRPR para um valor próximo de 0, uma vez que os pacotes de reconhecimento raramente foram entregues durante esse período, já que a potência de recepção ficou próxima do ruído de fundo.

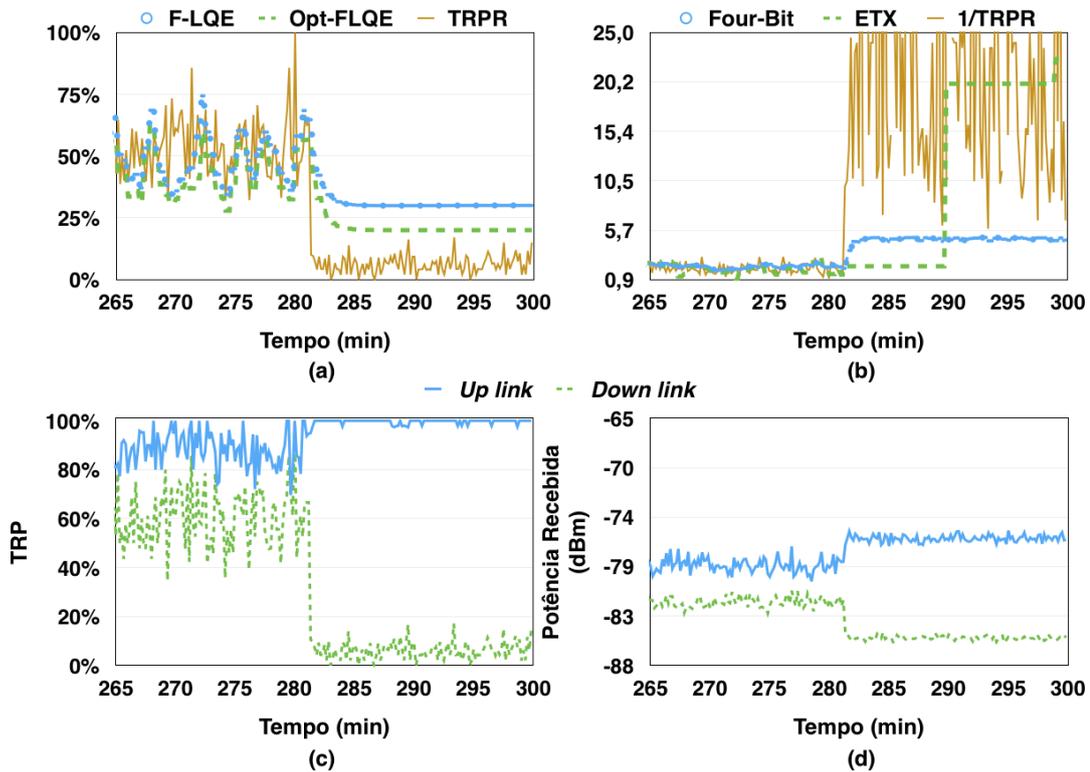


Figura 5.7 Gráficos na parte de cima - qualidade do enlace durante 35 minutos para o Cenário 2. Gráficos na parte de baixo - TRPR e potência recebida para as duas direções do enlace durante 35 minutos.

Tanto F-LQE quanto Opt-FLQE reagiram relativamente rápido, uma vez que o *down link* apresentou uma maior queda de qualidade. No entanto, eles superestimaram a qualidade do enlace. Isso ocorreu pois a métrica ASL, que captura a assimetria de enlace, não pôde ser computada, uma vez que a maioria dos pacotes de *beacon* transmitidos pelo receptor foram perdidos durante esse período. Por outro lado, altos valores de SPRR e SNR, calculados do lado do receptor, tiveram uma maior influência nas estimativas. O Opt-FLQE apresentou um valor menor que o F-LQE, devido ao uso dos valores de SRNP, que são obtidos no transmissor.

Neste cenário, o ETX apresentou boa acurácia, mas apenas reagiu após cerca de 10 minutos, uma vez que poucos pacotes *beacon* foram recebidos no transmissor, devido à qualidade muito baixa do *down link*. O Four-Bit reagiu rápido, mas como o número máximo de tentativas de retransmissão foi configurado em quatro, o valor de e_d ficou limitado a cinco, e durante este período o valor de e_b , que usa os pacotes *beacon*, não pôde ser calculado devido à baixa qualidade do *down link*.

Em geral, todos os LQEs apresentaram boa acurácia em quase todos os cenários, mas Four-Bit e Opt-FLQE apresentaram melhor reatividade às mudanças bruscas que ocorreram na qualidade do canal. O ETX apresentou baixa estabilidade, o que pode prejudicar o processo de decisão dos protocolos adaptativos que usam a informação provida pelo estimador. O F-LQE e o Opt-FLQE também apresentaram baixa estabilidade, em alguns casos, devido a variações rápidas na qualidade do canal. O Four-Bit apresentou a melhor estabilidade, mas com baixa acurácia em alguns casos, como ilustrado na Figura 5.7.

5.3 Conclusões do Capítulo

Este capítulo apresentou um modelo de simulação realista para protocolos multicanais em RSSFI. O modelo considera as variações temporais na qualidade do canal, e leva em conta suas características não estacionárias. Além disso, o modelo considera as características distintas dos diferentes canais e a assimetria de enlace. Utilizando o modelo é possível simular o comportamento de protocolos multicanais e algoritmos de alocação dinâmica de canais. Os resultados obtidos a partir dos testes mostraram que o modelo permitiu capturar a dinâmica do canal sem fio em ambientes industriais, e apresentou resultados similares aos observados em experimentos realizados em ambientes industriais, que foram descritos no Capítulo 3, bem como resultados descritos em outros trabalhos [8, 75, 76, 89].

Foi realizado um estudo utilizando o modelo de simulação proposto para comparar quatro LQEs apresentados na literatura e que foram descritos no Capítulo 4. A partir desse estudo, foi possível identificar os estimadores que apresentam melhor acurácia e reatividade. Embora alguns LQEs avaliados tenham apresentado boa acurácia e uma reatividade relativamente boa, como o Four-Bit e o Opt-FLQE, alguns desafios ainda existem. A reatividade pode ser otimizada, uma vez que o estimador mais reativo ainda demorou cerca de um minuto para reagir em alguns cenários, o que pode prejudicar o desempenho de algumas aplicações. Além disso, todos os LQEs utilizam estimação ativa, ou seja, por meio do uso de pacotes de diagnóstico, e realizam algum processamento no transmissor, que é usualmente o nó final da RSSF e possui restrições adicionais de recurso. No Capítulo 6 um novo estimador de qualidade de enlace é proposto e comparado com o Opt-FLQE por meio de experimentos em um ambiente industrial.

CAPÍTULO 6

Estimação de Qualidade de Enlace em Tempo Real Utilizando Nós Dedicados

Mecanismos adaptativos, como alocação dinâmica de canal ou roteamento adaptativo, podem ser utilizados para lidar com as variações na qualidade dos enlaces em uma RSSF. Em ambos os mecanismos, o primeiro passo é estimar a qualidade dos enlaces, de modo que os nós da rede possam decidir se uma troca de canal ou rota é necessária. Este capítulo descreve um novo estimador de qualidade de enlace (*Link Quality Estimator* - LQE) para RSSFIs, e um novo tipo de nó, denominado nó LQE, que realiza a estimação em tempo real da qualidade de um conjunto de enlaces, utilizando o RSSI e informações obtidas a partir de pacotes de dados recebidos. O LQE proposto é capaz de capturar os efeitos causados pelo perfil de multipercorso do ambiente, a influência de fontes de interferência e a assimetria do enlace.

Foram realizados experimentos em um ambiente industrial utilizando rádios IEEE 802.15.4, e modelos foram desenvolvidos para permitir o uso do RSSI na estimação de qualidade de enlace. O LQE proposto neste capítulo foi validado e comparado com o Opt-FLQE a partir de experimentos realizados em um ambiente industrial e os resultados mostraram que o estimador proposto é mais acurado e mais reativo para o tipo de ambiente em estudo. Diferente de outros LQEs propostos na literatura [20–24], o LQE proposto nesta tese não gera tráfego extra na rede por meio do uso de pacotes de diagnóstico ou redundância nos pacotes de dados, nem realiza qualquer processamento no lado do transmissor. Essa abordagem permite realizar a estimação em tempo real utilizando o nó LQE, que pode processar vários valores de RSSI e informações extraídas de pacotes de dados recebidos, enquanto os outros nós da RSSF continuam operando normalmente, o que resulta em uma baixa sobrecarga.

6.1 O Nó LQE

Além dos nós finais, roteadores e nós sorvedouro, esta tese propõe um novo tipo de nó, denominado nó LQE. Os nós finais são responsáveis por adquirir dados a partir de sensores,

realizar processamento local e transmitir as informações até um nó sorvedouro. As transmissões podem ocorrer diretamente, ou indiretamente utilizando roteadores intermediários. Em alguns casos os nós finais podem também realizar alguma ação utilizando atuadores. Em algumas redes, alguns nós podem fazer o papel tanto de nó final como de roteador intermediário para outros nós finais da rede.

O nó LQE realiza a estimação em tempo real da qualidade dos enlaces da RSSF, por meio de uma análise detalhada dos valores de RSSI, enquanto que os outros nós da rede permanecem operando normalmente. Valores brutos de RSSI ou LQI não são suficientes para estimar a qualidade do canal sem fio, mas com uma análise mais detalhada de vários valores coletados é possível utilizar essas métricas para identificar os problemas que afetam a qualidade do canal sem fio. Na solução proposta nesta tese, o RSSI é utilizado para estimar a qualidade do canal, com relação à influência do perfil de multipercorso do ambiente e à influência de fontes de interferência. Além disso, o número de pacotes duplicados é usado para estimar a qualidade do enlace no sentido inverso, de modo que problemas de assimetria também podem ser identificados.

O nó LQE pode ser associado aos nós que recebem pacotes de dados na rede, ou seja, roteadores e nós sorvedouro. No entanto, quando reconhecimento e retransmissão de pacotes são utilizados, os nós finais precisam receber os pacotes de reconhecimento (pacotes ACK). Além disso, pacotes de controle podem também ser transmitidos para os nós finais. Nestes casos, a qualidade do enlace nas duas direções deve ser garantida e o nó LQE precisa ser capaz de estimar a qualidade dos enlaces considerando os dois sentidos.

Em redes com topologia em estrela, apenas um nó LQE é suficiente para ser integrado ao nó sorvedouro. Idealmente o nó LQE precisa ser posicionado na mesma placa de circuito impresso do nó ao qual está associado, com os transceptores e antenas dos dois nós posicionados o mais perto possível um do outro. Assim, problemas que podem aparecer devido à variação espacial na qualidade do canal podem ser mitigados, uma vez que o perfil de multipercorso e a influência de fontes de interferência variam dependendo do local. Nos experimentos descritos em [97] foi observado um comprimento de coerência de 5,5 cm entre transceptores IEEE 802.15.4. Duas antenas separadas por uma distância maior que esta podem ser consideradas completamente descorrelacionadas.

Na Figura 6.1 é ilustrada uma possível topologia de rede que pode ser utilizada para implementar uma RSSFI, baseada na arquitetura proposta. Nesta topologia, os nós finais são organizados em sub-redes e cada sub-rede pode utilizar diferentes canais [50]. Os nós finais transmitem pacotes para um nó intermediário (chamado na figura de nó CH), que encaminha os pacotes para o nó sorvedouro. Alguns padrões projetados para RSSF consideram o uso de topologias em estrela e em árvore, como o Padrão IEEE 802.15.4e [17], que possui como foco aplicações industriais.

A solução proposta também pode ser utilizada para implementar redes que usam rotas redundantes, como definido nos padrões WirelessHART e ISA100.11a. Neste caso, um determinado

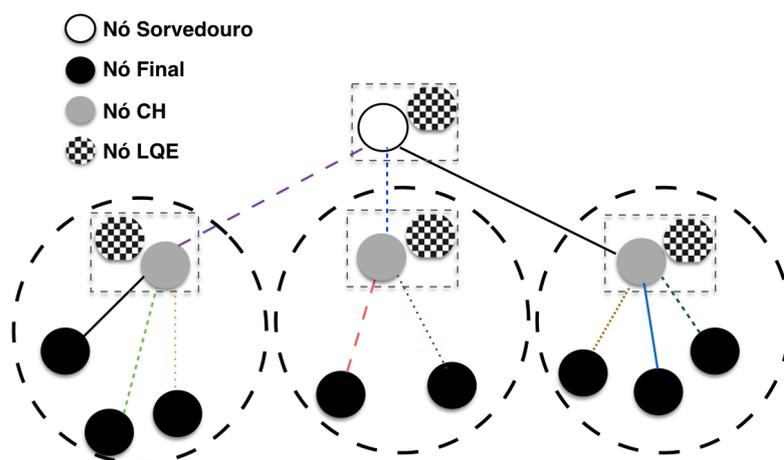


Figura 6.1 Uma topologia em árvore de três camadas para uma RSSFI, utilizando nós LQE.

nó final pode se conectar simultaneamente com múltiplos nós CH e a qualidade de cada enlace pode ser monitorada também de forma simultânea pelos nós LQE integrados aos nós CH. O nó LQE também pode ser usado para ajudar no processo de resincronização da rede após uma troca de canal. No Capítulo 7, é descrito um protocolo multicanal adaptativo, que utiliza a arquitetura proposta.

A adição dos nós LQE provoca apenas um pequeno aumento no custo, uma vez que eles são associados apenas a alguns nós da rede. Por exemplo, em redes pequenas que usam topologia em estrela, é necessário utilizar apenas um nó LQE associado ao nó sorvedouro. No Capítulo 7 uma rede com 53 nós utilizando a arquitetura proposta foi avaliada, e apenas 5 nós da rede foram associados a um nó LQE (menos de 10% dos nós da rede). Existem transceptores IEEE 802.15.4 que custam menos que US\$ 10 (se forem adquiridos em larga escala o custo se torna ainda menor). Os nós LQE são compostos por um microcontrolador de baixo custo e um transceptor. Além disso, como as RSSFIs podem ser implantadas de forma planejada, os nós LQE, CH e sorvedouros podem ser instalados em locais com fonte de alimentação disponível, o que nem sempre é possível para os nós finais, que são instalados ao longo da fábrica para monitorar ou controlar equipamentos, pessoas ou processos.

6.1.1 Projeto e Implementação do Nó LQE

Na Figura 6.2 é ilustrado um diagrama de blocos do nó LQE associado a um nó da RSSF, e uma imagem do protótipo desenvolvido para realizar os experimentos. Este sistema embarcado é composto por dois microcontroladores e dois transceptores IEEE 802.15.4, que operam na faixa de 2,4 GHz. Cada microcontrolador é conectado a um transceptor por meio de um barramento *Serial Peripheral Interface* (SPI), e a uma porta serial, utilizada para enviar dados para um computador. Os dois microcontroladores são conectados por meio de um barramento de 10 *bits*, que pode ser usado para troca de dados entre o nó LQE e o nó da RSSF que está associado a ele (ex: um nó CH ou sorvedouro). O barramento de 10 *bits* é composto por um

bit de interrupção e nove *bits* para transferência de dados. Nos experimentos descritos neste capítulo, apenas esses 10 *bits* foram utilizados, mas é possível estender o barramento em mais sete *bits*, utilizando o barramento de extensão disponível, caso necessário. Foram utilizados transceptores MRF24J40MA e microcontroladores PIC18LF4620 para implementar o protótipo. O MRF24J40MA possui uma antena *Printed Circuit Board* (PCB) com ganho de 2,09 dBi e potência de transmissão de 0 dBm.

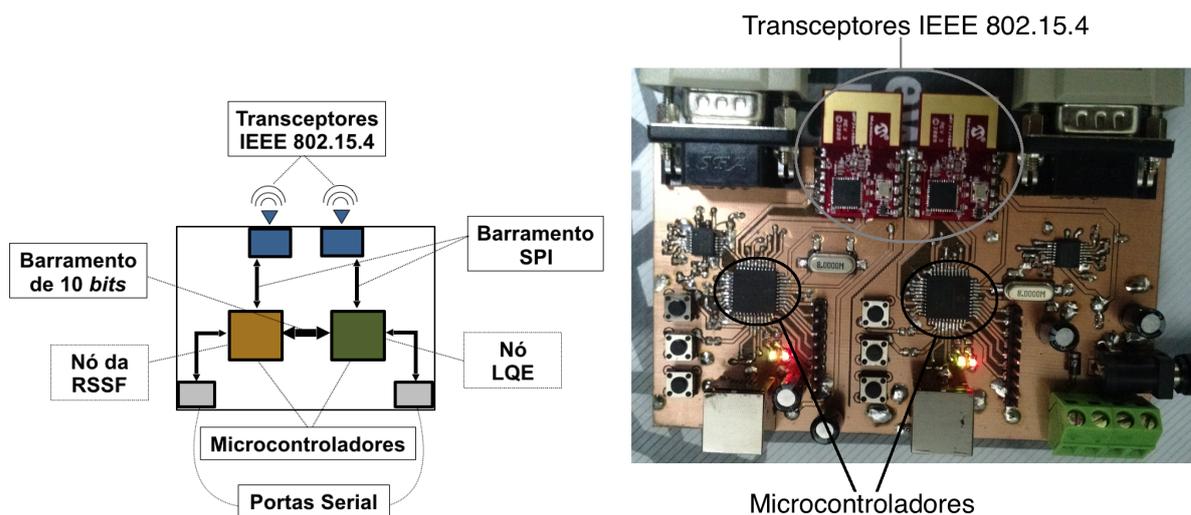


Figura 6.2 Diagrama de blocos do nó LQE e o protótipo desenvolvido para realizar os experimentos.

Um experimento foi realizado para verificar a correlação entre os valores de RSSI obtidos em cada nó, para nove diferentes canais. Na Figura 6.3 são mostrados os valores de potência de recepção em cada nó, calculada utilizando os valores de RSSI obtidos a partir de pacotes recebidos. Os valores foram filtrados utilizando um filtro da média, considerando uma janela de 20 amostras, para permitir uma melhor análise do sombreamento em cada canal. Os nós receberam pacotes em cada canal durante aproximadamente três minutos, com uma taxa de 1 pacote/s. Como o objetivo do experimento foi analisar a correlação entre os sinais recebidos nos dois transceptores, a taxa usada não é relacionada a qualquer aplicação específica, mas existem aplicações que utilizam taxas similares. Por exemplo, no sistema descrito em [46], taxas iguais a 0,3 e 1,56 pacotes por segundo foram consideradas.

Neste experimento o transmissor foi posicionado a cerca de 23 metros do nó LQE, sem linha de visada direta. Os nós foram configurados remotamente para evitar modificar a posição dos nós durante o experimento. É possível observar que o perfil de multipercurso do ambiente afeta de forma diferente os canais, como discutido no Capítulo 3. Embora seja possível notar certa correlação entre os sinais adquiridos em cada transceptor, a correlação geral foi de aproximadamente 47% (correlação de Pearson). As antenas são separadas por uma distância de aproximadamente 2 cm. Essa correlação é compatível com os resultados descritos em [97] para essa distância. A diferença mais significativa foi observada quando os nós estavam configurados para utilizar o Canal 21. Durante essa replicação, uma troca de equipe ocorreu na fábrica, o

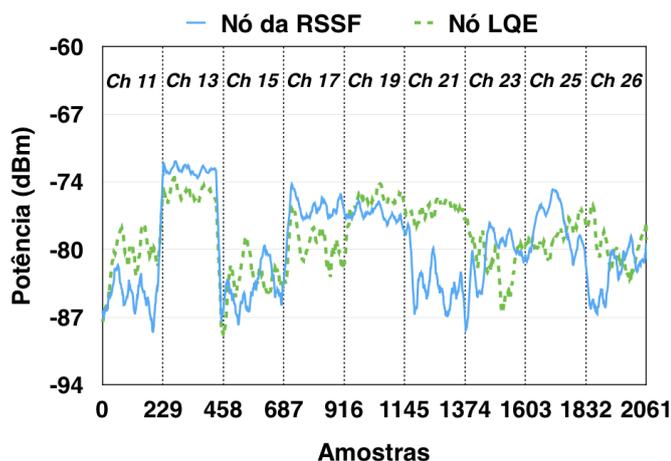


Figura 6.3 Potência recebida no nó da RSSF e no nó LQE.

que causou uma grande movimentação de pessoas ao redor dos nós. Isso pode ter gerado uma diferença significativa no conjunto de raios recebidos por cada antena.

Devido a essa correlação relativamente pequena, o estimador proposto utiliza valores de RSSI obtidos a partir do nó da RSSF para realizar a estimação da qualidade do canal, com relação ao efeito do multipercurso. No entanto, todo processamento é realizado no nó LQE. Para cada pacote recebido, o nó da RSSF associado ao nó LQE transfere o valor de RSSI do pacote recebido utilizando o barramento de 10 *bits* que conecta os dois microcontroladores. Além do valor de RSSI, um *bit* também é passado ao nó LQE para indicar se o pacote recebido é duplicado; ou seja, se possui o mesmo identificador do último pacote recebido anteriormente. Essa informação é utilizada para estimar a qualidade do sentido inverso do enlace. Este procedimento é realizado utilizando poucas instruções. No protótipo, um *clock* de 32 MHz (fonte de *clock* de 8 MHz e *4X Phase Lock Loop*) foi utilizado. No PIC18LF4620 cada instrução é executada em quatro ciclos de *clock*, de modo que o tempo gasto para verificar se o pacote é duplicado e repassar as informações para o nó LQE é menor que 4 μ s (32 ciclos de instrução), o que causa uma pequena sobrecarga no nó da RSSF. Na próxima seção o estimador proposto é descrito e são fornecidos mais detalhes sobre a sua implementação no protótipo.

6.2 O Estimador de Qualidade de Enlace

Esta seção descreve experimentos realizados em ambientes industriais reais. Os dados obtidos a partir dos experimentos foram utilizados para desenvolver modelos que são utilizados para implementar o estimador. O LQE proposto é executado do lado do receptor, e combina três métricas: P_f , C_a , e P_b . A métrica P_f é baseada na análise de valores de RSSI obtidos de pacotes de dados recebidos e é capaz de capturar problemas de somreamento e atenuação por multipercurso na qualidade do canal. Essa métrica possui alta correlação com a taxa de recepção de pacote no receptor (denominada daqui em diante de TRP direta). A métrica C_a é

baseada na análise de valores de RSSI obtidos em períodos sem recepção de pacotes e captura a influência de fontes de interferência externas na qualidade do canal. A métrica P_b é baseada no número de pacotes duplicados recebidos, e possui alta correlação com a taxa de entrega de pacote no transmissor (denominada daqui em diante de TRP inversa). Usando estas três métricas é possível obter uma caracterização geral do enlace, que considera diferentes fatores que influenciam em sua qualidade.

Foram utilizados transceptores compatíveis com o Padrão IEEE 802.15.4 para realizar os experimentos, que implementam o mecanismo CSMA/CA na camada de acesso ao meio. No entanto, os modelos desenvolvidos são independentes do protocolo CSMA/CA, uma vez que usam informações de camada física (RSSI) e informações sobre pacotes duplicados, que também são independentes do protocolo de acesso ao meio. Portanto, os modelos podem ser utilizados considerando transceptores que implementam outros protocolos de acesso ao meio, como nos padrões WirelessHART, ISA100.11a e IEEE 802.15.4e, que também utilizam a camada física definida pelo Padrão IEEE 802.15.4.

6.2.1 Estimação da Qualidade do Sentido Direto do Enlace

Foram realizados experimentos em um ambiente industrial para obter amostras de RSSI, LQI e TRP, para diferentes canais e dois cenários diferentes. Dois nós foram utilizados, um como transmissor e um como receptor. Cinco replicações foram realizadas para cada cenário e para cada canal considerado. Em cada replicação, o transmissor foi configurado para transmitir 1.000 pacotes em *broadcast* (sem reconhecimento de pacote e sem retransmissão) com uma taxa de 10 pacotes/s. Cada pacote possuía 70 bytes de carga útil, incluindo um identificador. O receptor foi configurado para obter o RSSI, o LQI e o identificador de cada pacote recebido. As informações obtidas foram transmitidas para um computador por meio de uma porta serial. Antes de cada replicação, os nós foram configurados remotamente utilizando um terceiro nó, de modo a evitar mudanças nas posições do transmissor e do receptor.

Nenhuma aplicação específica foi considerada neste experimento. No entanto, existem aplicações que utilizam taxas de transmissão semelhantes. Por exemplo, no sistema descrito em [3] os pacotes carregam 72 bytes de carga útil e os nós sensores transmitem a uma taxa de 20 pacotes/s, durante os períodos de transmissão. Para o sistema descrito em [39], pacotes com 96 bytes de carga útil são transmitidos a uma taxa de 4 pacotes/s.

Os nós utilizados neste experimento são compostos por um microcontrolador PIC18LF4620 e um transceptor IEEE 802.15.4, o MRF24J40, com potência de transmissão de 0 dBm, e uma antena omnidirecional com um ganho de 3 dBi.

No primeiro cenário, os nós foram colocados a uma distância de cerca de 13 m, com linha de visada direta, e havia poucos objetos metálicos perto dos nós. Na Figura 6.4 é possível ver o transmissor e o local onde o receptor foi posicionado no primeiro cenário. Foram realizados experimentos para os canais 11, 13, 15, 19 e 21. No segundo cenário, os nós foram colocados a

uma distância de cerca de 30 m, sem linha de visada direta. Nesse cenário, havia vários objetos metálicos perto dos nós. Na Figura 6.5 é possível ver o transmissor no segundo cenário. O receptor foi posicionado no mesmo local do primeiro cenário e foram realizados experimentos para os canais 11, 15, 19 e 21.



Figura 6.4 Ambiente onde os experimentos foram realizados para o Cenário 1.



Figura 6.5 Ambiente onde os experimentos foram realizados para o Cenário 2.

Para analisar as características do canal, duas métricas foram obtidas a partir das amostras de RSSI e LQI. A primeira métrica, denominada R_{avg} , é o valor médio normalizado do RSSI ou do LQI, e a segunda métrica, denominada d_{avg} , representa a variação média do sinal em relação ao valor médio. Antes de calcular R_{avg} , as amostras de RSSI e LQI foram filtradas usando um filtro da mediana, para eliminar possíveis *outliers*. A métrica R_{avg} é obtida usando a Equação 6.1 e a métrica d_{avg} é obtida usando a Equação 6.2.

$$R_{avg} = \frac{\sum_{V_i \in M_R} V_i}{|M_R|}, \quad (6.1)$$

$$d_{avg} = \frac{\sum_{V_i \in M_R} |1 - \frac{V_i}{R_{avg}}|}{|M_R|}, \quad (6.2)$$

em que M_R é o conjunto de valores de RSSI ou LQI obtidos em uma replicação, com os valores já normalizados para ficar entre 0 e 1, e $|M_R|$ é o número de amostras no conjunto M_R .

Como nenhuma fonte de interferência estava presente no ambiente durante este experimento, as diferenças nos valores de TRP, R_{avg} e d_{avg} em cada replicação são apenas devidas ao somreamento e à atenuação por multipercurso. Assim, o modelo descrito nesta seção é capaz de capturar a qualidade do canal, em relação aos efeitos causados no canal pelo perfil de multipercurso do ambiente.

No Cenário 1 a TRP foi alta, uma vez que havia uma linha de visada direta entre transmissor e receptor, com uma pequena distância entre eles. No entanto, houve diferença nos valores obtidos com cada canal, e o Canal 15 apresentou a melhor qualidade, com 99,8% de TRP, em média, enquanto que o Canal 13 apresentou a pior qualidade, com 96,8 % de TRP, em média. No Cenário 2, a TRP foi menor, uma vez que não havia linha de visada direta entre transmissor e receptor, e a distância era de cerca de 30 m. Além disso, havia vários objetos metálicos perto do transmissor. Neste cenário, o Canal 15 também apresentou a melhor qualidade, com uma TRP de cerca de 84,2%, em média. O Canal 19 apresentou a pior qualidade, com 66,6% de TRP, em média.

Nas Figuras 6.6 e 6.7 são mostrados os resultados ao usar RSSI e LQI para calcular as métricas, respectivamente. Em todos os gráficos, a TRP é mostrada no eixo Y. Todos os valores são apresentados em percentual. Na Figura 6.6(a) é mostrada a relação entre a métrica R_{avg} [RSSI] e a TRP considerando os dois cenários juntos e na Figura 6.6(b) é mostrada a relação entre a métrica d_{avg} [RSSI] e a TRP. Na Figura 6.7(a) é mostrada a relação entre a métrica R_{avg} [LQI] e a TRP considerando os dois cenários juntos e na Figura 6.7(b) é mostrada a relação entre a métrica d_{avg} [LQI] e a TRP.

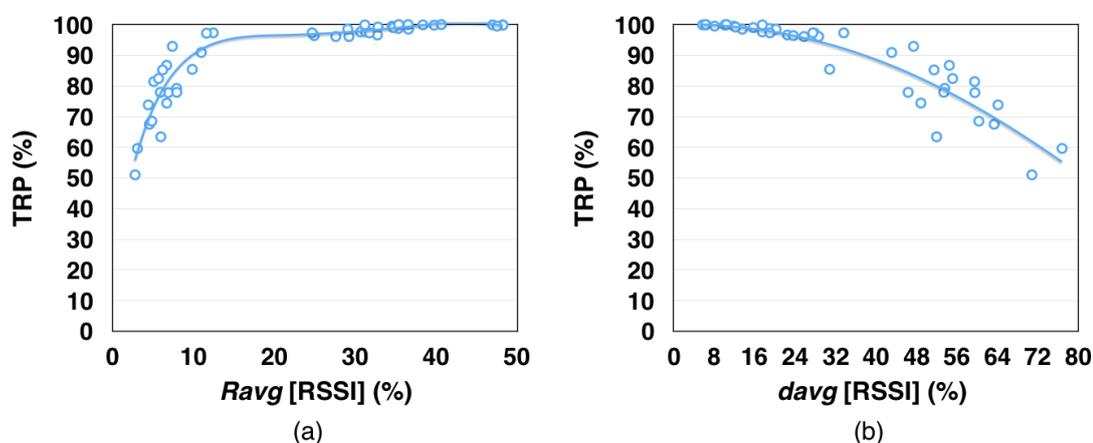


Figura 6.6 (a) Relação entre R_{avg} e TRP, usando RSSI. (b) Relação entre d_{avg} e TRP, usando RSSI.

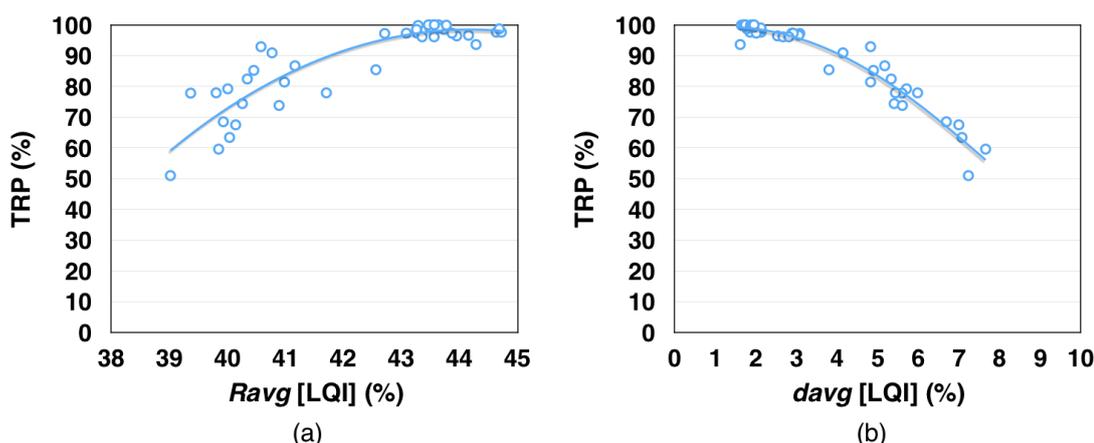


Figura 6.7 (a) Relação entre R_{avg} e TRP, usando LQI. (b) Relação entre d_{avg} e TRP, usando LQI.

Nos gráficos mostrados nas Figuras 6.6(a) e 6.7(a), os valores relativos ao Cenário 2 estão concentrados à esquerda, uma vez que o valor máximo de R_{avg} [RSSI] para esse cenário foi de 12,46% e o valor máximo de R_{avg} [LQI] foi de 42,6%. Nos gráficos mostrados nas Figuras 6.6(b) e 6.7(b), os valores relativos ao Cenário 2 estão concentrados à direita, com d_{avg} [RSSI] maior que 28%, e com maior dispersão, e com d_{avg} [LQI] maior que 2,9%.

A métrica d_{avg} [RSSI] apresentou uma maior correlação com a TRP no Cenário 1 e a métrica R_{avg} [RSSI] teve melhor correlação no Cenário 2. Isto pode ser explicado devido à baixa quantidade de objetos metálicos fixos perto dos nós no Cenário 1, o que diminui a quantidade de raios invariantes no tempo, e assim a variação em pequena escala domina no Cenário 1. Por outro lado, havia muitos objetos metálicos fixos perto do transmissor no Cenário 2, causando a presença de muitos raios invariantes no tempo que influenciam o sombreamento.

Ao usar LQI, o d_{avg} [LQI] apresentou uma correlação maior que o R_{avg} [LQI]. Como discutido no Capítulo 4, na Seção 4.3.1, a implementação do LQI é específica do fabricante [110], o que torna difícil desenvolver uma solução geral usando esta métrica. Por exemplo, em [9] e [55] o LQI apresentou grande variação nos experimentos, usando o transceptor CC2420, da Texas Instruments, e em [11] e [111], os valores de LQI variaram muito pouco usando o transceptor MRF24J40 da Microchip, mesmo em cenários muito diferentes. Nos experimentos descritos nesta tese, foram utilizados transceptores MRF24J40. É possível ver a partir da Figura 6.7 que os valores das métricas permaneceram dentro de um pequeno intervalo ao usar LQI, devido à baixa variação dessa métrica em transceptores MRF24J40. Ao utilizar o RSSI foi possível observar uma maior diferença entre os valores obtidos para os dois cenários diferentes. Devido a essas limitações do LQI, o RSSI foi escolhido para desenvolver o modelo para estimar a qualidade do enlace no sentido direto.

Com base nos resultados, foram implementadas duas abordagens para estimar a qualidade do sentido direto do enlace. A primeira é baseada em duas Redes Neurais Artificiais (RNA), usando as métricas d_{avg} [RSSI] e R_{avg} [RSSI] como parâmetros. No restante deste capítulo, d_{avg} [RSSI] será referido simplesmente como d_{avg} e R_{avg} [RSSI] como R_{avg} .

Uma RNA consiste em uma rede de unidades de processamento (os neurônios) que são conectadas por meio de sinapses. Cada sinapse possui um peso, e cada neurônio trabalha como um combinador linear, que soma um conjunto de entradas ponderadas por pesos e provê uma saída por meio de uma função de ativação [128]. A função de ativação pode ser, por exemplo, uma função de limiar (saídas são 0 ou 1) ou uma função sigmóide, que provê uma saída real entre 0 e 1 ou entre -1 e 1. Os valores de entrada e saída da RNA devem ser normalizados para ficarem entre 0 e 1 ou entre -1 e 1.

Uma RNA é capaz de aprender a partir do seu ambiente. Os pesos das ligações entre os neurônios armazenam o conhecimento da RNA. Outra importante característica é a capacidade de generalização; ou seja, prover respostas corretas para entradas que não foram utilizadas no processo de treinamento [129]. Os tipos mais comuns de técnicas de aprendizado são o aprendizado não supervisionado, aprendizado supervisionado e aprendizado por reforço [128]. No aprendizado supervisionado a RNA é submetida a um conjunto de entradas e às saídas desejadas para cada entrada. Após isso, outras entradas, diferentes daquelas utilizadas no processo de treinamento, são utilizadas para realizar a validação da RNA.

Na primeira RNA implementada, existem dois neurônios na camada de entrada, que recebem como entrada as métricas d_{avg} e R_{avg} , respectivamente, oito neurônios na camada oculta e um neurônio na camada de saída, que gera o valor de P_f como saída. Na segunda RNA, há apenas um neurônio na camada de entrada, que recebe a métrica R_{avg} como entrada. Foram realizados testes variando o número de neurônios ocultos de um a dez neurônios, e o melhor resultado foi obtido para oito neurônios. Essa topologia é simples e pode ser executada facilmente em um nó sensor. Como os valores processados pela RNA são reais, variando de 0 a 1, uma função sigmóide foi usada como função de ativação.

Metade dos valores obtidos nos experimentos foi utilizada para treinar a RNA, e a outra metade foi utilizada para validação. Valores obtidos a partir de um terceiro experimento (em campo aberto, sem objetos metálicos e com linha de visada direta) também foram utilizados para validação. O erro desejado para as RNAs foi definido como 0,0001. A primeira RNA convergiu após 3.560 épocas, com um erro de 0,0001. A segunda RNA convergiu após 800.000 épocas, com um erro de 0,000116.

Como a métrica R_{avg} captura uma característica importante para cenários em que há muitos raios invariantes no tempo, como no Cenário 2, para este tipo de cenário apenas essa métrica foi usada. Para o Cenário 2, o uso da métrica d_{avg} causa um erro maior na estimativa em comparação com o uso de apenas a métrica R_{avg} . Por outro lado, para o Cenário 1 o valor de d_{avg} é muito importante, pois fornece informações sobre a atenuação em pequena escala. Nesse cenário, o efeito do sombreamento não causou uma grande diferença na TRP.

Assim, para valores de R_{avg} superiores a 0,1, a primeira RNA é usada (com d_{avg} e R_{avg} como parâmetros), e para valores de R_{avg} menores ou iguais a 0,1 a segunda RNA é usada (com R_{avg} como parâmetro). De acordo com os resultados mostrados na Figura 6.6, este limiar é uma boa aproximação para distinguir os dois tipos de cenários considerados nos experimentos.

A segunda abordagem desenvolvida para estimar a qualidade da ligação direta do enlace é baseada em um modelo polinomial, usando apenas R_{avg} como parâmetro. O melhor ajuste para a curva foi obtido com um polinômio de grau seis, com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9464$. Com o modelo polinomial a métrica P_f pode ser obtida usando

$$P_f = -3943,5R_{avg}^6 + 6506,6R_{avg}^5 - 4279R_{avg}^4 + 1430,9R_{avg}^3 - 256,47R_{avg}^2 + 23,77R_{avg} + 0,022. \tag{6.3}$$

Na Figura 6.8(a) é mostrada a TRP medida para todas as replicações realizadas nos três cenários (Cenários 1 e 2 na indústria e Cenário 3 em um campo aberto) e os valores estimados usando o modelo baseado em RNA, e usando o Modelo Polinomial (MP) de acordo com a Equação 6.3.

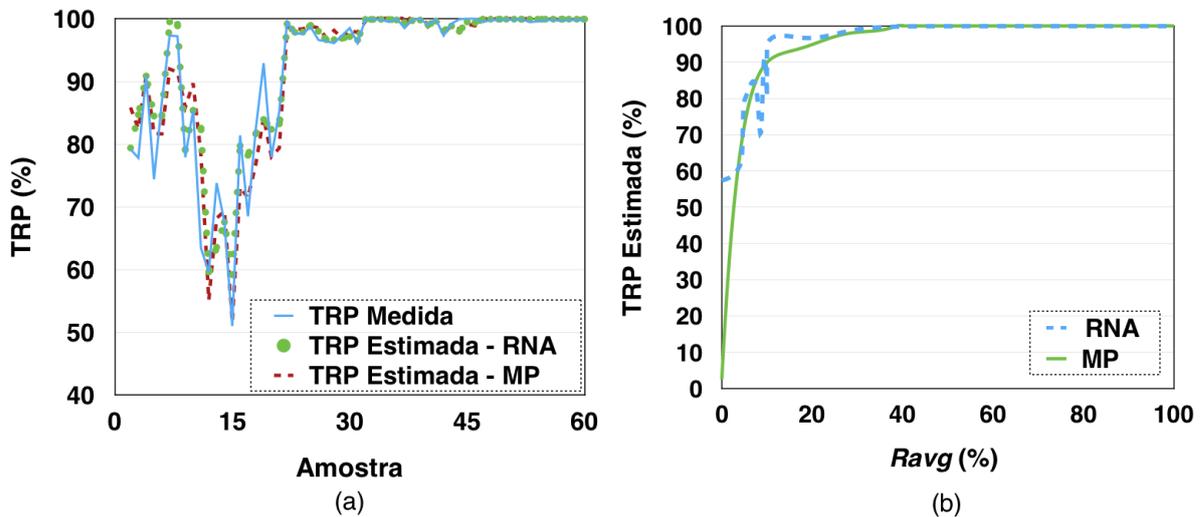


Figura 6.8 (a) Validação dos valores obtidos a partir do modelo baseado em RNA e do modelo polinomial (MP). (b) Valores fornecidos pelos modelos para todos os valores possíveis de R_{avg} .

Na Tabela 6.1 são mostrados a correlação de Spearman, o p -value e o erro absoluto médio para cada abordagem.

Tabela 6.1 Correlação entre P_f e a TRP para cada modelo.

	Modelo baseado em RNA	Modelo polinomial
Correlação	82,5%	88,1%
p -value	$4,97 \times 10^{-16}$	$1,5 \times 10^{-20}$
Valor absoluto médio	1,74	2,23

A partir do resultado, é possível observar que os modelos foram capazes de estimar a TRP para todos os cenários considerados para validação, com boa precisão. No entanto, como o conjunto de dados usado para treinar a RNA não cobre todas as faixas de valores de TRP e R_{avg} , o modelo baseado em RNA não generalizou para valores de TRP inferiores a 50%. Por

outro lado, o modelo polinomial é capaz de fornecer resposta para todos os valores de R_{avg} e TRP, como pode ser visto na Figura 6.8(b). Além disso, o modelo polinomial forneceu uma maior correlação com o valor de TRP medido e é menos complexo computacionalmente do que o modelo baseado em RNA. Portanto, o modelo polinomial foi utilizado para implementar o estimador proposto.

O ruído de fundo pode variar para diferentes nós na rede e ao longo do tempo [130]. Assim, para obter uma melhor precisão, pode ser necessário usar o valor da relação sinal-ruído em vez do RSSI diretamente. No entanto, nos experimentos realizados o ruído de fundo permaneceu abaixo do limiar de sensibilidade do transceptor para todos os canais durante quase 100% do tempo. Por exemplo, durante os experimentos descritos na Seção 6.2.2, para identificar problemas de interferência, mais de 97% dos valores de RSSI adquiridos no Canal 26 foram iguais a zero, e para os outros canais o RSSI também permaneceu a maior parte do tempo igual a zero, exceto no caso de picos devido a fontes de interferência externa. O Canal 26 é o único canal do Padrão IEEE 802.15.4 que está livre de interferência de redes IEEE 802.11 [130].

Em outros ambientes, pode ser necessário subtrair o valor de RSSI relacionado ao ruído de fundo dos valores de RSSI dos pacotes, antes de computar as métricas, a fim de obter uma melhor precisão. Usando o nó LQE, os valores de RSSI são adquiridos continuamente para identificar problemas de interferência, então também é possível medir o nível de ruído de fundo em tempo real usando as amostras de RSSI adquiridas no nó LQE, sem causar sobrecarga no nó da RSSF.

Os valores de RSSI associados aos pacotes são medidos durante a recepção dos primeiros oito símbolos do pacote. Assim, o RSSI medido é independente do tamanho do pacote. Para pacotes maiores, a probabilidade de recepção pode ser menor em alguns casos. No entanto, a distribuição de erro de *bits* é uniforme para pacotes corrompidos devido a problemas de atenuação por multipercurso, como observado nos experimentos descritos em [88]. Por outro lado, para pacotes corrompidos por interferência de redes Wi-Fi, quanto mais distante um *bit* está do início do pacote, maior a probabilidade de que ele será corrompido [88].

Assim, somente em cenários com interferência externa o tamanho do pacote pode causar um impacto significativo na estimativa. No entanto, como a métrica P_f é usada apenas para estimar a qualidade do canal com relação aos problemas de somreamento e atenuação por multipercurso, o tamanho do pacote pode não influenciar significativamente a estimativa. Além disso, pacotes com 70 *bytes* de carga útil foram considerados nos experimentos, que é grande o suficiente para muitas aplicações. Em cenários com interferência externa, se apenas a métrica P_f for utilizada a qualidade do enlace pode ser superestimada, mas na abordagem proposta nesta tese a influência de fontes de interferência também é considerada, por meio de outra métrica, chamada C_a (descrita na Seção 6.2.2). Assim, é possível estimar com precisão a qualidade do enlace tanto em cenários com interferência quanto sem interferência.

O modelo descrito nesta seção é capaz de capturar a qualidade do canal no lado do receptor, com relação aos efeitos causados pelo perfil de multipercurso do ambiente. Como discutido

no Capítulo 3, mudanças bruscas podem ocorrer nas características dos canais ao longo do tempo. Assim, um canal pode apresentar boa qualidade por vários minutos ou horas, e começar a apresentar baixa qualidade, devido a alguma alteração significativa no perfil de multipercurso do ambiente. O modelo descrito é capaz de identificar essas mudanças na qualidade do canal.

O uso de um nó dedicado é importante nesta abordagem, uma vez que muitos valores de RSSI precisam ser adquiridos e processados para calcular as métricas com precisão e em tempo real. Além disso, é necessário monitorar múltiplos enlaces simultaneamente. Usando um nó dedicado, a execução do estimador pode ser feita sem causar sobrecarga na RSSF.

Avaliação para Diferentes Taxas de Transmissão de Pacote

Os resultados mostrados na Seção 6.2.1 consideraram os valores de RSSI obtidos a partir de todos os pacotes recebidos durante um período de 100 segundos. Durante este intervalo de tempo, 1.000 pacotes foram transmitidos com uma taxa de 10 pacotes/s. No entanto, em algumas aplicações, a Taxa de Transmissão de Pacote (TTP) pode ser inferior a 10 pacotes/s. Para investigar a acurácia do estimador para outros valores de TTP, foi realizada uma avaliação considerando uma TTP igual a 10, 5, 1, 0,5 e 0,2 pacotes/s, e considerando um intervalo de tempo de aquisição menor. Nas análises feitas nesta seção, a TRP medida foi obtida calculando um novo valor para cada 200 pacotes recebidos. Para obter o valor de P_f considerando valores de TTP menores que 10 pacotes/s, os valores de RSSI foram descartados da amostra original de maneira uniforme. Assim, para cada estimativa foi utilizado um conjunto de 200, 100, 20, 10 e 4 valores de RSSI, para TTPs iguais a 10, 5, 1, 0,5 e 0,2 pacotes/s, respectivamente.

Na Figura 6.9 são mostradas as curvas da TRP medida e da estimada para cada TTP considerada. Por meio de uma análise visual da Figura 6.9 é possível observar um aumento na diferença entre a TRP medida e a estimada para os valores mais baixos de TTP (0,2 e 0,5 pacotes/s), conforme esperado. No entanto, as diferenças são menos evidentes para TTPs iguais a 1 pacote/s, 5 pacotes/s e 10 pacotes/s.

Na Tabela 6.2 são mostrados a correlação de Spearman e o p -value, para cada TTP, considerando os dois cenários no ambiente industrial. Neste caso, para todos os valores de TTP a correlação foi alta e a correlação para 5 pacotes/s e 10 pacotes/s foi a mesma. A Tabela 6.3 contém os valores de correlação considerando apenas o Cenário 2, no qual uma maior variação na TRP é observada. Neste caso, a correlação para 0,2 pacotes/s foi baixa, e maiores diferenças foram observadas para os diferentes valores de TTP.

Mesmo com valores mais baixos de TTP é possível estimar a qualidade do enlace no sentido direto. Para valores de TTP superiores a 0,5 pacotes/s, a correlação entre a TRP medida e a estimada foi alta para o intervalo de aquisição utilizado, mesmo considerando apenas o Cenário 2. No entanto, se a TTP é muito baixa, é necessário utilizar um intervalo de aquisição maior, uma vez que não é possível estimar adequadamente a qualidade do canal usando apenas algumas amostras de RSSI, conforme discutido na Seção 4.3.1 do Capítulo 4. Por exemplo, considerando uma TTP igual a 0,2 pacotes/s, é necessário adquirir valores durante alguns minutos para

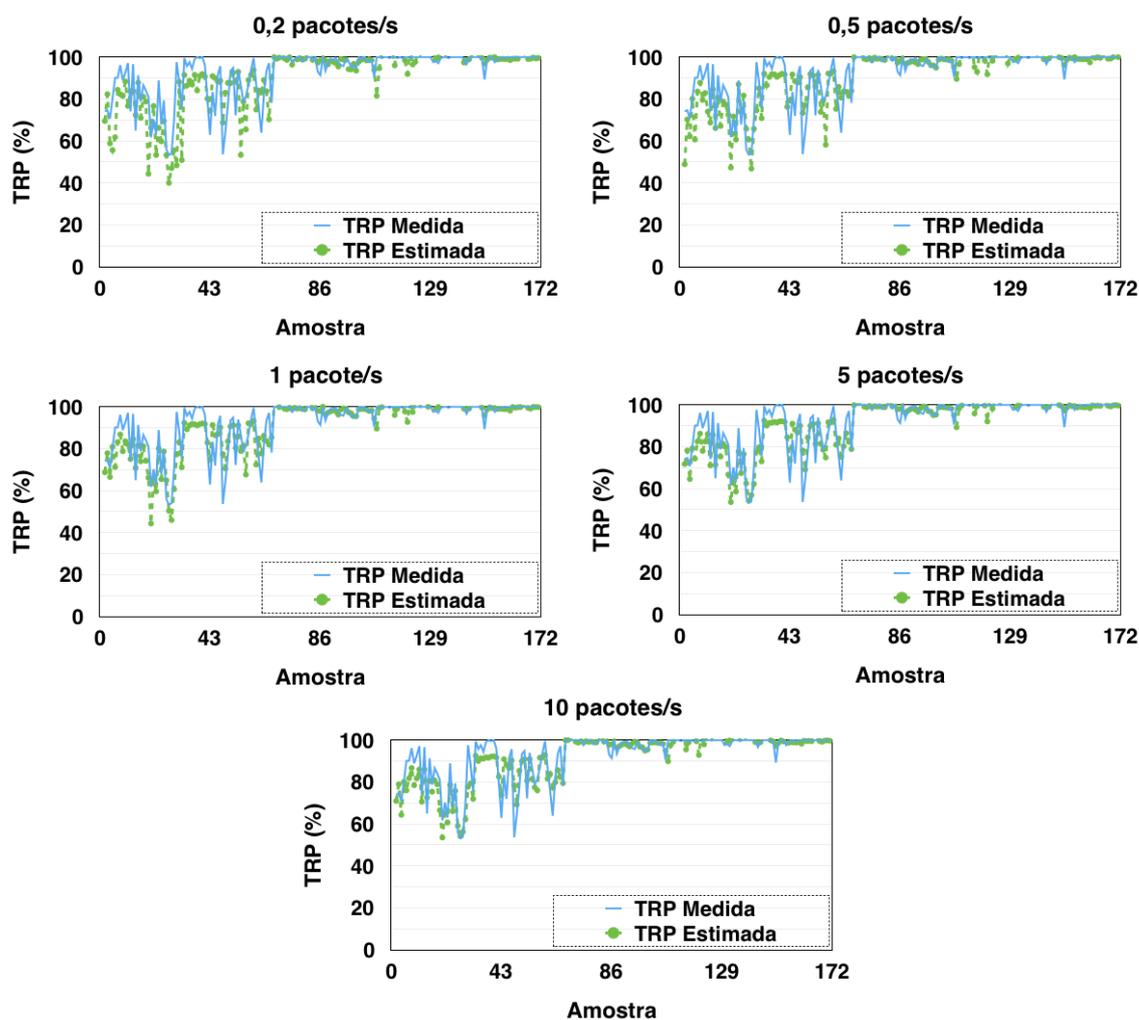


Figura 6.9 Valores obtidos a partir do modelo polinomial para diferentes taxas de transmissão de pacote.

Tabela 6.2 Correlação entre P_f e TRP para cada TTP, usando o modelo polinomial, considerando todos os cenários.

	Correlação	<i>p-value</i>
0,2 pacotes/s	80,4%	$5,55 \times 10^{-40}$
0,5 pacotes/s	82,4%	$1,5 \times 10^{-43}$
1 pacote/s	84,0%	$9,93 \times 10^{-47}$
5 pacotes/s	84,7%	$2,37 \times 10^{-48}$
10 pacotes/s	84,7%	$3,45 \times 10^{-48}$

Tabela 6.3 Correlação entre P_f e TRP para cada TTP, usando o modelo polinomial, considerando apenas o Cenário 2.

	Correlação	<i>p-value</i>
0,2 pacotes/s	56,6%	$6,01 \times 10^{-7}$
0,5 pacotes/s	70,2%	$3,60 \times 10^{-11}$
1 pacote/s	77,4%	$1,5 \times 10^{-14}$
5 pacotes/s	81,7%	$3,39 \times 10^{-17}$
10 pacotes/s	82,5%	$9,99 \times 10^{-18}$

obter uma boa precisão. No entanto, para muitas RSSFIs, tais como as descritas em [3], [39], e [46], que utilizam TTPs maiores que 1 pacote/s, intervalos de aquisição menores podem ser utilizados.

Em ambientes menos dinâmicos, como nos experimentos descritos em [75], a aquisição de valores durante alguns minutos é aceitável, uma vez que o canal permanece estacionário por um período de tempo longo (até 7 horas no experimento descrito em [75]), em que a potência média de recepção permanece constante. Outra alternativa é transmitir alguns pacotes vazios durante tempos de ausência de operação dos nós sensores, o que permite melhorar o processo de estimação, mas consome mais recursos. A análise dessa relação de compromisso é específica da aplicação.

A métrica P_f é usada apenas para estimar a qualidade do canal com relação aos problemas de somreamento e atenuação por multipercurso. Na abordagem proposta nesta tese, a influência da interferência é avaliada por meio de outra métrica (explicada na Seção 6.2.2). Assim, mesmo para RSSFs que usam uma baixa TTP, os problemas de interferência podem ser identificados rapidamente usando o nó LQE e a métrica descrita na Seção 6.2.2. Na Seção 6.3 foi utilizada uma TTP igual a 1 pacote/s para validar o LQE proposto e o nó LQE, usando o modelo descrito nesta seção, e os modelos descritos nas seções 6.2.2 e 6.2.3.

6.2.2 Estimação da Influência de Fontes de Interferência

Alguns dispositivos podem causar interferência na banda de 2,4 GHz, como fornos micro-ondas, mas esses dispositivos não estão normalmente presentes na indústria [80]. A maioria dos dispositivos industriais, tais como motores elétricos e inversores de frequência, não causam interferência na banda de 2,4 GHz [27]. Por outro lado, redes Wi-Fi podem causar interferências muito destrutivas em RSSFs [3].

Apesar de as redes Wi-Fi causarem grande interferência em RSSFs, é possível obter uma boa qualidade de serviço, dependendo dos requisitos da aplicação e do tráfego das redes Wi-Fi presentes no ambiente. Por exemplo, nos experimentos descritos em [131] o canal permaneceu livre durante cerca de 60% do tempo em períodos com tráfego Wi-Fi ativo. Além disso, o tráfego Wi-Fi é geralmente baseado em rajadas e deixa espaços que podem ser usados pelos nós da RSSF para se comunicar. No entanto, canais livres de interferência devem ser priorizados pela RSSF e os estimadores de qualidade de enlace devem ser capazes de identificar a presença de fontes de interferência. Além disso, é importante saber o nível de interferência causada nos canais, de modo a escolher o melhor canal, quando não é possível escolher um canal totalmente livre de interferência.

O modelo descrito na Seção 6.2.1 é capaz de identificar problemas devido ao perfil de multipercurso do ambiente, mas não captura o efeito da interferência. Como apenas os valores de RSSI dos pacotes recebidos são usados para calcular P_f , esta métrica pode apresentar um valor

alto, mesmo com um número elevado de pacotes perdidos devido a colisões. Assim, é necessário capturar os efeitos de interferência para estimar adequadamente a qualidade do enlace.

Nos experimentos descritos na Seção 6.2.1 nenhuma fonte de interferência estava presente no ambiente. Outros experimentos na mesma indústria foram realizados em um ambiente com interferência externa causada por redes Wi-Fi, operando nos canais 1, 6 e 11. Uma varredura foi feita usando um *laptop*, e sete redes Wi-Fi no Canal 1, quatro no Canal 6 e cinco no Canal 11 foram identificadas. No momento da varredura, a potência média do sinal das redes Wi-Fi foi de -64,8 dBm para o Canal 1, -75,3 dBm para o Canal 6 e -66,2 dBm para o Canal 11.

Na Figura 6.10 são mostrados os valores de RSSI (de 0 a 255) obtidos para os canais 13, 17 e 23 do IEEE 802.15.4, durante 5 s, com uma taxa de 200 amostras/s, com apenas as redes Wi-Fi ativas. O Canal 13 sobrepõe-se ao Canal 1 do Wi-Fi, o Canal 17 sobrepõe-se ao Canal 6 do Wi-Fi e o Canal 23 sobrepõe-se ao Canal 11 do Wi-Fi. A interferência foi mais elevada para o Canal 13. Isso é compatível com a quantidade de redes Wi-Fi operando em cada canal. Os valores de RSSI obtidos a partir do Canal 17 são menores, devido à menor potência de sinal das redes Wi-Fi no Canal 6. No gráfico foi incluída uma linha de limiar, que corresponde a um RSSI igual a 10.

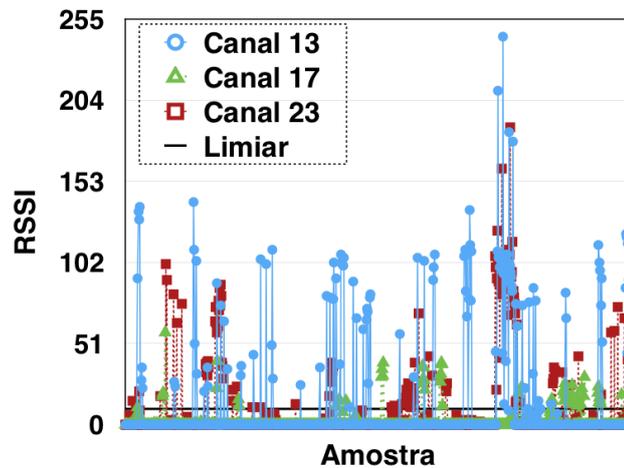


Figura 6.10 Interferência nos canais 13, 17 e 23.

Para estimar a influência da interferência, utilizou-se a disponibilidade do canal (C_a) como métrica, semelhante à métrica descrita em [112]. Para calcular C_a o nó LQE adquire valores de RSSI usando seu transceptor, durante os períodos sem recepção de pacote. Usando o nó LQE é possível adquirir muitos valores de RSSI para analisar a influência de fontes de interferência, sem impor sobrecarga ao nó da RSSF associado a ele. A disponibilidade do canal é calculada por

$$C_a = 1 - \frac{\sum_{i=0}^{i < n} b_i}{n}, \quad (6.4)$$

em que n é o número de amostras utilizadas para calcular C_a , e b_i é igual a 0 ou 1 dependendo do valor de um limiar (τ). Os valores de b_i são calculados usando

$$b_i = \begin{cases} 0, & \text{se } R_i < \tau; \\ 1, & \text{se } R_i \geq \tau; \end{cases} \quad (6.5)$$

em que R_i é o valor de RSSI adquirido na i -ésima amostra.

Como discutido na Seção 6.1.1, a correlação entre os sinais recebidos nos transceptores do nó LQE e do nó da RSSF pode ser relativamente baixa em alguns casos. Dessa forma, foi investigado se é possível calcular a métrica C_a de forma acurada utilizando valores de RSSI obtidos no nó LQE.

Na Figura 6.11 são mostrados os valores médios de C_a , em percentual, para nove canais diferentes, e calculados usando valores de RSSI adquiridos a partir dos dois transceptores simultaneamente. Para calcular os valores de C_a foi usado um valor de $n = 200$ (um intervalo de 1 s). Os nós adquiriram valores de RSSI em cada canal durante aproximadamente um minuto. Foi utilizado um nível de confiança de 95% para os intervalos de confiança. Um limiar $\tau = 10$ foi usado, o que é suficiente para diferenciar entre o ruído de fundo e a interferência. Analisando os valores obtidos para o canal 26, que não se sobrepõe a qualquer canal de Wi-Fi, o RSSI apresentou um valor médio igual a 0,021 e um desvio padrão igual a 1,074.

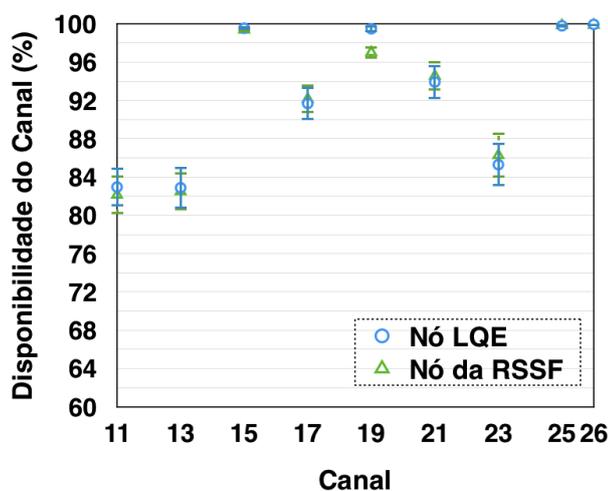


Figura 6.11 Disponibilidade do canal para nove canais diferente.

Apenas os valores para o Canal 19 apresentaram diferença significativa, em que o valor médio para o nó LQE foi igual a 0,99 e o valor médio para o nó da RSSF foi 0,97. Como para calcular C_a é utilizado um limiar, as diferenças entre os valores individuais de RSSI adquiridos a partir de cada transceptor causam um impacto menor para esta métrica. Assim, é viável calcular o C_a usando valores de RSSI adquiridos a partir do nó LQE.

Mesmo com a presença de muitas redes Wi-Fi nos canais 1, 6 e 11, alguns canais da RSSF permaneceram livres de interferência. A partir da Figura 6.11 é possível ver que os canais 11 e 13 da RSSF, que se sobrepõem com o Canal 1 do Wi-Fi, têm a menor disponibilidade entre todos os canais avaliados.

6.2.3 Estimação da Qualidade do Enlace no Sentido Inverso

As métricas P_f e C_a são capazes de identificar a qualidade do canal no receptor, com relação a problemas devido ao perfil de multipercursos do ambiente e interferência. No entanto, para caracterizar a qualidade geral do enlace é necessário considerar a qualidade do sentido inverso, uma vez que os enlaces geralmente são assimétricos [9]. Muitas aplicações usam reconhecimento de pacote e retransmissão. Pacotes de controle também podem ser transmitidos a partir do nó sorvedouro para os nós finais.

Os estimadores que consideram a assimetria de enlace geralmente usam pacotes de diagnóstico transmitidos em *broadcast*, como os LQEs ETX [20], Four-Bit [21], F-LQE [22] e Opt-FLQE [23]. Alguns estimadores, como Four-Bit e Opt-FLQE, também calculam uma estimativa do RNP no transmissor, que permite capturar de forma implícita a qualidade das duas direções do enlace. Esses estimadores causam sobrecarga na rede devido aos pacotes de diagnóstico e executam processamento no transmissor. Geralmente os transmissores são os nós finais da RSSF e possuem restrições de recursos mais severas em comparação com os nós sorvedouro e nós CH. Dessa forma, o estimador proposto neste trabalho utiliza apenas as informações obtidas no receptor (ex: nó sorvedouro ou nó CH associado ao nó LQE) e executa todo o processamento no nó LQE.

Para cada pacote recebido, o nó da RSSF que está associado ao nó LQE transfere o valor do RSSI do pacote e um *bit* para indicar se o pacote recebido é duplicado, utilizando o barramento de 10 *bits* que conecta os dois microcontroladores. Uma duplicação de pacote ocorre quando o pacote é recebido com êxito, mas o pacote de reconhecimento (ACK) não é recebido corretamente no transmissor. Assim, foi estudada a correlação entre o número de pacotes duplicados e a TRP no sentido inverso e foi desenvolvido um modelo para estimar a qualidade do sentido inverso do enlace usando esta informação.

Foram realizados experimentos para obter o número total de pacotes recebidos e o número de pacotes duplicados no receptor para três canais diferentes (11, 15 e 25). Em cada replicação o transmissor foi configurado para transmitir 1.800 pacotes com uma taxa de 1 pacote/s (duração de 30 minutos). Cada pacote tinha 70 *bytes* de carga útil, incluindo um identificador. O número máximo de tentativas de retransmissão por pacote foi igual a dois.

Para obter a TRP real no sentido inverso, o transmissor foi configurado para guardar em memória o número total de pacotes transmitidos (incluindo as retransmissões) e o número total de ACKs recebidos em intervalos de 10 segundos, durante toda a replicação. No final da replicação, os dados salvos no transmissor foram recuperados utilizando uma porta serial. Os nós utilizados neste experimento possuem um transceptor MRF24J40MA, com uma potência de transmissão de 0 dBm e uma antena PCB com um ganho de 2,09 dBi. O local onde o transmissor foi posicionado é mostrado na Figura 6.14, do lado esquerdo (na Seção 6.3).

Considerando uma janela de n pacotes recebidos para realizar a estimação, o número médio de retransmissões por pacote (N_r) é calculado usando a expressão

$$N_r = \frac{N_d}{n - N_d}, \quad (6.6)$$

em que N_d é o número de pacotes duplicados dentro do conjunto de n pacotes.

Na Figura 6.12(a) é mostrada a relação entre o N_r e a TRP medida para o sentido inverso do enlace. Como o número máximo de tentativas de retransmissão é dois, este é o valor máximo de N_r . Foi utilizado $n = 10$ neste experimento.

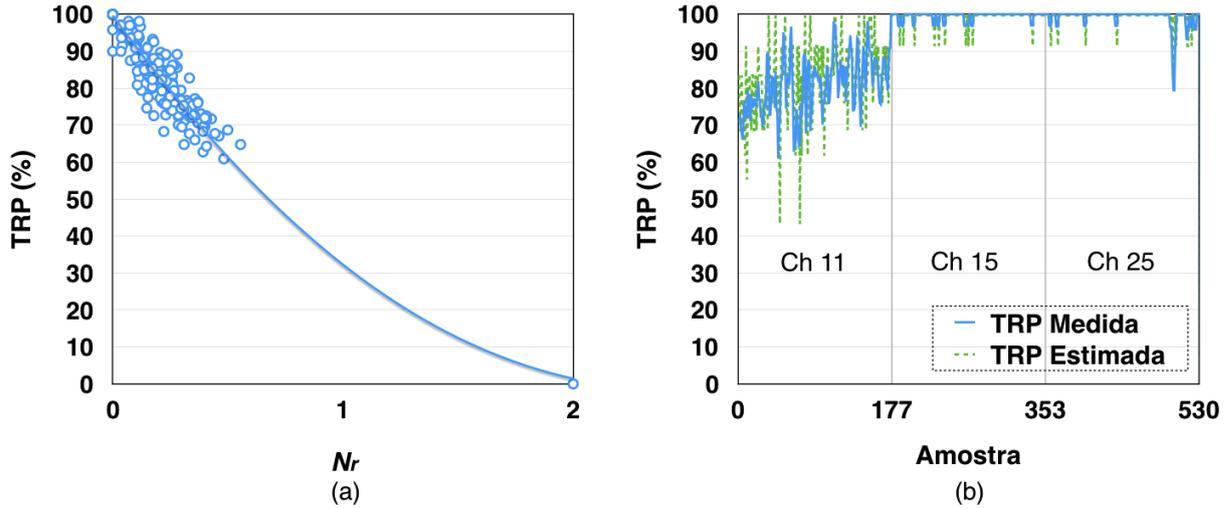


Figura 6.12 (a) Relação entre N_r e TRP. (b) Validação dos valores obtidos a partir do modelo.

Com base nessas medições, foi desenvolvido um modelo polinomial para calcular a estimativa da qualidade do enlace no sentido inverso (P_b) usando os valores de N_r como parâmetro. O melhor ajuste para a curva foi obtido com um polinômio de grau dois, com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9387$. Com o modelo polinomial o P_b pode ser obtido usando

$$P_b = 0,1785N_r^2 - 0,8485N_r + 0,997. \quad (6.7)$$

Na Figura 6.12(b) são mostrados os valores de TRP medidos, para as três replicações, e os valores estimados usando a Equação 6.7. A correlação de Spearman entre P_b e a TRP medida foi de 88% e o erro absoluto médio foi de 3,06. Na análise de correlação, o p -value foi $4,93 \times 10^{-174}$.

A TRP no sentido inverso do enlace foi menor no Canal 11, provavelmente devido a problemas de interferência. Os canais 15 e 25 estavam livres de interferência, como pode ser visto na Figura 6.11. Analisando os pacotes duplicados, a qualidade do enlace no sentido inverso pode ser estimada, independente das causas que provocaram falhas na recepção dos pacotes ACK.

6.3 Validação

Para validar o estimador proposto, foi realizado um conjunto de experimentos para verificar se o estimador é capaz de identificar com precisão a qualidade do enlace e reagir rapidamente a mudanças persistentes em sua qualidade.

6.3.1 Caracterização do Ambiente Industrial

O ambiente em que os experimentos foram realizados, tanto para obter os modelos quanto para validar a abordagem proposta, tem características semelhantes às de outros ambientes industriais, considerados em trabalhos que realizaram estudos experimentais para caracterizar o canal sem fio, como em [6] e [84].

Com os valores de RSSI obtidos nos experimentos descritos na Seção 6.2.1 e nos experimentos descritos nesta seção foi possível obter os parâmetros para o modelo de sombreamento log-normal, considerando os valores obtidos para quatro distâncias (13, 17, 23 e 30 m) e vários canais diferentes. Na Figura 6.13 a relação entre a perda de percurso e a distância entre transmissor e receptor. No eixo X foi considerado o valor de $10 \log_{10}(d/d_0)$, em que d é a distância entre transmissor e receptor e d_0 é a distância de referência. Para obter os parâmetros do modelo, foram utilizados como referência os valores obtidos no Cenário 1 (ver Seção 6.2.1). Assim, $d_0 = 13$ m e a perda de percurso na distância de referência ($L(d_0)$) é igual à potência média de recepção, considerando todas as replicações realizadas para este cenário.

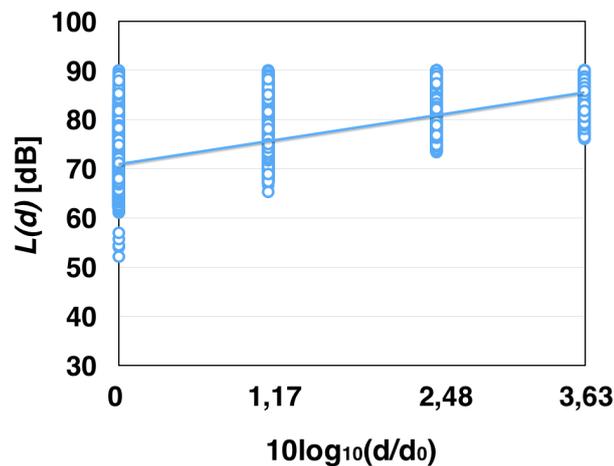


Figura 6.13 Relação entre a perda de percurso e a distância entre transmissor e receptor.

A Tabela 6.4 contém os valores dos parâmetros obtidos para o modelo de sombreamento log-normal. Mesmo considerando apenas algumas amostras de distância para obter os parâmetros, os valores obtidos são semelhantes aos encontrados em [6] para um ambiente industrial e para a banda de 2,4 GHz. Em [6] pode ser encontrada uma caracterização mais detalhada, em termos de perda de percurso e atenuação em um ambiente industrial. Em [84] os parâmetros para o modelo de sombreamento log-normal foram encontrados para diferentes ambientes no

Tabela 6.4 Parâmetros para o modelo de sombreamento log-normal do ambiente industrial onde os experimentos foram realizados.

Expoente de Perda (n)	Sombreamento Log-normal (σ)	d_0	$L(d_0)$
4,47	5,49 dB	13 m	70,3 dB

contexto de aplicações de *smart-grid*, incluindo ambientes industriais. No Capítulo 3 desta tese, é descrita a caracterização de um ambiente industrial *outdoor*.

6.3.2 Validação do Estimador

As métricas P_f , C_a e P_b podem ser analisadas separadamente ou combinadas para calcular a qualidade geral do enlace (L_q), de acordo com

$$L_q = P_f \times C_a \times P_b. \quad (6.8)$$

O estimador proposto nesta tese e o estimador Opt-FLQE foram implementados para serem executados no protótipo mostrado na Figura 6.2. Dois nós sensores foram configurados para transmitir pacotes *unicast* (com ACK e retransmissão) com uma taxa de 1 pacote/s e pacotes de diagnóstico, transmitidos em *broadcast*, com uma taxa de 0,2 pacotes/s. O nó LQE também foi configurado para enviar pacotes de diagnóstico em *broadcast* com uma taxa de 0,2 pacotes/s. Os pacotes de diagnóstico foram utilizados para calcular o estimador Opt-FLQE, uma vez que o LQE proposto nesta tese utiliza apenas informações obtidas a partir dos pacotes de dados transmitidos na rede. O primeiro nó final foi colocado a 23 metros de distância do nó sorvedouro (Figura 6.14 do lado esquerdo) e o segundo transmissor a 17 metros de distância (Figura 6.14 do lado direito), sem linha de visada direta.

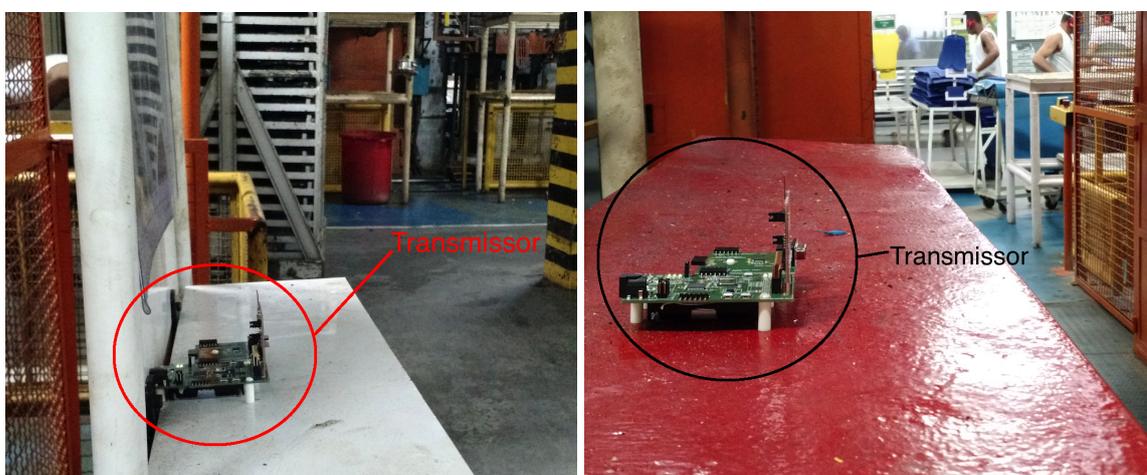


Figura 6.14 Transmissores na planta industrial.

Para os experimentos descritos nesta seção, uma janela de $n = 20$ pacotes de dados foi usada para calcular P_f e P_b , que é um intervalo de 20 s, no melhor caso, considerando a taxa de transmissão de pacotes utilizada. Para calcular C_a foi utilizado um número variável de amostras, dependendo do número de aquisições entre duas recepções de pacote. O nó LQE foi configurado para adquirir RSSI com uma taxa de 200 amostras/s, em períodos sem recepção do pacote. Um filtro do tipo média móvel exponencialmente ponderada (*Exponentially Weighted Moving Average* – EWMA) EWMA foi usado para suavizar os valores de P_f , P_b e L_q , tornando-os mais estáveis e resistentes a variações pequenas e rápidas na qualidade do enlace. O valor $\alpha = 0,6$ foi usado para o filtro EWMA. Em [23] $\alpha = 0,9$ foi usado para o filtro EWMA para calcular o valor final do estimador Opt-FLQE, mas para este experimento usou-se $\alpha = 0,6$ para obter mais reatividade. As métricas usadas pelo Opt-FLQE foram calculadas utilizando uma janela de cinco pacotes de diagnóstico, o que consiste em um intervalo de 25 s, no melhor do caso, para este experimento.

Na primeira replicação do experimento, o Canal 20 foi utilizado durante 30 minutos. Na segunda replicação, o Canal 16 foi usado durante 60 minutos. Assim como nos experimentos descritos na Seção 6.2.3, os transmissores salvaram na memória o número total de pacotes transmitidos e o número total de ACKs recebidos em cada intervalo de 10 segundos, durante toda a replicação. O receptor foi configurado para transmitir o identificador de todos os pacotes recebidos para um computador usando uma porta serial. Com os dados obtidos a partir dos transmissores, e a partir do receptor, é possível calcular a TRP real em ambos os sentidos para cada enlace após os experimentos, para ser usado como um valor de referência.

Como dois transmissores foram usados, um *bit* do barramento de 10 *bits* foi usado para transmitir ao nó LQE um identificador do transmissor. Assim, apenas sete *bits* foram utilizados para transmitir os valores RSSI para o nó LQE. Uma vez que para este cenário os valores de RSSI são sempre inferiores a 127, o uso de sete bits é possível. Além disso, para valores de RSSI maiores ou iguais a 127 o valor de P_f é muito próximo a 1, de modo que pode-se sempre utilizar sete *bits* para transmitir os valores de RSSI, sem perda de acurácia. Para monitorar a qualidade de um maior número de enlaces em simultâneo, são necessários mais *bits* para passar os valores de RSSI, o identificador do transmissor e o *bit* indicando a duplicação de pacote para o nó LQE. Isso pode ser feito com um barramento maior ou usando duas operações de escrita no barramento. Uma vez que o tempo gasto para transmitir dados usando o barramento é muito pequeno (menos de 4 μs), esta abordagem é viável. Com o protótipo desenvolvido, é possível estender o barramento em mais sete *bits*, usando o barramento de extensão, o que permitira monitorar vários enlaces, com transmissores diferentes, em simultâneo.

Como referência aos valores estimados, utilizou-se a Taxa de Recepção de Pacote Real (TRPR) medida, isto é, a multiplicação da TRP em ambos os sentidos, que foram calculadas *off-line*, utilizando os dados guardados nos transmissores, e com os dados gerados pelo receptor. Na Figura 6.15 são mostrados os valores fornecidos pelo estimador proposto (L_q), os valores gerados pelo estimador Opt-FLQE e a TRPR medida, para a replicação com o Canal 20. Na

Figura 6.16 são mostrados os resultados para a replicação usando o Canal 16. O enlace do Transmissor 1 apresentou uma qualidade inferior em ambos os casos, uma vez que ele estava posicionado em um local mais distante do receptor que o Transmissor 2.

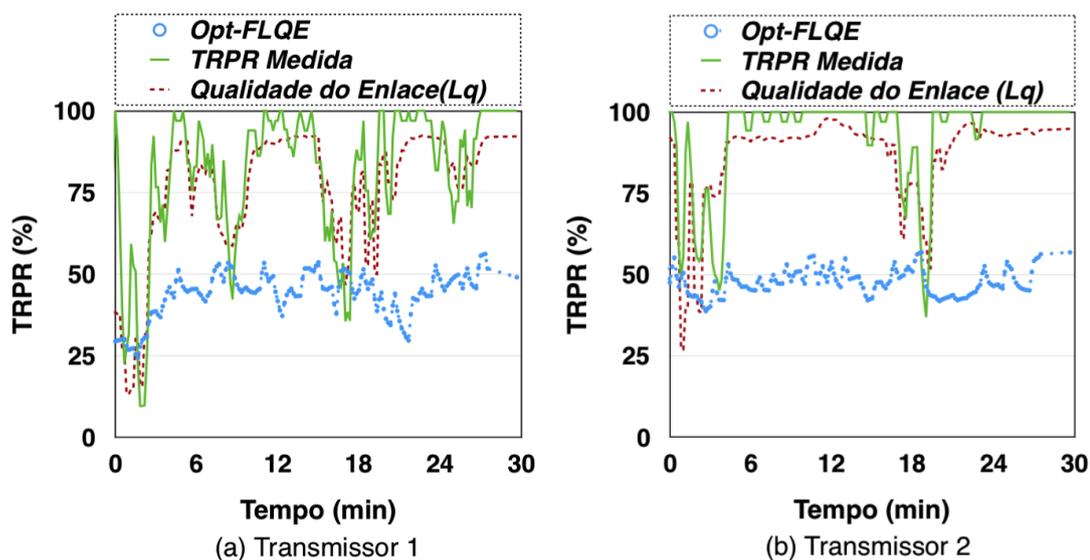


Figura 6.15 Resultados para o Canal 20, durante 30 minutos.

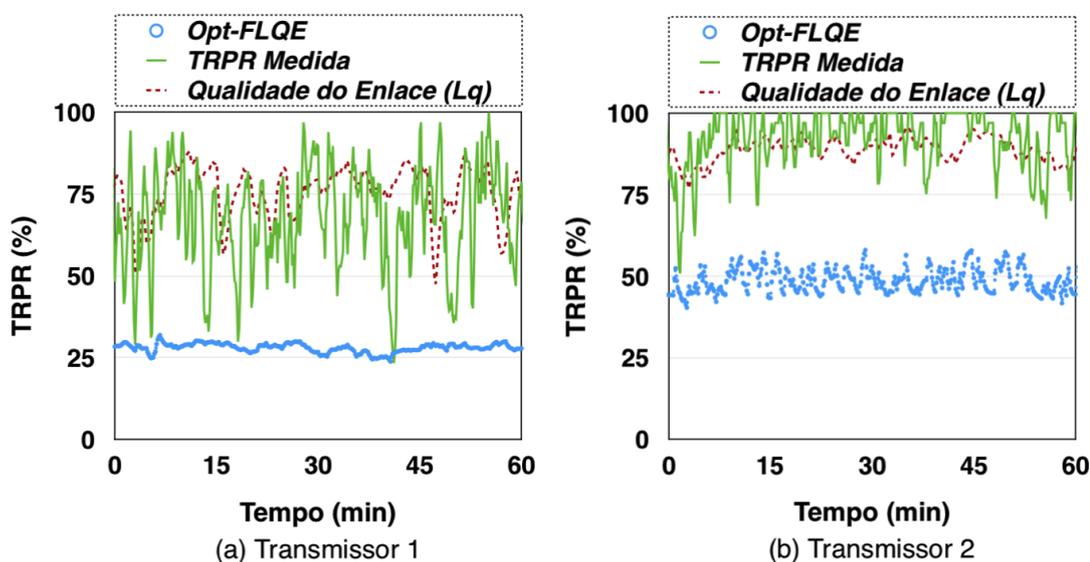


Figura 6.16 Resultados para o Canal 16, durante 60 minutos.

Os valores de Opt-FLQE variaram em torno de 50 para ambos os enlaces ao usar o Canal 20, mas para o Transmissor 1 a variação foi maior, devido à maior variação da qualidade do enlace para este transmissor. Para a replicação com o Canal 16, o valor de Opt-FLQE variou em torno de 25 para o enlace com o Transmissor 1, e cerca de 50 para o enlace com o Transmissor 2.

Os valores fornecidos pelo estimador Opt-FLQE, que são mostrados nas Figuras 6.15 e 6.16, são compatíveis com os resultados descritos em [23], para os experimentos considerando

enlaces com qualidades intermediárias. O Opt-FLQE é muito estável, mas em alguns casos apresenta baixa reatividade a variações mais persistentes na qualidade do enlace, como pode ser observado para os resultados da Figura 6.15. Para este cenário, a mudança na qualidade do enlace que ocorreu no minuto 15 apenas foi observada pelo Opt-FLQE após cerca de três minutos, enquanto que o L_q reagiu prontamente.

O estimador proposto (L_q) apresentou boa precisão e reatividade, mas é menos estável do que o Opt-FLQE. No entanto, é capaz de identificar rapidamente mudanças abruptas e persistentes na qualidade do enlace. A estabilidade pode ser melhorada usando um fator mais elevado para o filtro EWMA. Os valores de Opt-FLQE não necessariamente representam uma estimativa direta da TRPR, o que explica a alta diferença absoluta entre a TRPR e o Opt-FLQE. No entanto, essas duas métricas precisam apresentar uma alta correlação, uma vez que ambas estão relacionadas com a qualidade global do enlace.

Para comparar a precisão do Opt-FLQE e do estimador proposto, calculou-se a correlação de Spearman utilizando como referência o TRPR medido e os dados obtidos nas duas replicações e para ambos os transmissores. A correlação entre os valores fornecidos pelos estimadores e a TRPR medida, bem como o p -value correspondente, são mostrados na Tabela 6.5. Ambos os estimadores têm uma correlação de Spearman relativamente alta com a TRPR medida, mas a correlação para o estimador proposto é significativamente maior que a correlação para o Opt-FLQE. O Opt-FLQE usa funções lineares para calcular as funções de aderência da lógica *fuzzy*, o que é muito simplista. O estimador proposto utiliza modelos mais elaborados na estimativa, com base em dados obtidos de experimentos realizados em ambientes industriais reais.

Tabela 6.5 Correlação entre os valores fornecidos pelos estimadores avaliados e a TRPR medida.

	Opt-FLQE	Estimador proposto (L_q)
Correlação	59,4%	72,5%
p -value	$8,67 \times 10^{-102}$	$8,99 \times 10^{-173}$

Na Figura 6.17 é possível observar a análise das métricas individualmente, considerando o enlace com o Transmissor 1, nos canais 16 (Ch 16) e 20 (Ch 20). É possível notar que o Canal 20 foi mais afetado por fontes de interferência, como pode ser visto nas Figuras 6.17(c) e 6.17(g), o que causou uma grande influência na qualidade da enlace em alguns intervalos de tempo. Por exemplo, para o Canal 20, durante os primeiros três minutos, e em torno do minuto 18, o C_a foi baixo, o que causou uma queda na qualidade para ambos os enlaces (Transmissor 1 e Transmissor 2), como pode ser visto na Figura 6.15. Outras variações na qualidade do enlace, para o Canal 20, foram devidas às variações na qualidade do canal, como pode ser visto na Figura 6.17(b), que mostra os valores de P_f durante toda a replicação.

No Canal 16 toda a variação na qualidade dos enlaces foi devido à qualidade do canal sem fio, como pode ser visto na Figura 6.17(f). As Figuras 6.17(d) e 6.17(h) mostra a qualidade do enlace no sentido inverso, tanto o valor medido quanto o valor estimado. Para o Canal 20, a qualidade do enlace no sentido inverso também foi afetada pelas fontes de interferência, o que

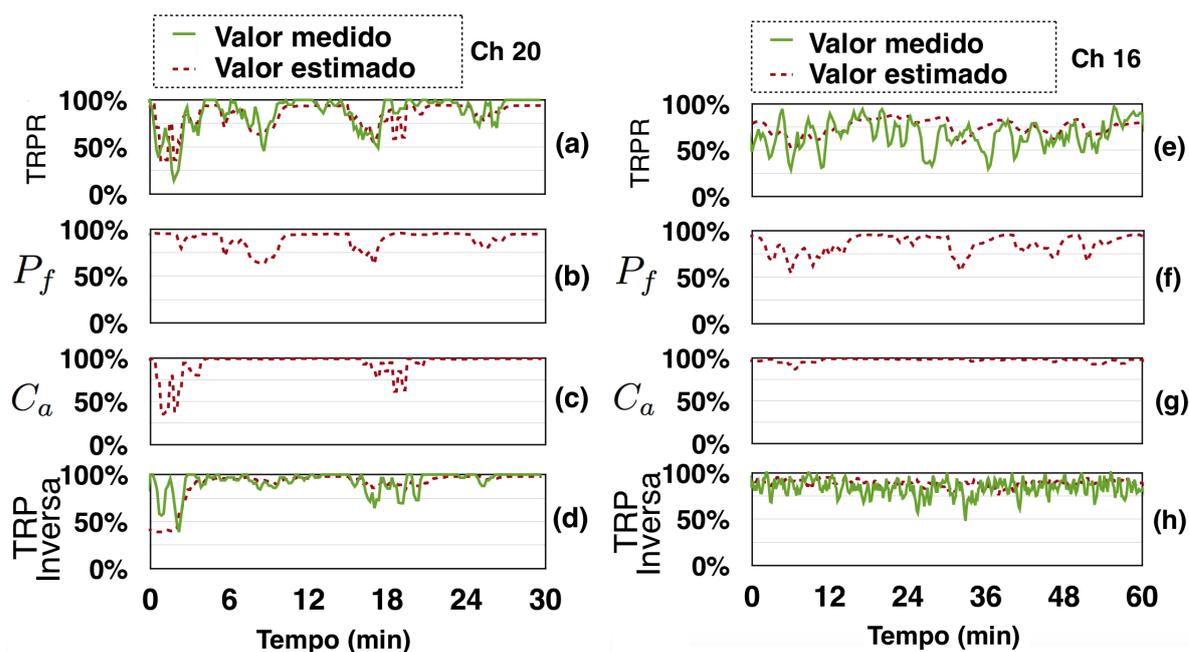


Figura 6.17 Análise das métricas individualmente.

explica as semelhanças com o gráfico da Figura 6.17(c). Em geral, a qualidade do enlace no sentido inverso foi melhor para ambos os canais, o que mostra a assimetria do canal sem fio.

Diferente de outros estimadores, tais como ETX, Four-Bit, F-LQE e Opt-FLQE, o estimador proposto permite identificar as principais causas de uma baixa qualidade no enlace (qualidade de canal, influência de interferência ou assimetria) por meio da análise das métricas individualmente. Isso pode ajudar os protocolos a tomar a melhor decisão para cada caso. Por exemplo, quando o enlace é afetado por fontes de interferência, como no caso ilustrado na Figura 6.17(c), a mudança de rota pode não ser muito útil, principalmente se a fonte de interferência também afeta o transmissor, como no caso ilustrado na Figura 6.17(d). Além disso, um mecanismo de alocação dinâmica de canais precisa escolher um canal com um certo espaçamento em frequência neste caso, uma vez que a maior parte das fontes de interferência afeta canais adjacentes. Quando a baixa qualidade de enlace é apenas devido à baixa qualidade de canal, como no caso ilustrado na Figura 6.17(f), ou devido a assimetria, alterar rota ou canal pode ajudar a melhorar a qualidade do enlace.

O tempo de execução dos algoritmos, para calcular P_f , C_a e P_b , foi de aproximadamente 40 ms (usando um compilador C não otimizado e gratuito). Usando a memória disponível no microcontrolador PIC18LF4620 é possível monitorar até 60 enlaces simultaneamente. Com um compilador C otimizado (a versão Pro), o tempo de execução pode ser menor. Existem modelos semelhantes de microcontroladores, também de baixo custo, que possuem mais memória, caso seja necessário implementar um nó LQE capaz de monitorar a qualidade de mais enlaces. Para monitorar 60 enlaces simultaneamente, o estimador levaria 2,4 s para realizar os cálculos para todos os enlaces, o que permite monitorar em tempo real a qualidade do link usando o nó LQE, mesmo em cenários com muitos transmissores, já que o canal sem fio permanece estacionário

por um período muito maior do que o tempo necessário para estimar a qualidade dos enlaces, como pode ser visto em [75] e [76]. Além disso, o estimador proposto reage rapidamente a mudanças abruptas e persistentes na qualidade do enlace, como demonstrado nesta seção.

O estimador proposto não sobrecarrega os nós da RSSF, ou a rede, já que todo o processamento é executado no lado do receptor, usando os nós LQE, e as métricas são calculadas usando informações extraídas dos pacotes de dados recebidos. Nos experimentos descritos nesta seção, o Opt-FLQE aumentou o tráfego de rede em 20%, devido à transmissão dos pacotes de diagnóstico, e também foram gastos recursos dos transmissores, para calcular as métricas usadas no Opt-FLQE, e para enviar e receber pacotes de diagnóstico, o que pode causar um aumento significativo no consumo de energia, e pode prejudicar a execução da aplicação principal. Mesmo com este aumento elevado no tráfego de rede, o Opt-FLQE apresentou baixa reatividade em comparação com o LQE proposto nesta tese.

Foi utilizada uma janela de 20 valores de RSSI (e informações sobre duplicidade de pacote) para calcular as métricas. Assim, o tempo para adquirir todas as amostras pode ser de alguns minutos se a qualidade do enlace se tornar muito baixa. Para mitigar esse problema, uma janela deslizante poderia ser usada para permitir a computação de novos valores com maior frequência. Além disso, o estimador proposto nesta tese é capaz de identificar problemas de interferência em tempo real e independente da recepção de pacotes na rede. Dessa forma, para problemas de interferência, o estimador é capaz de detectar rapidamente a queda na qualidade do enlace, mesmo que nenhum pacote de dados seja recebido. Para detectar problemas na qualidade do canal sem fio e problemas de assimetria, o estimador depende da recepção de pacotes de dados.

Idealmente, os protocolos adaptativos também precisam implementar mecanismos para identificar problemas de desvanecimento profundo nos canais, uma vez que nesses casos poucos pacotes de dados são recebidos (em alguns casos, nenhum pacote). Como o estimador necessita que pacotes sejam recebidos para realizar a estimação da qualidade do canal, os nós podem passar muito tempo desconectados até que o estimador note a queda na qualidade do enlace, caso mecanismos auxiliares para identificação de desvanecimento profundo não sejam implementados. O protocolo descrito no Capítulo 7 considera este problema.

6.4 Conclusões do Capítulo

Este capítulo descreveu uma solução baseada no uso de nós dedicados (nós LQE) para monitorar a qualidade dos enlaces em uma RSSFI. Os nós LQE são associados a receptores (por exemplo, o nó sorvedouro) e usam o RSSI e informações obtidas a partir de pacotes de dados recebidos para identificar interferência e problemas de multipercurso que afetam a qualidade do enlace em ambas as direções. Esta abordagem é viável para uma RSSFI, uma vez que a rede pode ser implantada de forma planejada; ou seja, os nós sorvedouro, roteadores e nós LQE podem ser instalados em locais com alimentação disponível, o que nem sempre é possível com os nós finais.

Os canais definidos pelo Padrão IEEE 802.15.4 são fracamente correlacionados em frequência, e trocar o canal pode melhorar a qualidade de serviço da rede, quando o canal em uso apresenta baixa qualidade. O estimador proposto e o nó LQE podem ser usados para implementar mecanismos de alocação dinâmica de canais e também outros tipos de protocolos, como protocolos de roteamento adaptativo.

Um conjunto de experimentos foi realizado em um ambiente industrial real para investigar como as amostras de RSSI podem ser usadas para implementar o nó LQE. Modelos foram desenvolvidos para identificar a qualidade do canal sem fio, com relação a problemas de atenuação e sombreamento, e problemas de interferência, usando informações obtidas a partir de amostras de RSSI, o que não é possível com a análise individual, ou valores médios de pequenas amostras de RSSI. A qualidade no sentido inverso do enlace é estimada usando a informação sobre pacotes duplicados no receptor. Assim, diferente de outros LQEs propostos na literatura, o LQE proposto neste trabalho não gera tráfego extra por meio do uso de pacotes de diagnóstico ou redundância nos pacotes de dados, nem executa processamento no transmissor, que é usualmente o nó final da RSSF.

O LQE proposto foi validado por meio de experimentos em ambiente industrial, e foi comparado com o Opt-FLQE. O LQE proposto teve uma maior correlação com a TRP geral medida e uma maior reatividade a alterações bruscas na qualidade dos enlaces. A solução proposta pode ser aplicada para diferentes RSSFs, considerando diferentes protocolos de acesso ao meio (ex: CSMA/CA ou TDMA) e mecanismos adaptativos (ex: alocação dinâmica de canais ou roteamento adaptativo).

Como exemplo, o modo DSME do Padrão IEEE 802.15.4e define um mecanismo de adaptação de canal, no qual uma troca de canal só ocorre quando o canal em uso começa a apresentar baixa qualidade. Portanto, um procedimento é necessário para avaliar a qualidade dos enlaces continuamente, a fim de usar corretamente o mecanismo de adaptação de canal. No entanto, a implementação deste procedimento não é definida pelo padrão [17]. A solução proposta neste trabalho pode ser utilizada para implementar o mecanismo de adaptação de canal do modo DSME.

No próximo capítulo, é descrito um novo protocolo multicanal adaptativo, que faz uso da arquitetura proposta neste capítulo. Além disso, a solução do nó LQE também foi utilizada para implementar dois protocolos baseados no modo DSME que usam adaptação de canal. Estes protocolos, além do protocolo CSMA/CA e um protocolo baseado no modo TSCH, foram comparados com o novo protocolo proposto nesta tese por meio de estudos de simulação.

CAPÍTULO 7

Protocolo Adaptativo Multicanal Baseado em *Beacons*

Para lidar com os problemas de confiabilidade em uma RSSFI, mecanismos que permitem que a rede se auto-adapte às variações que ocorrem na qualidade dos enlaces ao longo do tempo precisam ser implementados. Alguns padrões foram propostos nos últimos anos com foco em aplicações industriais, como o WirelessHART e o ISA100.11a. Ambos são baseados na camada física de IEEE 802.15.4, mas definem sua própria camada MAC, baseada em TDMA e salto em frequência para mitigar os problemas que afetam a qualidade do canal sem fio. Mais recentemente, o Padrão IEEE 802.15.4e foi lançado, com foco em aplicações que exigem alta confiabilidade, como aplicações industriais [17]. Em geral, os protocolos definidos no Padrão IEEE 802.15.4e são baseados em TDMA ou salto em frequência (ou a combinação dos dois), para satisfazer os requisitos das aplicações industriais em termos de confiabilidade e determinismo.

Embora os protocolos definidos nestes padrões usem mecanismos para lidar com os problemas de confiabilidade em uma RSSFI, alguns problemas ainda podem surgir. Por exemplo, ao usar o salto em frequência, os nós geralmente alternam para um novo canal antes de cada transmissão. No entanto, sem um gerenciamento adequado da lista negra, o desempenho da rede pode ser significativamente degradado [15] [18]. Problemas decorrentes das variações espaciais na qualidade dos canais também podem afetar o desempenho dos protocolos baseados em *beacons*, como é o caso das redes DSME [19].

Os experimentos descritos em [18, 66] mostraram que usando apenas um canal é possível obter um desempenho de comunicação maior em comparação ao uso de um mecanismo de salto em frequência, utilizando múltiplos canais. No entanto, o canal a ser usado precisa ser escolhido corretamente, e diferentes canais precisam ser usados em diferentes partes da rede, devido às variações espaciais. Além disso, a qualidade dos canais utilizados na rede precisa ser continuamente monitorada, uma vez que o canal sem fio é não-estacionário no longo prazo [75].

Neste capítulo, um novo protocolo para RSSFI é proposto, denominado Protocolo Adaptativo Multicanal Baseado em *Beacons* (*Adaptive and Beacon-based Multi-Channel Protocol – ABMP*). Este protocolo utiliza tanto salto em frequência como adaptação de canal. O salto em frequência é utilizado para transmitir pacotes em *broadcast* (os *beacons*). Isso é feito para lidar com as variações espaciais na qualidade dos canais. Além disso, a lista de canais utilizados para transmitir os *beacons* é configurada dinamicamente para evitar o uso de canais que apresentam uma baixa qualidade para um número significativo de nós. Para a transmissão de pacotes de dados *unicast*, a adaptação de canal é utilizada e os canais são selecionados com base nas características do enlace específico entre um determinado nó final e o seu receptor. Embora o ABMP seja um protocolo baseado em *beacons*, os nós finais não precisam receber todos os *beacons* para manter a comunicação. Com essa abordagem, o desempenho da rede é menos afetado por problemas na recepção dos *beacons*, em comparação com outros protocolos, tais como o DSME e o modo *beacon-enabled* do Padrão IEEE 802.15.4.

Para implementar mecanismos de adaptação de canal ou para realizar a configuração dinâmica da lista negra em protocolos que usam salto em frequência, é necessário um estimador de qualidade de enlace (LQE) para fornecer informações sobre a qualidade dos enlaces aos nós da rede. A arquitetura proposta no Capítulo 6 foi utilizada, com nós dedicados à estimação em tempo real da qualidade dos enlaces. O protocolo ABMP foi desenvolvido levando em consideração as características do canal sem fio nos ambientes industriais.

7.1 Trabalhos Relacionados

Alguns trabalhos recentes propuseram novos protocolos MAC para comunicação em tempo real com base na camada física do Padrão IEEE 802.15.4 [101, 132–134]. Outros trabalhos propuseram mecanismos para melhorar o desempenho dos protocolos definidos nos padrões para RSSF industriais [65, 66, 72–74, 135, 136]. Esses padrões foram descritos de forma detalhada no Capítulo 2.

Em [132] é proposto um protocolo MAC baseado em CSMA/CA e TDMA para redes com topologia em estrela. A comunicação é controlada por um coordenador de rede usando *beacons*. A estrutura definida para o protocolo é semelhante à usada em redes DSME, que inclui um período de acesso por contenção (usando CSMA/CA) para comunicação acíclica (ex: pacotes de gerenciamento de rede) e um período para acesso sem contenção, baseado em TDMA, para comunicação periódica. Uma limitação do protocolo é que apenas dois canais são usados em toda a rede, o Canal de Comunicação (CC) e o Canal de Reserva (BC). Os canais são definidos pelo coordenador e a decisão é baseada em medições de RSSI para identificar os canais com o menor nível de ruído. O coordenador informa aos nós, por meio dos *beacons*, se eles devem usar o CC ou o BC para a transmissão de dados em cada ciclo. Embora os canais sejam escolhidos com base nas medições do ruído no coordenador, problemas de atenuação e sombreamento também podem afetar a qualidade dos canais e esses aspectos não podem ser avaliados por meio

de medições do ruído de fundo. Além disso, o protocolo não é capaz de lidar com variações espaciais na qualidade dos canais. Por isso, este protocolo parece não ser apropriado para RSSFIs que são implantadas em ambientes industriais severos e dinâmicos.

Em [133] é descrito o protocolo *Wireless Flexible Time Triggered* (WFTT), para redes com restrições de tempo estritas. O WFTT é baseado na técnica de *bandjacking*, em que o meio de comunicação é ocupado por um gerador de ruído de forma sincronizada, para evitar a interferência de tecnologias de comunicação baseadas em contenção, como Wi-Fi ou outras redes de sensores. Foram consideradas apenas as interferências externas causadas por rádios que utilizam protocolos MAC baseados em contenção (ex: CSMA/CA). Problemas de interferência de rádios que usam protocolos sem contenção, ou outros equipamentos (ex: fornos de micro-ondas) não são evitados pelo protocolo. O WFTT também utiliza *beacons* (denominados de *trigger packets*), mas apenas um canal é usado para transmitir os *trigger packets*, o que constitui um ponto único de falha. Além disso, o protocolo não é capaz de lidar com os problemas de multipercurso que podem afetar a qualidade dos enlaces. Todos os nós finais também usam o mesmo canal para comunicação (o canal protegido pela técnica *bandjacking*), mas o mesmo canal pode apresentar características diferentes para diferentes nós na rede, devido às variações espaciais na qualidade do canal. Em resumo, este protocolo não lida com todos os problemas existentes no canal sem fio em ambientes industriais.

O protocolo *Wireless Budget Sharing Token* (WBUST) é descrito em [134]. O WBUST é um protocolo MAC híbrido, que usa tanto comunicação baseada em contenção como comunicação livre de contenção. No WBUST a rede é dividida em sub-redes e cada sub-rede possui um coordenador. Diferentes canais são usados para diferentes sub-redes para evitar colisões e a comunicação ocorre com base em uma estrutura chamada de janela de comunicação. As janelas de comunicação subsequentes são separadas por pacotes *beacon*, que são transmitidos periodicamente pelo coordenador da sub-rede. A comunicação entre as diferentes sub-redes é feita por meio dos coordenadores, o que permite construir redes com diferentes topologias (ex: estrela ou em árvore). A principal limitação do protocolo MAC proposto em [134] é a ausência de um mecanismo de diversidade de canal para lidar com os problemas que podem afetar a qualidade dos enlaces ao longo do tempo, como interferência, sombreamento e atenuação por multipercurso. Embora canais diferentes sejam utilizados em diferentes sub-redes, toda a comunicação dentro das sub-redes ocorre usando apenas um canal, o que constitui um ponto único de falha.

Em [101] é proposto o protocolo DynMAC, que utiliza reconfiguração dinâmica de canal. O protocolo MAC descrito no artigo é baseado em TDMA e o canal a ser utilizado por todos os nós na rede (o melhor canal global) é definido pelo nó sorvedouro, usando informações coletadas dos outros nós da rede, por meio de amostras de RSSI ou da taxa de erro de pacote calculada pelos nós. A principal limitação do protocolo DynMAC é o uso de apenas um canal em toda a rede. A avaliação do protocolo foi feita utilizando um modelo de simulação simplista (com modelo *Unit Disk Graph Model*), e com uma distância muito pequena entre os nós. Os experimentos também não foram realizados em um ambiente realista. Este protocolo poderia

funcionar bem em um cenário em que existem apenas perturbações no canal sem fio devido a interferências externas. No entanto, em ambientes industriais também é necessário considerar os efeitos causados pelo perfil de multipercurso do ambiente nas características do canal sem fio, bem como as variações espaciais e temporais que podem ocorrer na qualidade dos enlaces em tais ambientes, como discutido no Capítulo 3.

Em [135] é proposto um novo protocolo MAC para redes com topologia em estrela, baseado no modo DSME do IEEE 802.15.4e, com o objetivo de reduzir o tempo de descoberta e otimizar o uso da largura de banda. Para reduzir o tempo de descoberta, foi proposto o uso de transmissões de *beacons* adicionais, em canais diferentes. Uma vez que o coordenador utiliza todos os canais disponíveis para transmitir os *beacons*, quando um nó vai iniciar o processo de adesão à rede, um canal é escolhido aleatoriamente e o nó espera por uma transmissão de *beacon* nesse canal. No entanto, se o canal selecionado apresentar problemas de desvanecimento profundo para o enlace entre o novo nó e o coordenador, o tempo de acesso pode ser muito alto. Esse problema não foi considerado na solução proposta no artigo. Para otimizar o uso da largura de banda e reduzir o atraso, ACK em grupo foi empregado usando os *beacons* e os nós usam o período de acesso por contenção para realizar retransmissões, em vez de usar um intervalo de tempo dedicado para as retransmissões, conforme definido no algoritmo original do DSME [17]. Uma limitação do protocolo proposto é que os mecanismos de diversidade de canal do DSME não foram avaliados, o que é um aspecto muito importante a ser analisado para aplicações industriais.

Alguns autores propuseram o uso de técnicas para a diversidade de canais e comunicação multicanal para redes LLDN. Na especificação padrão, as redes LLDN operam com apenas um canal. Em [73] foi proposto o protocolo MC-LLDN, com o objetivo de aumentar a escalabilidade de redes LLDN por meio do uso de uma topologia multinível, agregação de pacotes e comunicação utilizando múltiplos canais. A desvantagem é que os canais são alocados de forma estática para as sub-redes. Assim, não é capaz de lidar com as variações que ocorrem na qualidade dos canais ao longo do tempo. O protocolo descrito em [74] é uma evolução do MC-LLDN, chamado PriMuLa, que incorpora seleção dinâmica de canal. No entanto, como no MC-LLDN, o mesmo canal é usado por todos os nós na mesma sub-rede. Variações espaciais na qualidade do canal, bem como problemas de assimetria, podem ocorrer, o que pode dificultar a escolha de um único canal que apresenta boa qualidade para todos os nós em uma sub-rede.

O uso do salto de frequência adaptativo para redes TSCH foi proposto em [65, 66], para evitar o uso de canais afetados por fontes de interferência. Nesta abordagem, dois intervalos de tempo em cada ciclo são usados para executar leituras de valores de RSSI, para identificar fontes de interferência. Com base nessas medições, a lista negra é atualizada para evitar os canais com um alto nível de interferência. Foram realizados experimentos considerando diferentes tamanhos para a lista negra. Quanto maior o tamanho da lista negra, melhor o desempenho de comunicação. Este resultado corrobora os resultados apresentados em [18]. No entanto, esse tipo de comportamento só ocorre se um monitoramento adequado da qualidade dos canais

é realizada, a fim de configurar corretamente a lista negra em tempo real. Uma limitação da abordagem apresentada em [65, 66] é que apenas problemas de interferência são considerados. Outros aspectos que podem afetar a qualidade dos enlaces não são considerados, como o sombreamento e a atenuação por multipercurso. Além disso, o monitoramento da qualidade dos canais é realizado por todos os nós e usando intervalos de tempo que poderiam ser usados para comunicação, o que provoca uma grande sobrecarga nos nós e aumenta a latência da rede.

Em [136] um mecanismo denominado *Adaptive Channel Diversity* (ACD) é proposto para redes ISA100.11a. No protocolo proposto, a rede é dividida em grupos e os nós finais dentro do mesmo grupo compartilham os intervalos de tempo alocados ao grupo e acessam o canal usando contenção. O mecanismo ACD usa informações sobre a qualidade dos canais para evitar o uso de canais afetados por fontes de interferência. A duração do período de comunicação é dividida em quatro segmentos de tempo, em que três deles são dedicados ao mecanismo de ACD, o que provoca uma sobrecarga elevada. A solução descrita em [136] possui as mesmas limitações da solução descrita em [65, 66] para redes TSCH, uma vez que apenas os problemas relacionados à interferência são considerados. Além disso, muitos intervalos de tempo são dedicados ao mecanismo ACD, o que aumenta a sobrecarga do protocolo e a latência da rede. Em ambientes industriais reais, o perfil de multipercurso do ambiente pode afetar significativamente a qualidade dos canais e esse aspecto precisa ser considerado em mecanismos para estimação de qualidade de enlace e alocação dinâmica de canais.

Como discutido e demonstrado no Capítulo 3, um problema em usar lista negra no protocolo TSCH e nos protocolos definidos nos padrões WirelessHART e ISA100.11a, é que quando um canal está na lista negra, todos os nós param de usar este canal. Assim, mesmo considerando que a qualidade de serviço para um conjunto de nós pode ser aumentada ao colocar um canal na lista negra, a qualidade para outros nós pode diminuir. Quando a qualidade do canal é afetada por interferências externas, como considerado em [66] e [136], colocar um canal na lista negra para toda a rede pode ser uma boa solução, mas o desafio é maior quando as variações espaciais na qualidade do canal, devido a problemas de multipercurso, afetam os enlaces. Além disso, para realizar configuração dinâmica da lista negra é necessário alocar intervalos de tempo para que o coordenador envie a lista atualizada para os nós. Também é necessário implementar algum mecanismo para garantir a sincronização de todos os nós, como foi implementado para o ABMP por meio do uso de *beacons*.

Diferente dos demais protocolos descritos nesta seção, o ABMP utiliza múltiplos canais de forma dinâmica, com base nas características específicas dos enlaces entre os nós finais individuais e seus coordenadores. Além disso, os pacotes em *broadcast* (os *beacons*) são transmitidos usando salto em frequência e a lista de canais usados para transmitir esses pacotes é configurada dinamicamente, para lidar com as variações espaciais e temporais na qualidade dos canais para os diferentes enlaces. Além disso, diferente dos outros protocolos baseados em *beacon* descritos nesta seção, no ABMP os nós finais não precisam receber todos os *beacons* para manter a comunicação, o que reduz a sobrecarga causada por este método de sincronização.

O ABMP é comparado com os protocolos TSCH, DSME e CSMA/CA neste capítulo. Os protocolos definidos pelos padrões WirelessHART e ISA100.11a são semelhantes ao TSCH, que utiliza TDMA e salto em frequência. Foram analisadas três implementações diferentes do DSME. A primeira é baseada em salto em frequência nos períodos livres de contenção, a segunda é baseada em adaptação de canal e a terceira é uma abordagem híbrida, que usa tanto salto em frequência (para os *beacons*) quanto adaptação de canal (para os pacotes de dados *unicast*). O ABMP é descrito em detalhes na Seção 7.2 e os detalhes sobre a implementação dos outros protocolos avaliados são fornecidos na Seção 7.3.1.

7.2 Descrição do Protocolo ABMP

O ABMP pode ser usado em redes com topologia em árvore ou em estrela. Na Figura 7.1 é apresentado um exemplo de rede com topologia em árvore e os tipos de nós considerados no ABMP.

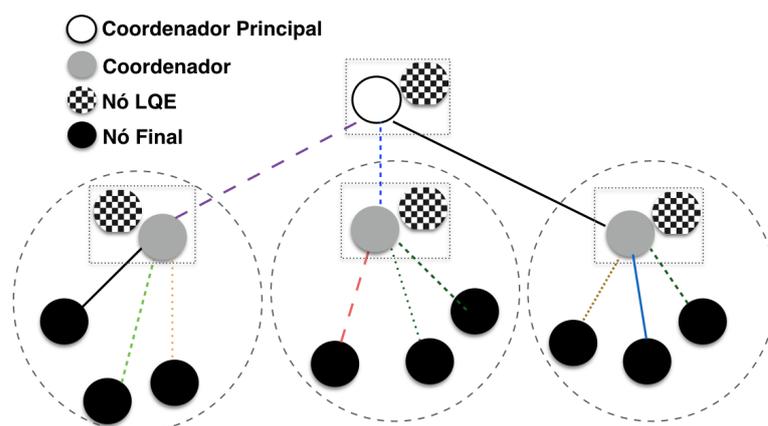


Figura 7.1 Um exemplo de uma rede ABMP com topologia em árvore.

O Coordenador Principal (CP) é o nó sorvedouro da rede e recebe todos os pacotes transmitidos pelos nós finais. Os nós finais podem transmitir diretamente ao CP ou por meio de um nó intermediário, chamado coordenador. Os coordenadores atuam como um nó sorvedouro para os nós finais, mas encaminham os pacotes de dados recebidos para o CP. Na rede ilustrada na Figura 7.1 existe um quarto tipo de nó, o nó LQE. O uso de rotas redundantes não foi considerado nas análises descritas neste capítulo, mas é possível integrar esse recurso no ABMP. Para isso, é preciso alocar intervalos de tempo para um determinado nó final em múltiplas sub-redes.

Os nós LQE são integrados aos coordenadores e são responsáveis por estimar a qualidade de todos os enlaces da rede. Esta arquitetura foi discutida em detalhes no Capítulo 6 e permite a estimação da qualidade dos enlaces em tempo real sem impor sobrecarga nos nós sensores e nem na rede. Embora esta solução tenha sido utilizada, o ABMP pode ser implementado utilizando outras abordagens para estimar a qualidade dos enlaces. Na implementação feita para este trabalho, a qualidade dos enlaces é monitorada usando processamento paralelo, por meio do

uso do nó LQE e modelos que utilizam apenas informações obtidas a partir de pacotes de dados recebidos. Os nós LQE também adquirem amostras de RSSI continuamente para identificar problemas de interferência. Assim, não é necessário transmitir pacotes de diagnóstico, como em outras soluções para a estimação de qualidade de enlace [22, 120].

No ABMP, o acesso ao meio é realizado com base em uma estrutura denominada *multi-slotframe*, semelhante às estruturas definidas para as redes DSME e TSCH. Cada *multi-slotframe* é formado por um conjunto de *slotframes*, e cada *slotframe* é composto por um conjunto de intervalos de tempo, em que o primeiro é utilizado para a transmissão dos *beacons* e os remanescentes podem ser utilizados pelos nós para realizarem transmissões de pacotes de dados. É possível alocar alguns intervalos de tempo no primeiro *slotframe* para acesso baseado em contenção, para permitir que novos nós entrem na rede, como ocorre nas redes DSME. Também é possível usar intervalos de tempo de configuração dentro do *multi-slotframe*, a fim de reconfigurar a rede dinamicamente, como nas redes LLDN [16]. Em redes planejadas, em que o número de nós de sensores é fixo, o período para o acesso baseado em contenção (ou os intervalos de configuração) pode ser removido. Nas análises descritas neste capítulo, o último cenário foi considerado, portanto, não foi utilizado período de acesso por contenção nem intervalos de configuração.

A Figura 7.2 ilustra o exemplo de um *multi-slotframe* para uma rede ABMP, com k *slotframes*. No i -ésimo *slotframe* ($i < k$), há um intervalo para transmissão do *beacon* (B_i) e T intervalos de tempo para transmissão de pacotes de dados (S_0 a S_{T-1}). O *multi-slotframe* mostrado na Figura 7.2 pode ser aplicado a uma rede com topologia em estrela. Para redes com topologia em árvore, há intervalos de tempo adicionais para permitir que os coordenadores encaminhem os *beacons* para os nós finais. O número de intervalos de tempo atribuídos à transmissão de *beacons* é igual ao número de níveis da topologia. Essa idéia também foi usada em [74] para implementar redes LLDN com topologia em árvore.

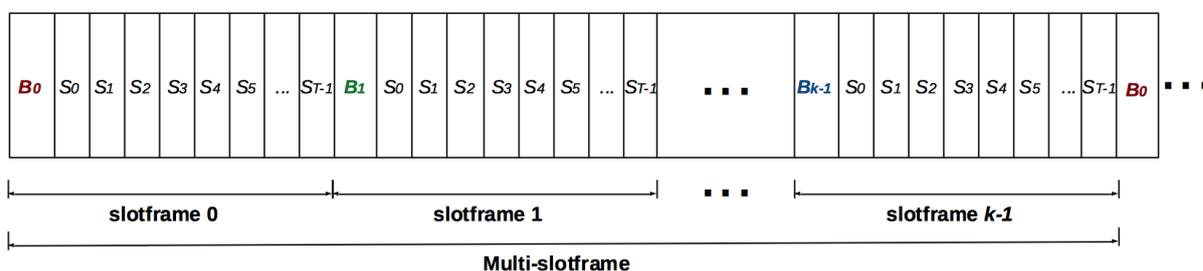


Figura 7.2 Estrutura de tempo (*multi-slotframe*) definida pelo ABMP.

Todos os *slotframes* dentro de um *multi-slotframe* possuem a mesma estrutura, com os intervalos de tempo alocados para os mesmos nós. Assim, os nós finais da rede têm um ou mais intervalos de tempo dentro de cada *slotframe* e, portanto, eles têm pelo menos k intervalos dentro de um *multi-slotframe*. A alocação de intervalos de tempo é baseada nos requisitos da aplicação executada por cada nó final. Quando uma topologia em estrela é utilizada, apenas uma transmissão ocorre durante um intervalo de tempo. Quando uma topologia em árvore é

utilizada, transmissões em simultâneo podem ocorrer, mas cada transmissor transmite a um receptor diferente, e utilizando um canal diferente.

Os *beacons* são usados para manter a sincronização, e para permitir o uso de adaptação de canal. No ABMP eles também são usados para realizar reconhecimento de pacote (ACK) em grupo, como também ocorre nas redes LLDN. Ao usar *beacons*, os nós finais não precisam compartilhar a mesma noção global de tempo. Se *beacons* são recebidos com frequência, os nós finais podem se comunicar usando TDMA sem enfrentar problemas devido a diferenças na deriva das fontes de *clock* nos diferentes nós. No entanto, em protocolos baseados em *beacons*, como o modo *beacon-enabled* do IEEE 802.15.4 e o modo DSME do IEEE 802.15.4e, os nós finais apenas transmitem seus pacotes se os *beacons* forem recebidos corretamente. Desse modo, o desempenho global da rede é degradado se muitos *beacons* forem perdidos.

O ABMP é um protocolo baseado em *beacons*, mas os nós finais não precisam receber todos os *beacons* para manter a comunicação. Os nós finais só precisam receber um dos *beacons* transmitidos dentro de um *multi-slotframe*. Por exemplo, se um determinado nó final recebe o primeiro *beacon*, ele pode se comunicar durante os k *slotframes* seguintes, independentemente da recepção dos outros *beacons* dentro do mesmo *multi-slotframe*. Isso é feito para mitigar a sobrecarga causada pelo uso de *beacons*, como ocorre em redes DSME.

Os *beacons* são transmitidos em *broadcast* para todos os nós finais conectados ao coordenador e, portanto, o canal usado para transmitir esses pacotes precisa apresentar boa qualidade para todos os enlaces entre o coordenador e os nós finais. No entanto, podem ocorrer variações espaciais na qualidade do canal para diferentes enlaces. Dessa forma, o ABMP utiliza uma abordagem híbrida, baseada em adaptação de canal para a transmissão de pacotes de dados e salto em frequência para a transmissão dos *beacons*. Usando esse mecanismo, os nós finais não permanecem desconectados por um longo período de tempo, quando a qualidade de um determinado canal diminui com relação a algum enlace entre o coordenador e um nó final. Além disso, a lista de canais utilizados no mecanismo de salto em frequência pode ser alterada ao longo do tempo pelo CP, para evitar o uso de canais com interferência ou problemas de desvanecimento que afetam um número significativo de enlaces.

O número de canais utilizados para as transmissões dos *beacons* pode ser configurado pela aplicação. Recomenda-se a utilização de múltiplos canais, para lidar com a variação espacial na qualidade dos canais para os diferentes nós finais. As informações sobre os canais utilizados nas transmissões são passadas para os nós finais por meio de um *bitmap* dentro do *beacon*. Quando o CP muda a lista de canais usados para transmitir os *beacons*, ele atualiza os valores do *bitmap* e informa aos outros nós da rede a nova configuração. No entanto, a nova lista de canais só é utilizada no próximo *multi-slotframe*, a fim de alcançar uma alta probabilidade de que todos os nós finais receberão as informações atualizadas. Dentro de um *multi-slotframe* k *beacons* são transmitidos usando canais diferentes e todos eles carregam a informação atualizada. Se um determinado nó final permanece sem receber *beacons* durante muitos *slotframes* consecutivos e perder a sincronia com o seu coordenador, ele entra em um estado de recuperação, como melhor

explicado na Seção 7.2.2. Na Seção 7.2.1 todos os campos de um *beacon* são explicados em detalhes.

Os canais utilizados pelos nós finais para transmitir pacotes de dados dentro dos *slotframes* são definidos pelo coordenador, que envia esta informação para os nós finais utilizando os *beacons*. Como é utilizada adaptação de canal para a transmissão de pacotes de dados, os nós finais usam o mesmo canal enquanto o enlace com o coordenador apresentar boa qualidade. Para utilizar este mecanismo, é necessário estimar continuamente a qualidade dos enlaces. Na Seção 7.2.3 a integração da abordagem apresentada no Capítulo 6 com o ABMP é descrita.

7.2.1 Operação dos Coordenadores

O CP transmite *beacons* periodicamente, usando salto em frequência, e espera para receber pacotes de dados nos outros intervalos de tempo. O CP é responsável pela definição da lista de canais utilizados para transmitir os *beacons* em toda a rede e também por definir os canais utilizados pelos nós conectados diretamente a ele para transmitir os pacotes de dados.

Para estimar a qualidade dos enlaces utilizando a abordagem proposta no Capítulo 6, o coordenador precisa receber pacotes de dados. No entanto, se um canal entra em um estado de desvanecimento profundo para algum enlace, nenhum pacote pode ser recebido a partir do nó final conectado por meio desse enlace. Para lidar com esse problema, os coordenadores mantêm uma *flag* para cada nó conectado a ele. Periodicamente as *flags* são verificadas, e se alguma *flag* possuir valor igual a um, o coordenador altera o canal do enlace correspondente. Após realizar a verificação, o coordenador atribui valor um a todas as *flags*. Quando um pacote de dados é recebido, a *flag* relativa ao enlace no qual o pacote foi recebido é definida como zero, para indicar a ausência de problemas de desvanecimento profundo nesse enlace, para o período corrente.

O período de tempo para verificar as *flags* pode ser configurado pela aplicação. Como nas análises realizadas neste capítulo uma taxa de transmissão de pacote de 1 pacote/s foi usada na camada de aplicação, o coordenador foi configurado para verificar as *flags* em intervalos de dois segundos. Assim, se um nó falhar em transmitir dois pacotes consecutivos (o que pode envolver várias tentativas de retransmissão), o coordenador conclui que o canal utilizado nas transmissões está em um estado de desvanecimento profundo e escolhe um novo canal para o enlace.

Quando é utilizada uma topologia em árvore, múltiplos *slotframes* são processados simultaneamente. A Figura 7.3 ilustra o exemplo de *slotframe* para uma rede com um CP e dois coordenadores; ou seja, uma rede com topologia em árvore e duas sub-redes. Neste caso, os coordenadores recebem o *beacon* do CP no primeiro intervalo de tempo e o encaminham para os nós finais no segundo intervalo de tempo. A transmissão dos *beacons* a partir dos coordenadores ocorre simultaneamente, utilizando canais diferentes. Embora a lista de canais usados para transmitir os *beacons* seja a mesma para todos os coordenadores, cada um usa um *offset*

diferente. Por exemplo, o CP transmite o primeiro *beacon* usando o primeiro canal da lista, enquanto o Coordenador 1 e o Coordenador 2 encaminham o *beacon* usando o segundo e terceiro canais da lista, respectivamente.

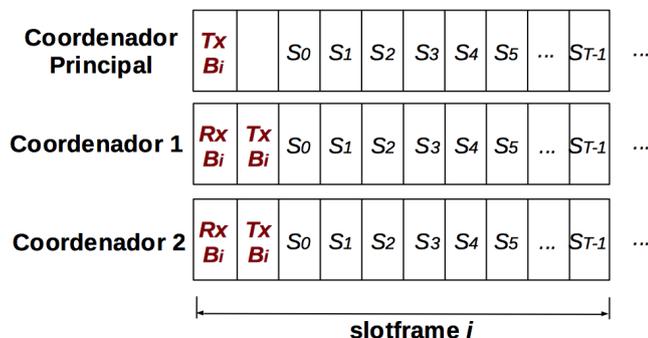


Figura 7.3 Um exemplo de *slotframe* para uma rede com topologia em árvore.

Os canais a serem utilizados por cada nó final nas sub-redes, para transmitir os pacotes de dados, são definidos pelo coordenador da sub-rede, uma vez que a decisão é baseada na qualidade do enlace específico entre o nó final e o seu coordenador.

A Figura 7.4 ilustra a estrutura do pacote *beacon* transmitido pelos coordenadores. O campo *Sequence Number* do frame de camada MAC do IEEE 802.15.4 é usado como o *Beacon ID* e o campo *Addressing Field* é usado para armazenar um conjunto de campos usados no ABMP. É utilizada a opção *Short Address*, com quatro *bytes*. Cada coordenador na rede tem um ID diferente, que é usado como o *offset* para definir os canais usados para transmitir os *beacons* e como o endereço de destino nas transmissões executadas pelos nós finais.

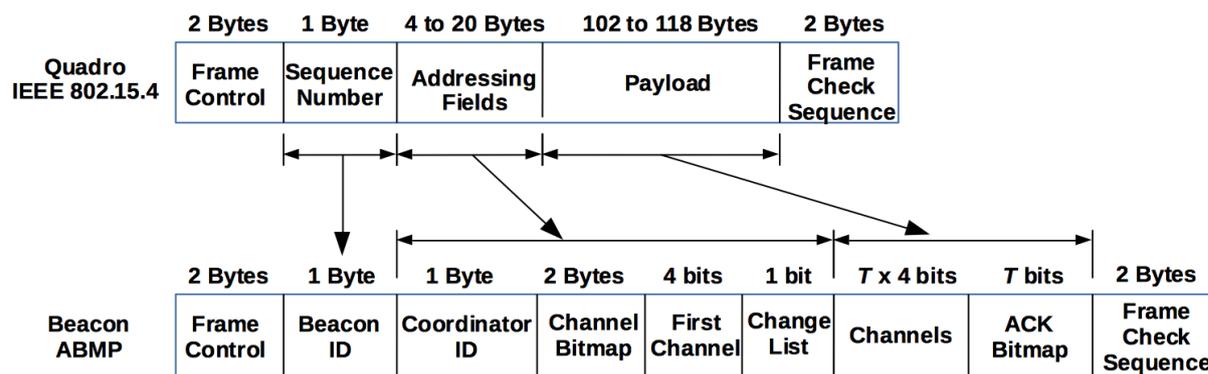


Figura 7.4 Campos do pacote *beacon* no ABMP.

Dois *bytes* do campo *Addressing Field* são usados para armazenar o *bitmap* que contém as informações sobre os canais usados para transmitir os *beacons* (*Channel Bitmap*). Como há 16 canais disponíveis na camada física do Padrão IEEE 802.15.4, cada *bit* do *Channel Bitmap* corresponde a um canal. Somente os canais cujo *bit* possui valor igual a um são usados para transmitir os *beacons*. Quatro bits do *Addressing Field* são usados para armazenar o ID do primeiro canal (*First Channel*), que é o canal usado pelo CP para transmitir o *beacon* B_0 .

Com o ID do primeiro canal e o *Channel Bitmap* é possível identificar a sequência de canais utilizados para transmitir os *beacons* dentro de um *multi-slotframe*. Por exemplo, se o campo *First Channel* for igual a 12 e o campo *Channel Bitmap* for igual a 0110111100001010_2 , o *beacon* B_0 é transmitido usando o Canal 12, o *beacon* B_1 é transmitido usando o Canal 14, o *beacon* B_2 é transmitido usando o Canal 1, e assim por diante. Os Canais 0 a 15 correspondem aos Canais 11 a 26 do Padrão IEEE 802.15.4. Como todos os nós sempre aguardam obrigatoriamente para receber o *beacon* B_0 , o algoritmo tenta usar o melhor canal possível como o primeiro canal.

No campo de *Payload*, $T \times 4$ bits (*Channels*) são usados para transmitir os canais a serem usados em cada intervalo de tempo e T bits (*ACK Bitmap*) são usados para reconhecer os pacotes transmitidos em cada intervalo de tempo durante o último *slotframe*. Quando um nó final transmite um pacote, ele espera pelo próximo *beacon*, para ler o *ACK Bitmap* e verificar se o pacote foi recebido pelo coordenador. Para redes que não usam retransmissão de pacotes esse campo pode ser removido.

Como alguns campos utilizados pelo ABMP são armazenados em campos predefinidos do IEEE 802.15.4, apenas uma parte dos campos são armazenados usando a carga útil do pacote. Com a configuração usada, é possível armazenar até 118 bytes na carga útil. Assim, é possível gerenciar uma rede com até 188 intervalos de tempo por *slotframe*. Dessa forma, uma rede em estrela com até 188 nós finais poderia ser definida. Ao usar topologia em árvore, o número de nós pode ser muito maior, devido às transmissões simultâneas, e é possível usar agregação de pacotes nos coordenadores, a fim de alocar menos intervalos para os coordenadores encaminharem os pacotes para o CP. Assim, mesmo para redes com muitos nós finais, é possível usar a estrutura de pacotes definida para o ABMP. A definição sobre o número de nós finais e o número de intervalos de tempo a serem usados é específico da aplicação.

Para redes maiores, também é possível escalar o uso do campo *Channels*. Neste caso, para cada *multi-slotframe*, apenas os canais de um subconjunto de nós são atualizados. Essa abordagem permite implementar redes com mais nós finais, mas o mecanismo de adaptação de canal torna-se menos reativo.

7.2.2 Operação do Nó Final

Na Figura 7.5 é mostrado um diagrama de atividades para explicar o funcionamento do ABMP no lado do nó final. Se a lista de canais usados para transmitir os *beacons* não é conhecida a priori, o nó final escuta em cada um dos 16 canais durante k períodos de *slotframe* até que um *beacon* seja recebido e então ele pode obter as informações atualizadas sobre a operação da rede e começar a transmitir seus pacotes.

Em cada *multi-slotframe* o nó final inicia sua operação aguardando o primeiro *beacon* (B_0). Se ocorrer uma falha na recepção do *beacon*, o nó final passa a escutar com o próximo canal da lista e aguarda o próximo *beacon*. Isso é feito com o auxílio de um temporizador, que é

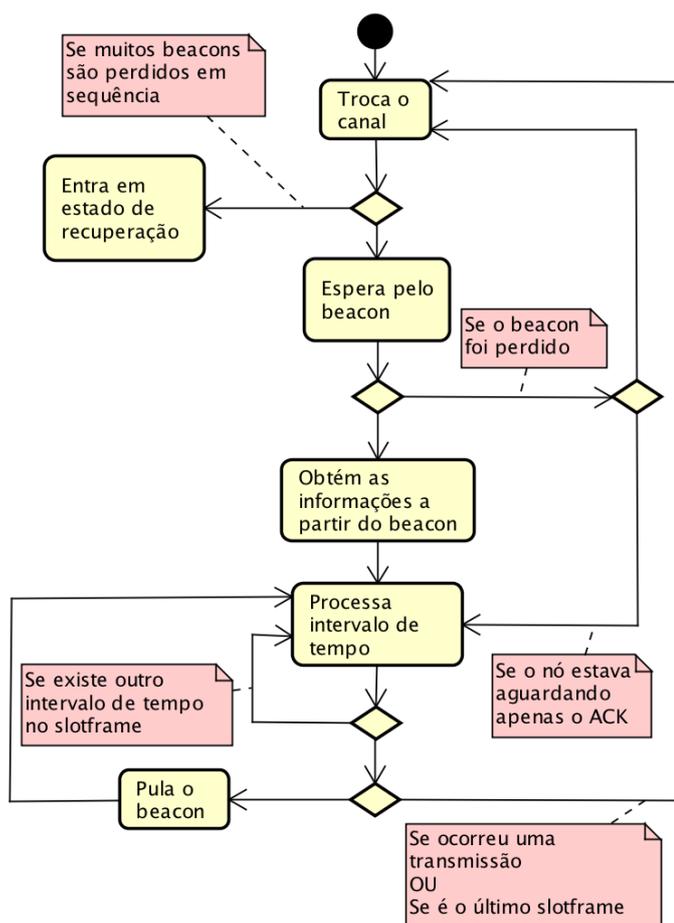


Figura 7.5 Diagrama de atividades da operação do protocolo no nó final.

inicializado após o nó final executar a troca de canal para aguardar o *beacon*, e é configurado para expirar após o intervalo de tempo no qual o *beacon* deve ser recebido. Se o *beacon* é recebido, o temporizador é desabilitado, caso contrário ele é redefinido para identificar um possível erro na recepção do próximo *beacon*.

Quando um *beacon* é recebido, o nó final obtém todas as informações necessárias para executar a comunicação dentro do *multi-slotframe* e vai para o primeiro intervalo de tempo do *slotframe* atual. As informações obtidas a partir do *beacon* incluem o canal a ser utilizado pelo nó no *multi-slotframe* e a lista de canais utilizados para transmitir os *beacons*. Se o CP atualizar o campo *Channel Bitmap* ou o campo *First Channel* o campo *Change List* (ver Figura 7.4) é definido como um para indicar aos nós finais que eles precisam armazenar a nova lista de canais e começar a usar a nova configuração somente no próximo *multi-slotframe*.

Após a recepção do *beacon*, os nós podem desabilitar o transceptor durante os intervalos de tempo em que não estão realizando comunicação, para economizar energia. Após o último intervalo de tempo (S_{T-1}) em um *slotframe*, o nó final pode pular o próximo *beacon* e aguardar o início do próximo *slotframe*, caso ainda restem outros *slotframes* no *multi-slotframe* atual. Após o k -ésimo *slotframe*, o nó muda para o primeiro canal da lista para aguardar o primeiro *beacon* (B_0) do próximo *multi-slotframe*.

Se o nó final transmite um pacote dentro de um *slotframe*, ele também precisa trocar o canal e aguardar o próximo *beacon*, para verificar o *ACK Bitmap*. No entanto, quando um nó final está aguardando apenas o ACK, ele pode continuar a processar o *multi-slotframe* se o *beacon* for perdido, uma vez que ele já possui as informações necessárias para o *multi-slotframe* atual, obtidas a partir de um *beacon* anterior.

Finalmente, se muitos *beacons* são perdidos em sequência (esse limiar pode ser configurado), o nó final entra em um estado de recuperação, no qual ele escuta em cada um dos 16 canais durante k períodos de *slotframe*, até que um *beacon* seja recebido. Como múltiplos *beacons* são transmitidos dentro de um *multi-slotframe*, usando canais diferentes, a probabilidade de um nó entrar em estado de recuperação é baixa. Na implementação do ABMP avaliada neste capítulo, um nó final entra em estado de recuperação quando 16 *beacons* consecutivos são perdidos.

7.2.3 Operação do nó LQE

Na implementação do ABMP realizada nesta tese, a abordagem descrita no Capítulo 6 foi usada para realizar a estimação da qualidade dos enlaces em tempo real, com o uso de nós dedicados (os nós LQE). Nesta abordagem, três métricas são analisadas para estimar a qualidade do enlace. A métrica P_f é usada para estimar a qualidade do enlace no sentido direto, P_b é usada para estimar a qualidade do enlace no sentido inverso e C_a é usada para estimar a influência de fontes de interferência externas.

Na implementação do ABMP foi utilizada uma janela deslizante de 10 amostras de RSSI para calcular a métrica P_f . C_a é calculada por meio da aquisição contínua de amostras de RSSI pelo nó LQE em todos os canais. Usando o nó LQE, muitos valores de RSSI podem ser adquiridos e processados continuamente, sem afetar a operação da RSSF.

A métrica P_b é calculada usando informações sobre pacotes duplicados. Uma vez que no ABMP o ACK é realizado usando os *beacons*, essa métrica é usada para estimar a qualidade dos canais usados para transmitir os *beacons*. Assim, um contador de pacotes duplicados é usado para cada um dos k canais usados para transmitir os *beacons* dentro de um *multi-slotframe*. Quando um pacote duplicado é recebido, o contador do canal usado na transmissão do *beacon* anterior é incrementado. Um pacote duplicado é recebido quando o pacote de dados é recebido corretamente no coordenador, mas o *beacon* com o ACK não é recebido no nó transmissor. Deste modo, existe uma correlação entre o número de pacotes duplicados e a qualidade do canal utilizado para transmitir o *beacon*.

Uma vez que os nós sempre esperam para receber o *beacon* B_0 , uma abordagem diferente é usada para estimar mais rapidamente a qualidade do canal usado para transmitir B_0 . Um *bit* é usado na carga útil dos pacotes de dados transmitidos pelos nós, para indicar se o *beacon* B_0 foi perdido dentro do *multi-slotframe* atual. A sobrecarga para realizar isso é muito pequena

para os nós, uma vez que apenas uma verificação rápida é feita durante o primeiro intervalo de tempo de um *multi-slotframe*, e apenas um bit é adicionado à carga útil.

A operação do nó LQE é baseada em dois parâmetros definidos pela camada de aplicação, o período de estimação (E_p) e o limiar de qualidade do enlace (T_{lq}). A cada E_p segundos, o nó LQE calcula uma nova estimativa para todos os enlaces entre o coordenador e os nós conectados diretamente a ele. Se algum enlace apresentar uma qualidade abaixo de T_{lq} , o nó LQE informa ao coordenador qual o enlace com problema, usando o barramento de dados que conecta os dois micro-controladores. O T_{lq} corresponde a um valor entre 0 e 100%, que representa a probabilidade mínima de sucesso na transmissão de um pacote requerida pela aplicação. Para todas as avaliações feitas para este artigo, $T_{lq} = 90\%$, e $E_p = 2$ s foram usados. Os novos canais a serem utilizados são definidos utilizando uma abordagem *round-robin* para a implementação avaliada neste capítulo. No entanto, em cenários com fontes de interferência, escolher canais adjacentes pode não ser a melhor opção.

As métricas P_f e C_a são combinadas para calcular a qualidade dos enlaces no sentido direto; ou seja, dos nós finais para o coordenador. Isso é feito em todos os coordenadores da rede. As métricas P_b e C_a são combinadas para calcular a qualidade dos canais utilizados para transmitir os *beacons*. Somente o CP tem permissão para alterar a lista de canais usados para transmitir os *beacons*. No entanto, para otimizar a escolha do canal utilizado para transmitir o *beacon* B_0 , um *bit* adicional é incluído na carga útil dos pacotes encaminhados pelos coordenadores, para informar ao CP se o primeiro canal apresenta má qualidade para a sua sub-rede. Quando o CP recebe um pacote de algum coordenador com o *bit* igual a um, ele muda o primeiro canal usado para transmitir os *beacons* e escolhe o canal que possuir maior valor para $P_b \times C_a$.

7.3 Resultados

Nesta seção são descritos os resultados obtidos a partir de uma análise teórica (Seção 7.3.2) e de estudos de simulação (Seção 7.3.3), usando o modelo de simulação descrito no Capítulo 5.

7.3.1 Protocolos Avaliados

O ABMP foi comparado a outros cinco protocolos por meio de estudos de simulação, sendo que três deles são baseados no modo DSME do IEEE 802.15.4e, um é baseado no modo TSCH, e o último é o CSMA/CA, conforme definido pelo Padrão IEEE 802.15.4. Nas subseções seguintes são fornecidos detalhes sobre a implementação destes protocolos. Todos os protocolos foram avaliados em vários cenários considerando redes com topologia em estrela. O ABMP e o TSCH também foram avaliados para cenários considerando redes com topologia em árvore.

Protocolos baseados no DSME

Três abordagens para o modo DSME foram implementadas e avaliadas nesta tese, denominadas CH-DSME, CA-DSME e H-DSME. O CH-DSME usa salto em frequência no Período Livre de Contenção (CFP), de modo que os nós usam todos os 16 canais disponíveis para transmitir os pacotes de dados. O CA-DSME utiliza adaptação de canal para os períodos CFP. No CA-DSME, os nós finais usam o mesmo canal para transmitir os pacotes de dados enquanto a qualidade do enlace para o coordenador estiver acima de um determinado limiar. O mesmo LQE usado para implementar o ABMP foi utilizado para implementar o mecanismo de adaptação de canal do CA-DSME. O H-DSME é uma abordagem híbrida que utiliza adaptação de canal nos períodos CFP, e salto em frequência para os *beacons*. O H-DSME foi originalmente proposto nesta tese, uma vez que o Padrão IEEE 802.15.4e não prevê o uso de salto em frequência para transmissão dos *beacons*. O H-DSME é semelhante ao ABMP, mas ele não usa configuração dinâmica da lista de canais utilizados para transmitir os *beacons*, e os nós finais precisam receber todos os *beacons* para manter a comunicação.

A Figura 7.6 ilustra a estrutura de *superframe* implementada para os protocolos baseados em DSME avaliados neste capítulo. O *capReduction* foi habilitado, e assim somente o primeiro *superframe* possui o Período de Acesso por Contenção (CAP). Neste exemplo, considerou-se uma rede com 8 nós finais e topologia em estrela, em que cada nó final possui dois intervalos de tempo dentro do *multi-superframe*. Os nós finais transmitem pacotes diretamente para o CP (Nó 0) e apenas uma transmissão ocorre em cada intervalo de tempo. A estrutura mostrada na Figura 7.6 considera o uso de salto em frequência no CFP e os números nos intervalos de tempo indicam o ID do nó final que executa uma transmissão dentro do intervalo.

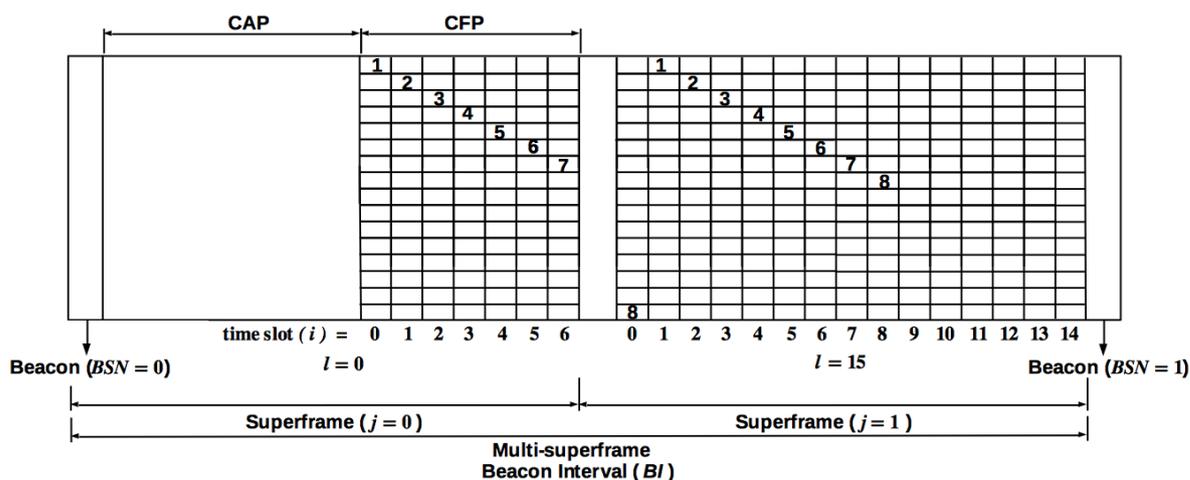


Figura 7.6 A estrutura temporal utilizada nas simulações para os protocolos baseados em DSME.

A Tabela 7.1 contém os valores dos parâmetros que foram usados para configurar a estrutura de *superframe* dos protocolos baseados em DSME. Nesta configuração, há um *multi-superframe* por período de *beacon* (*Beacon Interval – BI*), e dois *superframes* por *multi-superframe*. No

primeiro *superframe* há sete intervalos de tempo no CFP, e no segundo *superframe* há 15 intervalos de tempo no CFP. No CFP é possível ter transmissões simultâneas, usando múltiplos canais na rede. No entanto, os protocolos baseados em DSME foram avaliados apenas em redes com topologia em estrela neste capítulo, e portanto apenas uma transmissão ocorre em cada intervalo de tempo.

Tabela 7.1 Parâmetros usados para configurar o *multi-superframe* dos protocolos baseados em DSME.

<i>macBeaconOrder</i> (BO)	4
<i>macMultisuperframeOrder</i> (MO)	4
<i>macSuperframeOrder</i> (SO)	3
Time-slot duration	7,68 ms

No CH-DSME, o canal a ser utilizado em um determinado intervalo de tempo, dentro do CFP, é definido usando

$$ch = (i + j \times l + ch_{os} + BSN) \bmod 16,$$

em que j é o índice do *superframe*, ch_{os} é o *offset* do receptor (o ID do receptor foi usado como *offset*) e BSN é o número de sequência do *beacon*. O valor de l é igual a 15 se *capReduction* está habilitado e j é diferente de zero, caso contrário l é igual a 7. Todos os 16 canais são considerados, então ch é um valor inteiro entre 0 e 15, que representa o ID do canal.

O CA-DSME também usa a estrutura de tempo mostrada na Figura 7.6, mas com um mecanismo de diversidade de canal diferente. No CA-DSME todos os nós transmitem ao coordenador usando apenas um canal, sem salto em frequência. Como apenas uma transmissão ocorre em cada intervalo de tempo, os nós finais podem usar o mesmo canal nas transmissões. Em cenários com mais de uma transmissão ao mesmo tempo, os canais precisam ser alocados de modo a evitar colisões. Uma troca de canal só ocorre quando o canal de um determinado enlace começa a apresentar má qualidade e apenas o canal do enlace afetado é alterado. O mesmo mecanismo para estimação de qualidade de enlace utilizado no ABMP foi também usado pra implementar o CA-DSME.

No *beacon* do CA-DSME, há um *bitmap* para indicar a cada nó se ele precisa trocar de canal. Quando o nó recebe um *beacon* indicando a necessidade de trocar o canal, ele passa a utilizar o próximo canal para transmitir os pacotes de dados, utilizando uma abordagem *round-robin*. Enquanto o coordenador não recebe um pacote no novo canal, ele continua a enviar o *beacon* com o *bit* igual a um no *bitmap*. Depois de receber o primeiro pacote no novo canal, o coordenador atribui o valor zero ao *bit*. Uma vez que no CA-DSME os *beacons* são sempre enviados utilizando o mesmo canal, se a transmissão de um *beacon* falhar, os nós podem esperar pelo próximo *beacon* no mesmo canal.

Um mecanismo para identificar problemas de desvanecimento profundo também foi implementado para o CA-DSME. Como o coordenador precisa receber pacotes de dados para estimar a qualidade dos enlaces, quando o canal utilizado para comunicação entre um determinado nó

e o coordenador entra em um estado de desvanecimento profundo, nenhum pacote pode ser recebido enquanto o canal permanecer nesse estado. Assim, quando o coordenador não recebe pacotes de um determinado nó durante um longo período, ele inicia o procedimento de troca de canal para esse nó. Na implementação feita para este capítulo, o coordenador inicia um procedimento de troca de canal quando nenhum pacote é recebido de um determinado nó durante 10 BI consecutivos (aproximadamente 2,46 s).

Em ambos CH-DSME e CA-DSME o canal utilizado para transmitir os *beacons* constitui um ponto único de falha. Nestes protocolos, é possível lidar com problemas que afetam a qualidade de um subconjunto de canais por meio de salto em frequência ou adaptação de canal, mas eles não são capazes de lidar com problemas que afetam o canal usado para transmitir os *beacons*.

O H-DSME usa adaptação de canal para os períodos de CFP (da mesma forma que o CA-DSME), e salto em frequência para a transmissão dos *beacons*. Os canais são definidos usando uma abordagem *round-robin*. Por meio desse mecanismo, os nós finais não permanecem desconectados por um período de tempo grande devido a problemas no canal utilizado para transmitir os *beacons*, como pode ocorrer no CH-DSME e no CA-DSME. Para acomodar o uso do salto em frequência na transmissão dos *beacons*, um temporizador é usado nos nós finais para identificar que um *beacon* foi perdido, e permitir a resincronização dos nós, de modo similar ao mecanismo utilizado no ABMP.

Nos protocolos baseados em DSME os nós finais podem ter vários intervalos de tempo para transmitir pacotes dentro do mesmo *multi-superframe*. O número de intervalos de tempo alocados para cada nó depende do número total de nós na rede. Para a análise feita para este trabalho, foi utilizado ACK por pacote, como no TSCH. Nas redes DSME, o ACK em grupo é feito por meio da utilização de intervalos de tempo dedicados dentro do CFP. Assim, utilizou-se ACK por pacote, para utilizar o máximo de intervalos de tempo possível para as transmissões de dados, tornando a estrutura de tempo utilizada pela rede DSME mais semelhante às definidas para os outros protocolos.

Protocolo baseado no modo TSCH

Em redes TSCH a comunicação ocorre com base em uma estrutura de *slotframe*. Cada *slotframe* é composto por um conjunto de intervalos de tempo e cada intervalo de tempo é dedicado a um ou mais nós. É possível ter transmissões simultâneas no mesmo intervalo de tempo, em que cada transmissor transmite para um receptor diferente, e usando um canal diferente. Quando um par de intervalo de tempo e canal é dedicado a apenas um nó, o meio de comunicação pode ser acessado diretamente, sem contenção, caso contrário os nós usam um algoritmo CSMA/CA modificado para acessar o canal, para reduzir as colisões [17]. O *slotframe* repete automaticamente, e todos os nós têm uma noção compartilhada de tempo. Normalmente, a alocação de intervalos de tempo é configurada por uma camada superior quando o dispositivo

entra na rede. Os nós usam todos os canais, por meio de salto em frequência, para minimizar os efeitos negativos causados por problemas de multipercurso e interferência [16].

A Figura 7.7 ilustra um exemplo de *slotframe* com oito intervalos de tempo (S0 a S7). No protocolo TSCH, cada intervalo de tempo possui duração de 10 ms e acomoda uma transmissão de pacote e a recepção do pacote ACK correspondente. Se um determinado transmissor não receber o pacote ACK dentro do intervalo de tempo, ele pode retransmitir esse pacote no próximo intervalo de tempo alocado a ele.

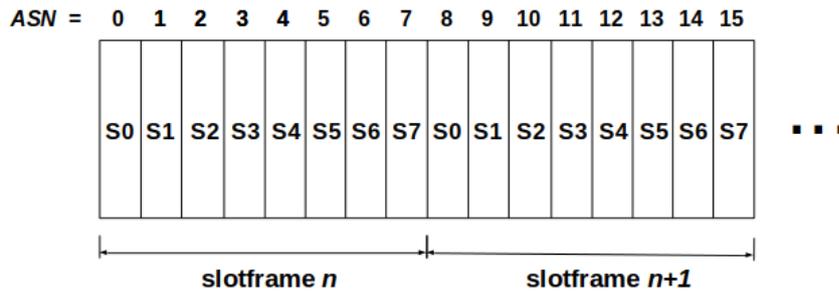


Figura 7.7 Exemplo de *slotframe* com oito intervalos de tempo para uma rede TSCH.

Na implementação do TSCH, o canal a ser usado em um determinado intervalo de tempo é determinado usando

$$ch = (ASN + \lfloor ASN/SF_{size} \rfloor + ch_{os}) \bmod 16,$$

em que *ASN* é o *Absolute Slot Number*, definido como o número total de intervalos de tempo decorridos desde o início da rede e SF_{size} é o número de intervalos de tempo em um *slotframe*. Um valor de ch_{os} diferente é definido para cada nó na rede. Para a implementação avaliada neste capítulo o ch_{os} é igual ao ID do nó. Usando esta fórmula, os nós usam todos os 16 canais disponíveis, e é possível alcançar até 16 transmissões simultâneas sem colisões, usando canais diferentes.

O Padrão IEEE 802.15.4e também define o uso de listas negras, em que a lista de canais considerados no mecanismo de salto em frequência pode ser reduzida. Em [66] observou-se que quanto maior o tamanho da lista negra, melhor o desempenho da comunicação. Este resultado corrobora com os resultados apresentados em [18]. No entanto, este tipo de comportamento só ocorre se um monitoramento adequado da qualidade dos canais é realizado, para configurar corretamente a lista negra. Em [18], o melhor desempenho foi obtido ao usar apenas um canal, o melhor durante o experimento. Este resultado encoraja o uso de adaptação de canal em vez de salto em frequência para a transmissão de pacotes de dados, como no ABMP.

Para o estudo de simulação descrito neste trabalho, o uso lista negra não foi considerado, uma vez que não há fontes de interferência externa nas simulações. As listas negras são usualmente utilizadas para excluir canais afetados por interferência externa, como nas soluções descritas em [66] e [136]. Por outro lado, o modelo de simulação considera aspectos importan-

tes do canal sem fio, tais como sombreamento, desvanecimento, assimetria do enlace, variações espaciais na qualidade dos canais, as diferentes características dos diferentes canais e o comportamento não estacionário do canal sem fio em longos períodos de tempo.

Os nós não têm problemas de deriva na fonte de *clock* nas simulações, de modo que eles mantêm a sincronização durante todo o tempo. Portanto, não foi utilizado um mecanismo para garantir a sincronização de tempo no TSCH. Na prática, é necessário efetuar a sincronização de tempo periodicamente. No Padrão IEEE 802.15.4e, cada nó é associado a um nó vizinho, chamado de *time-source neighbor*, e a sincronização pode ser baseada no tempo de recepção de pacotes de dados (sincronização baseada em quadros) ou com base em um *timestamp* adicionado nos pacotes ACK (sincronização baseada em ACK). Alguns aspectos da implementação desses mecanismos, tais como o modo de escolha do *time-source neighbor*, não são detalhados no padrão [17].

CSMA/CA

No protocolo CSMA/CA, quando um nó possui um pacote para transmitir, ele espera por um período aleatório inicial (*back-off*) antes de tentar a transmissão, o que só ocorre se o meio de comunicação estiver ocioso. Caso contrário, o nó aguarda um outro período de *back-off* antes de tentar acessar o canal novamente [137]. Se o acesso ao canal falhar para um determinado número de tentativas (três para a implementação utilizada neste trabalho), o pacote é descartado. Nas simulações foi utilizada a implementação do algoritmo CSMA/CA para o simulador Castalia descrito em [138], com uma pequena modificação, para permitir a retransmissão de pacotes na camada MAC. Todos os outros protocolos avaliados foram completamente implementados para o simulador Castalia pelo autor desta tese.

7.3.2 Avaliação Teórica de Desempenho

Para analisar a probabilidade de sucesso em uma transmissão de pacote usando o protocolo proposto, um modelo analítico foi desenvolvido. Para esta análise foi considerada uma rede em estrela, em que cada nó final possui um intervalo de tempo dedicado a ele em cada *slotframe*. O *multi-slotframe* é composto por k *slotframes*, e os *beacons* são numerados entre 0 e $k - 1$, como ilustrado na Figura 7.2.

A probabilidade média de recepção de um *beacon*, considerando todos os nós e todos os canais usados, é p_b , e p_d é a probabilidade média de sucesso em uma transmissão de pacote de dados. A probabilidade geral de sucesso em uma transmissão de pacote de dados depende de p_b , p_d e do número de tentativas por pacote. Como no ABMP os nós não precisam receber todos os *beacons*, a probabilidade geral de sucesso depende também do *slotframe* em que a tentativa de transmissão ocorre, uma vez que quanto mais distante do início do *multi-slotframe*, maior a probabilidade de que um *beacon* já tenha sido recebido. Considerando esta característica, a probabilidade geral de sucesso de uma transmissão de pacotes de dados no ABMP, $PS_A(i, a, k)$,

considerando k *slotframes* por *multi-slotframe*, a primeira tentativa ocorrendo no *slotframe* i , e com a tentativas consecutivas, pode ser obtido recursivamente a partir de

$$PS_A(i, a, k) = \begin{cases} (1 - (1 - p_b)^i)p_d + (1 - p_b)^i p_b p_d, & \text{se } a = 1; \\ 1 - \prod_{j=0}^{j < a} (1 - PS_A((i + j) \bmod k, 1, k)), & \text{se } a > 1. \end{cases} \quad (7.1)$$

De acordo com a Equação 7.1, quando uma tentativa de transmissão de um pacote de dados ocorre no *slotframe* i , considera-se que anteriormente já foram transmitidos i *beacons* dentro do mesmo *multi-slotframe* e um *beacon* adicional é transmitido no *slotframe* i . Dessa forma, o sucesso em uma tentativa de transmissão ocorre quando um dos $i + 1$ *beacons* é recebido com sucesso pelo nó final e quando o pacote de dados também é transmitido com sucesso, o que ocorre com probabilidade p_d . Portanto, quanto maior o valor de i , maior a probabilidade de um *beacon* ser recebido e, conseqüentemente, maior a probabilidade da tentativa de transmissão ocorrer com sucesso.

Considerando que os pacotes são gerados de forma aleatória na camada de aplicação e que a primeira tentativa de transmissão de um pacote de dados pode ocorrer em qualquer *slotframe* de um *multi-slotframe* com a mesma probabilidade, a probabilidade média de sucesso na transmissão de um pacote de dados pode ser obtida a partir de

$$\overline{PS_A}(a, k) = \frac{1}{k} \sum_{j=0}^{j < k} PS_A(j, a, k). \quad (7.2)$$

Diferente do ABMP, em redes DSME todos os *beacons* precisam ser recebidos pelos nós finais para manter a comunicação. Na configuração do DSME usada neste estudo, após a recepção de um *beacon*, em alguns casos os nós podem realizar a tentativas de transmissão, em a intervalos de tempo diferentes dentro do mesmo *multi-superframe*. Nesse caso, os nós não precisam receber outros *beacons* para realizar as retransmissões. Para esta configuração do protocolo DSME, a probabilidade geral de sucesso em uma transmissão de pacote de dados, para a tentativas de transmissão, pode ser obtida a partir de

$$PS_D(a) = p_b(1 - (1 - p_d)^a). \quad (7.3)$$

Quando não é possível alocar vários intervalos de tempo dentro do mesmo *multi-superframe* para os nós, cada tentativa de transmissão é precedida pela recepção de um *beacon*. Para esta configuração do protocolo DSME, a probabilidade geral de sucesso em uma transmissão de pacote de dados, para a tentativas de transmissão, pode ser obtida a partir de

$$PS_D(a) = 1 - (1 - p_b p_d)^a. \tag{7.4}$$

Em um protocolo em que os nós transmitem os seus pacotes sem a dependência da recepção dos *beacons*, como é o caso do TSCH, a probabilidade de sucesso de uma transmissão de pacote de dados, para a tentativas de transmissão, pode ser obtida a partir de

$$PS_T(a) = 1 - (1 - p_d)^a \tag{7.5}$$

As Equações 7.2, 7.3 e 7.4 são reduzidas à Equação 7.5 quando $p_b = 1$. Na Figura 7.8 são mostradas as curvas de $\overline{PS}_A(2, 8)$ e $PS_D(2)$ (usando a Equação 7.3) em função de p_d e p_b . Diferentes curvas são mostradas, para diferentes valores de p_b , como indicado no gráfico da Figura 7.8(b), que corresponde à probabilidade de sucesso para o DSME. No gráfico da Figura 7.8(a) é considerada a probabilidade geral de sucesso no ABMP, e as curvas correspondem aos mesmos valores de p_b usados no gráfico da Figura 7.8(b).

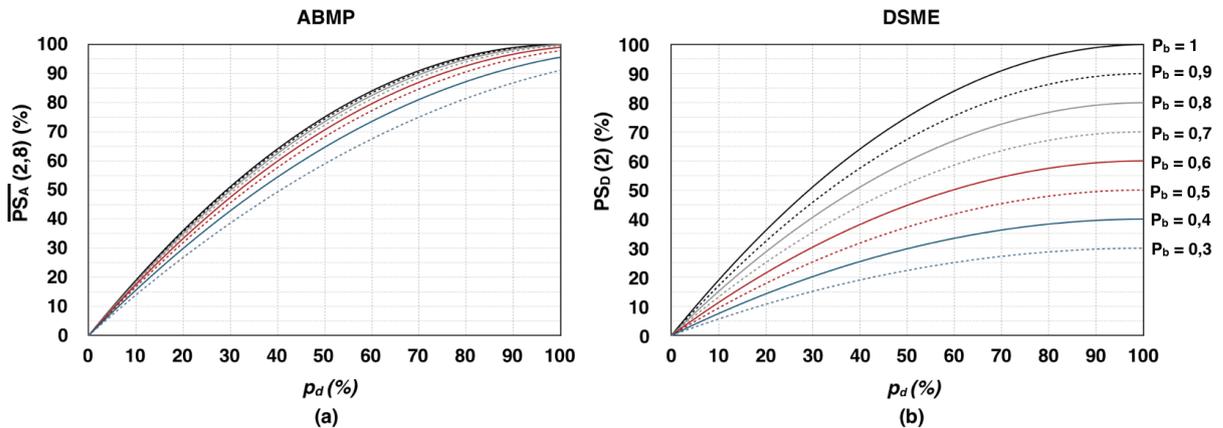


Figura 7.8 Probabilidade de sucesso em uma transmissão de pacote de dados.

Como no DSME todos os *beacons* precisam ser recebidos pelos nós, a probabilidade de sucesso em transmissões de pacotes de dados é limitada por p_b . Em ambos os gráficos, os cenários em que $p_b = 1$ correspondem às probabilidades para a rede TSCH, em que não há dependência de recepção de *beacons*. O ABMP converge rapidamente para a curva do melhor caso ($p_b = 1$). O ABMP tenta otimizar continuamente as probabilidades p_b e p_d por meio do monitoramento contínuo da qualidade dos enlaces, para configurar dinamicamente a lista de canais utilizados para transmitir os *beacons* e para alocar canais de forma adaptativa para as transmissões de dados a partir dos nós finais e coordenadores intermediários. Assim, é possível obter uma alta confiabilidade, apesar do uso de *beacons* para sincronizar as transmissões, como confirmado pelos estudos de simulação descritos na Seção 7.3.3.

Na Figura 7.9(a) são mostradas as curvas da probabilidade geral de sucesso (PS) em uma transmissão de pacote de dados para os três protocolos, em função de a , e na Figura 7.9(b) são mostradas as curvas de PS em função de k . Quatro cenários foram analisados, com valores diferentes de p_b e p_d . As escalas do eixo Y são diferentes para os diferentes valores de p_b e p_d , a fim de melhorar a visualização.

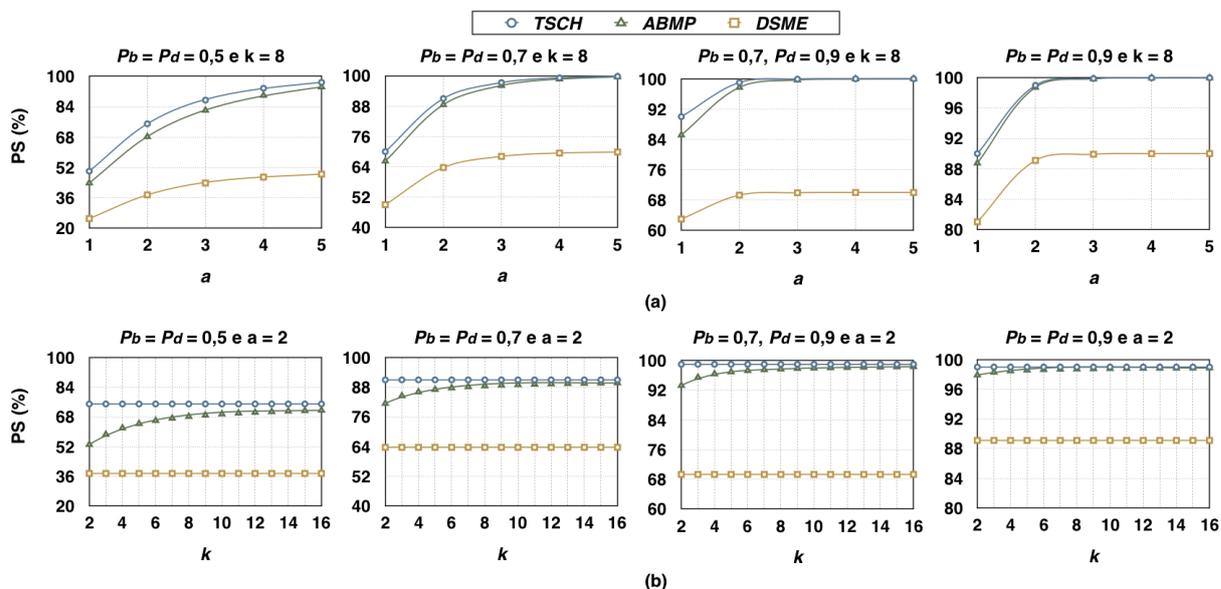


Figura 7.9 Probabilidade de sucesso na transmissão de um pacote de dados para diferentes valores de a e k .

A partir da análise dos gráficos da Figura 7.9, é possível ver que PS_A (ABMP) converge para PS_T (TSCH) rapidamente quando mais retransmissões são utilizadas ou quando os valores de p_b e p_d são maiores. Por exemplo, para $p_d = 0,9$ e $p_b = 0,7$, o valor de PS_A é 97,3% quando $a = 2$, que é muito próximo do valor obtido com TSCH, ou seja, 99%. Assim, para $k = 8$, mesmo com um valor relativamente baixo para p_b , a confiabilidade do ABMP é comparável com a confiabilidade teórica do TSCH, considerando $p_d = 0,9$. Quando p_b e p_d são iguais a 0,9, o PS_A é igual a 98,74% para $a = 2$ e igual a 99,86% para $a = 3$.

Os valores de PS_D (DSME) e PS_T são constantes nos gráficos da Figura 7.9(b), uma vez que o valor de k influencia apenas o ABMP. Mesmo para valores baixos de p_d e p_b , o valor de PS_A fica próximo ao valor de PS_T , para valores mais elevados de k . No entanto, quando k é maior o mecanismo de adaptação de canal empregado no ABMP é menos reativo, uma vez que os novos canais são alocados apenas a partir do início de um novo *multi-slotframe*. Assim, para valores mais elevados de k , é mais difícil reagir rapidamente a mudanças bruscas na qualidade dos enlaces e, portanto, é mais difícil otimizar os valores de p_d e p_b em tempo real. Além disso, usando menores valores de k , é possível excluir canais que apresentam baixa qualidade para um número significativo de enlaces, o que pode ocorrer, por exemplo, em cenários com fontes de interferência que afetam os coordenadores. Com base na análise mostrada na Figura 7.9(b), utilizou-se $k = 8$ nas simulações para o ABMP, a fim de obter uma boa relação de compro-

misso entre a dependência dos *beacons* e reatividade do protocolo, e para alcançar uma alta confiabilidade, mesmo quando os valores de p_b e p_a não forem muito altos.

A partir das análises mostradas nesta seção, é possível ver que no ABMP o uso de *beacons* não afeta de forma muito significativa o desempenho da rede, em comparação com o DSME. Além disso, por meio dos *beacons*, o protocolo pode usar o mecanismo de adaptação de canais e atualizar a lista de canais utilizados em toda a rede de forma dinâmica. Com esta abordagem, não é necessário implementar um mecanismo adicional para sincronizar o relógio de todos os nós. Assim, é possível implementar o ABMP em nós de sensores de baixo custo, sem a necessidade de fontes de relógio de alta precisão.

7.3.3 Resultados das Simulações

Para permitir a simulação de protocolos para RSSFI, é necessário utilizar um modelo que leve em consideração as características do canal sem fio por um longo período de tempo. No Capítulo 5 foi descrito um modelo de simulação, que inclui os efeitos da perda de percurso, sombreamento log-normal e as características não-estacionárias do canal. Neste modelo, diferentes canais podem apresentar características diferentes, uma vez que os canais definidos pela camada física do IEEE 802.15.4 são descorrelacionados em frequência. O modelo de simulação e todos os protocolos avaliados nesta tese foram implementados no simulador de código aberto Castalia.

Como o modelo utilizado nesta pesquisa considera o comportamento não-estacionário dos canais, quando ocorre uma mudança nas características dos canais a qualidade dos enlaces pode aumentar ou diminuir, dependendo dos novos valores dos parâmetros de sombreamento e atenuação para cada canal. Assim, o mecanismo de adaptação de canal precisa reagir rapidamente, de modo a alocar diferentes canais para os enlaces com baixa qualidade após a alteração nas características dos canais.

A Tabela 7.2 contém os parâmetros considerados nas simulações deste capítulo. Todos os valores utilizados no modelo de camada física foram obtidos a partir de experimentos realizados em um ambiente industrial, descrito em [6].

Redes com Topologia em Estrela

Foram realizadas simulações para redes com quatro, oito e 16 nós finais. Para cada configuração, foram realizadas 10 replicações, com a rede funcionando durante cinco horas. Em cada replicação, a posição dos nós foi determinada aleatoriamente, com uma distância máxima de $40\sqrt{2}$ m do coordenador. Foram realizadas mais 10 replicações, com uma mesma rede com 16 nós finais (os nós posicionados no mesmo local), para analisar o desempenho da rede para cada nó final individual.

Para realizar uma comparação justa, para cada replicação foi utilizada a mesma semente (parâmetro *seed* do simulador) para avaliar cada protocolo, e diferentes sementes foram uti-

Tabela 7.2 Parâmetros utilizados nas simulações.

Tamanho da área	200 x 200 metros
Camada física	IEEE 802.15.4
Taxa de <i>bits</i>	250 kbit/s
Tempo de simulação	18000 s (5 h)
Potência de transmissão	0 dBm
Taxa de transmissão de pacote	1 pacote/s
Tempo médio de mudança	40 min
Expoente de perda de percurso (n)	1,69
Distância de referência (d_0)	15 m
Perda de percurso para d_0 ($L(d_0)$)	80,48 dB
Desvio padrão do sombreamento (σ)	6,62 dB
Fator de Rice (K)	12,3 dB
Desvio padrão do fator de Rice (K_σ)	5,4 dB

lizadas para diferentes replicações. Assim, todos os protocolos foram avaliados considerando os nós posicionados na mesma posição e com as mesmas características para o canal sem fio durante as replicações. Para tornar a estrutura de tempo do ABMP semelhante à do TSCH, os intervalos de tempo do ABMP também foram configurados para terem uma duração igual a 10 ms, embora na prática intervalos de tempo menores possam ser utilizados para a transmissão de pacotes de dados, uma vez que no ABMP o reconhecimento de pacotes ocorre por meio dos *beacons*. Nos protocolos que usam adaptação de canal, um limiar de qualidade de enlace $T_{lq} = 90\%$ foi usado.

Na Figura 7.10(a) são mostradas as Taxas de Recepção de Pacote (TRP) na camada MAC para os seis protocolos avaliados, na Figura 7.10(b) são mostrados os valores de TRP na camada de aplicação (APP) e na Figura 7.10(c) são mostrados os valores relativos ao número requerido de transmissões de pacote (*Required Number of Packet transmissions* – RNP), que é o número médio de tentativas feitas para cada pacote de dados gerado na rede, independente da recepção. Como duas tentativas de transmissão por pacote foram utilizadas, o valor máximo de RNP neste caso é dois.

Os resultados mostrados na Figura 7.10(a) consideram apenas os pacotes que foram efetivamente transmitidos. Assim, os pacotes descartados devido a problemas na recepção dos *beacons*, para protocolos baseados em *beacons*, não são considerados. Esse resultado permite analisar a qualidade dos enlaces apenas em uma direção, dos nós finais até o CP. Os protocolos que usam adaptação de canal apresentam uma TRP maior para o enlace no sentido direto. Por exemplo, CA-DSME e H-DSME apresentaram um melhor desempenho em comparação com o CH-DSME, que usa salto em frequência. O resultado para CH-DSME foi semelhante ao resultado do TSCH, que também usa salto em frequência.

Os resultados mostrados na Figura 7.10(b) consideram todos os aspectos, incluindo as re-transmissões de pacotes e as falhas na transmissão dos *beacons*. O H-DSME apresentou um

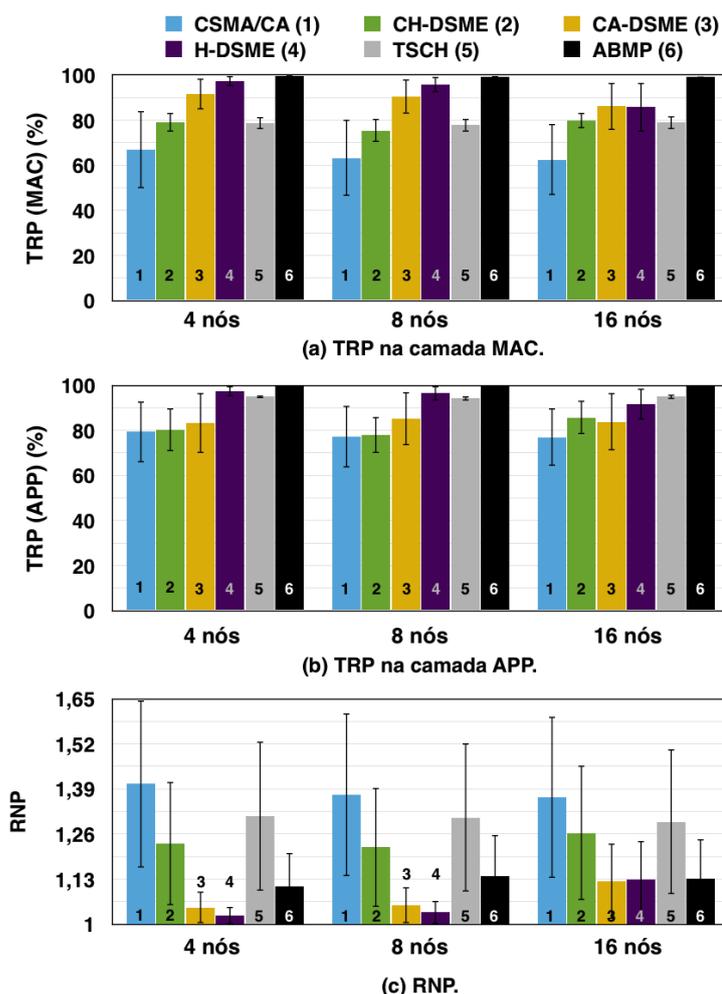


Figura 7.10 (a) Taxa de recepção de pacote na camada MAC. (b) Taxa de recepção de pacote na camada de aplicação. (c) Número requerido de transmissões de pacote.

melhor resultado em comparação ao CA-DSME, já que mais *beacons* são recebidos no H-DSME, e o mecanismo de adaptação de canal é mais reativo. O ABMP utiliza adaptação de canal e apresentou o melhor resultado entre todos os protocolos avaliados. O mecanismo de adaptação de canal no ABMP reage ainda mais rápido às mudanças que ocorrem na qualidade dos canais ao longo do tempo em comparação com o H-DSME. Isto ocorre devido ao uso do salto em frequência e adaptação dinâmica dos canais usados para transmitir os *beacons*. Por exemplo, a p_b média para todas as replicações foi 86% para o H-DSME, e 91,6% para o ABMP, considerando as simulações com 16 nós finais.

O desempenho do ABMP e do TSCH permanece quase constante para os cenários com quatro, oito e 16 nós. Para os protocolos baseados em DSME, o desempenho foi pior para redes com 16 nós finais. Isto pode ser explicado pela estrutura de tempo usada para as redes DSME, que possui um número fixo de intervalos de tempo por *multi-superframe*. Assim, para redes com quatro e oito nós finais, cinco e dois intervalos de tempo foram alocados para cada nó em cada *multi-superframe*, respectivamente. Assim, é possível ter as duas tentativas de transmissão

dentro do mesmo *multi-superframe*. Para redes com 16 nós finais, apenas um intervalo de tempo foi alocado por nó final dentro de cada *multi-superframe*. No ABMP e no TSCH o *slotframe* pode ser aumentado e diminuído com o número de nós. Assim, independente do número de nós finais, o número de intervalos de tempo por nó em cada *slotframe* é o mesmo.

O RNP dos protocolos baseados em DSME que usam adaptação de canal foi muito baixo para as redes com quatro e oito nós finais. Isso ocorreu porque o estimador de qualidade de enlace considera a qualidade de ambos os sentidos dos enlaces. Assim, a probabilidade de receber o ACK também é otimizada. Uma vez que no ABMP foi utilizado ACK em grupo, por meio dos *beacons*, às vezes o pacote é recebido no coordenador, e o *beacon* não é recebido no nó final. Neste caso, ocorre uma transmissão adicional, e uma cópia duplicada é entregue no coordenador. Embora a lista de canais utilizados para a transmissão dos *beacons* seja modificada dinamicamente, é difícil garantir que todos os canais utilizados para transmitir os *beacons* apresentem uma qualidade muito boa para todos os nós finais.

No TSCH, os nós finais usam todos os 16 canais disponíveis, e assim os canais com baixa qualidade também são usados. Se a transmissão na primeira tentativa falhar, o nó final pode tentar novamente, usando outro canal, o que aumenta a probabilidade de recepção do pacote na camada de aplicação. No entanto, o valor de RNP pode ser alto, como foi o caso das simulações descritas nesta seção.

O CSMA/CA apresentou o pior desempenho entre todos os protocolos avaliados, o que confirma que os protocolos baseados em contenção que utilizam apenas um canal, como os definidos no Padrão IEEE 802.15.4, não são adequados para implementar RSSFIs. Ao usar o CSMA/CA, os nós finais acessam o meio de comunicação de forma aleatória e distribuída, com base na noção local de disponibilidade do canal. Embora os nós finais detectem a ocupação do meio de comunicação antes das transmissões, colisões podem ocorrer devido ao problema do terminal escondido, em que alguns nós finais estão fora do alcance de outros nós finais. Outro aspecto a ser considerado é a alta variância da TRP quando se utiliza CSMA/CA. Ao usar apenas um canal, os nós finais podem permanecer grandes períodos de tempo com uma TRP muito baixa, ou mesmo com TRP igual a zero, em casos de desvanecimento profundo.

Na Figura 7.11 pode-se ver a função de distribuição cumulativa empírica (a) e o histograma (b) do atraso dos protocolos avaliados, para o cenário com 16 nós finais. Entre os protocolos baseados em DSME, apenas os resultados para o H-DSME são mostrados, uma vez que ele apresentou o melhor desempenho, e utilizou a mesma estrutura de tempo dos outros protocolos baseados em DSME, o que resulta em um atraso semelhante. Os gráficos com as informações de atraso consideram apenas os pacotes efetivamente recebidos.

O atraso de acesso é muito menor para o CSMA/CA, uma vez que os nós podem iniciar as transmissões de pacotes prontamente, pois não é necessário esperar por um intervalo de tempo dedicado. Por outro lado, vários pacotes podem ser perdidos, quando vários nós tentam transmitir ao mesmo tempo. Os nós podem falhar ao acessar o canal, considerando o limite de períodos de *back-off* permitidos, ou colisões podem ocorrer devido ao problema do terminal

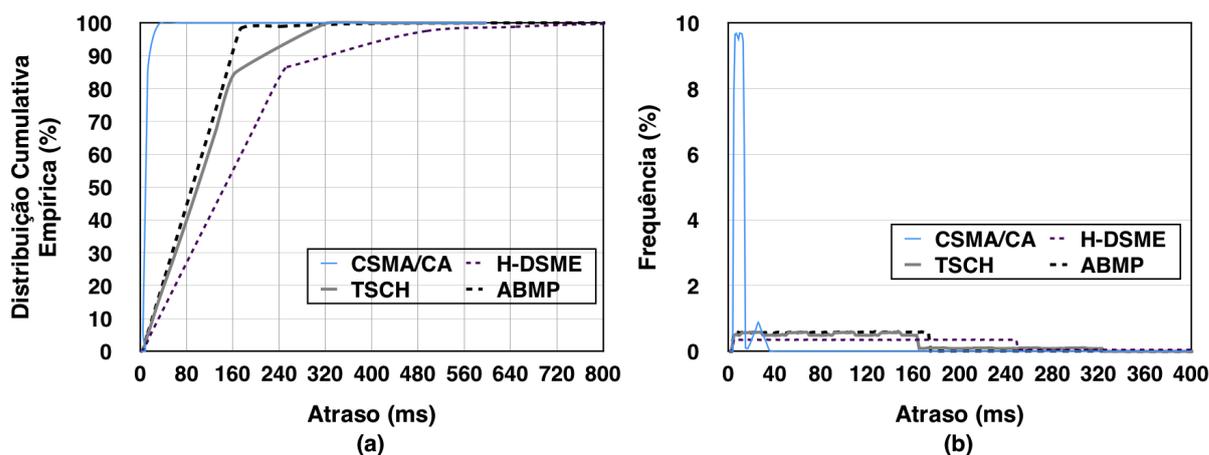


Figura 7.11 Função de distribuição cumulativa empírica (a) e histograma (b) do atraso para uma rede com 16 nós finais e topologia em estrela.

escondido. Nos outros protocolos, o atraso é delimitado pelo tamanho da estrutura temporal definida pelo protocolo.

Na configuração usada para o DSME, o *multi-superframe* possui 245,76 ms de duração e cerca de 85% dos pacotes foram entregues com um atraso menor que este valor. 97,4% dos pacotes foram entregues com atraso inferior a 492 ms (dois períodos de *multi-superframe*). Uma vez que TSCH e ABMP não têm o CAP, as estruturas de tempo definidas para estes protocolos têm uma duração menor em comparação com o DSME. Para redes com 16 nós finais, a duração de um *slotframe* no TSCH é igual a 160 ms, e igual a 170 ms para o ABMP (considerando o intervalo de tempo usado para transmitir o *beacon*). No TSCH, 83% dos pacotes foram entregues com atraso inferior a 160 ms, e 99,7% dos pacotes foram entregues com atraso inferior a 320 ms (dois períodos de *slotframe*). O *slotframe* no ABMP é maior em comparação com TSCH, no entanto mais pacotes foram entregues no primeiro período de *slotframe*, uma vez que a probabilidade de entrega é otimizada devido ao uso de adaptação de canal. Assim, 96,3% dos pacotes foram entregues com atraso menor que 170 ms, e 99,8% dos pacotes foram entregues com atraso inferior a 340 ms (dois períodos de *slotframe*).

Também é importante verificar o intervalo de tempo entre a recepção de dois pacotes, que também é influenciado pelas falhas de transmissão. Na Figura 7.12 pode-se ver a função de distribuição cumulativa empírica do intervalo de tempo entre a recepção de dois pacotes consecutivos para todos os protocolos avaliados. Os pacotes são gerados com uma taxa de 1 pacote/s na camada de aplicação, mas o atraso para obter acesso ao canal e as falhas nas transmissões provocam variações nos intervalos de tempo entre duas recepções de pacote.

Devido ao elevado valor de TRP para o ABMP, em 99,7% do tempo o intervalo entre duas recepções de pacote é inferior a 1,2 s. No TSCH, o intervalo entre a recepção de dois pacotes é inferior a 1,2 s durante 92,2% do tempo. No DSME, durante 83% do tempo, o intervalo é menor que 1,2 s. Devido à alta variação da TRP no CSMA/CA, a função de distribuição cumulativa empírica só atinge um valor de 99% para um intervalo de tempo de 5 s. Outro

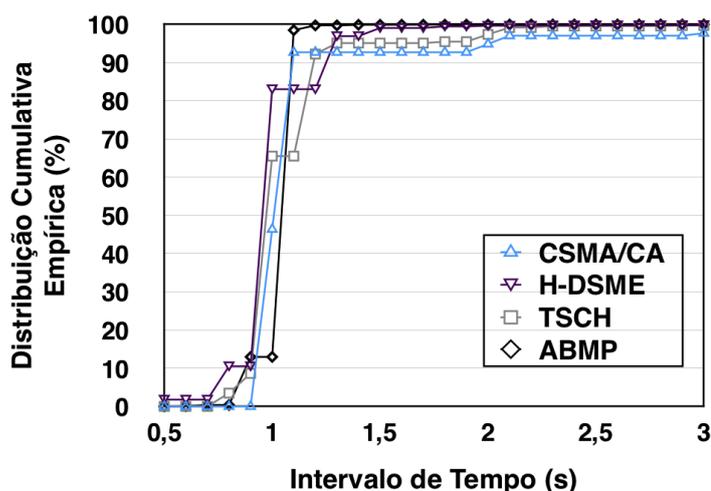


Figura 7.12 Intervalo de tempo entre a recepção de dois pacotes para uma rede com 16 nós finais e topologia em estrela.

aspecto importante é o tempo máximo entre a recepção de dois pacotes consecutivos; ou seja, o tempo máximo em que algum nó permanece desconectado da rede devido a um problema no seu enlace com o coordenador. A Tabela 7.3 contém o tempo máximo de desconexão para os protocolos avaliados.

Tabela 7.3 Tempo máximo de desconexão de um nó para uma rede em estrela com 16 nós finais.

CSMA/CA	H-DSME	TSCH	ABMP
7142,17 s	376,01 s	5,92 s	27,88 s

Ao usar CSMA/CA, um dos nós, durante uma das replicações, permaneceu cerca de duas horas desconectado, devido a um problema de desvanecimento profundo no canal usado para transmitir os pacotes, o que mostra novamente que o uso de um protocolo que usa apenas um canal não é adequado para implementar uma RSSFI. O tempo máximo de desconexão do TSCH foi o menor, porque no TSCH os nós finais usam um canal diferente para cada transmissão consecutiva e, portanto, sofrem menos com problemas de desvanecimento em um único canal ou em um subconjunto de canais. O tempo máximo de desconexão também foi baixo para ABMP, uma vez que ele emprega a estimativa da qualidade de enlace em tempo real e também um mecanismo para identificar problemas de desvanecimento profundo, mas foi pior do que TSCH neste aspecto. Embora o ABMP tenha apresentado um valor maior para o tempo máximo de desconexão em comparação com o TSCH, é importante notar que este problema não ocorre com frequência, uma vez que durante 99,93% do tempo o intervalo entre a recepção de dois pacotes consecutivos é menor que 2 s.

A partir das simulações, foi possível calcular o valor de p_b e p_d para os protocolos. Na Figura 7.13 são mostrados os valores de TRP na camada de aplicação para cada nó individual e os resultados calculados usando as equações 7.2, 7.4 e 7.5, para o experimento com 16 nós finais, e considerando as mesmas posições nas 10 replicações. Para o ABMP a TRP foi muito alta para

todos os nós, enquanto que para o TSCH alguns nós tiveram uma TRP abaixo de 90%, como foi o caso do nó final 14, que é o nó final que foi posicionado mais distante do CP (50,09 m). Em geral, o desempenho do DSME foi significativamente pior, principalmente devido a problemas na recepção dos *beacons*. A TRP para o CSMA/CA também é mostrada no gráfico. Como já observado nos outros resultados, este protocolo apresentou o pior desempenho.

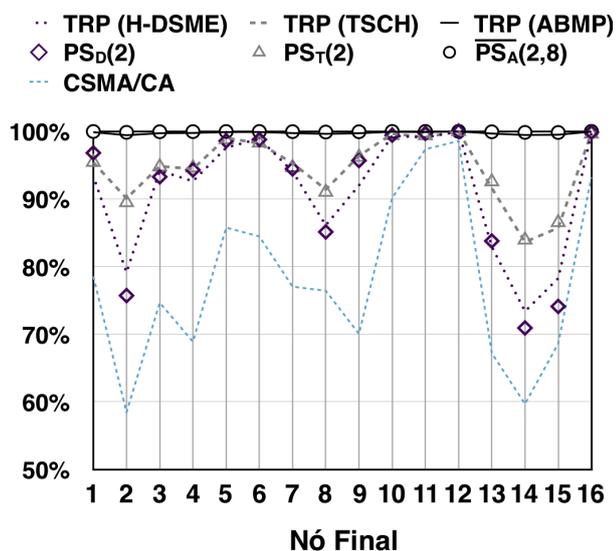


Figura 7.13 TRP na camada de aplicação para uma rede com 16 nós finais e topologia em estrela.

Usando os parâmetros mostrados na Tabela 7.2, que foram obtidos a partir de resultados experimentais em um ambiente industrial [6], a perda de percurso média para o nó final 14 é igual a -89,33 dB. Considerando o sombreamento (6,62 dB) e a potência de transmissão (0 dBm), a potência média de recepção permanece na faixa entre -102,57 dBm e -76,09 dBm durante 95,44% do tempo, considerando duas vezes o desvio padrão. Uma vez que a sensibilidade do transceptor é de -94 dBm, alguns canais podem apresentar uma qualidade muito baixa (às vezes com problemas de desvanecimento profundo), enquanto outros canais podem apresentar uma qualidade muito alta (com mais de 17 dB de diferença em relação à sensibilidade). Devido ao uso de adaptação de canal e estimação de qualidade de enlace em tempo real no ABMP, apenas bons canais são usados na maior parte do tempo, o que permite alcançar uma TRP muito alta. Como a transmissão dos *beacons* é feita usando salto em frequência, é difícil conseguir um valor próximo a 100% também para p_b . No entanto, devido à adaptação dinâmica da lista de canais usados para transmitir os *beacons*, o valor médio de p_b foi de 91,6% e o valor mínimo para um nó específico foi de 89,2%.

Como um exemplo do mecanismo de adaptação de canal implementado, a Figura 7.14 mostra a potência de recepção para o nó final 14 entre os minutos 217 e 233 de uma das replicações para o protocolo ABMP. No gráfico, é possível ver o momento em que a qualidade do canal em uso pelo nó final é degradada, devido a uma modificação no perfil de multipercurso do ambiente. Também é possível observar os valores fornecidos pelo estimador de qualidade de enlace (LQE) e a TRP na camada de aplicação. Vale ressaltar que o estimador de qualidade de en-

lace utilizado apresentou comportamento estável e não provocou trocas de canal apenas devido a variações rápidas na qualidade do enlace, como no início do período mostrado no gráfico. No entanto, o estimador reage rapidamente a mudanças mais persistentes nas características do canal, como foi o caso logo após o minuto 225.

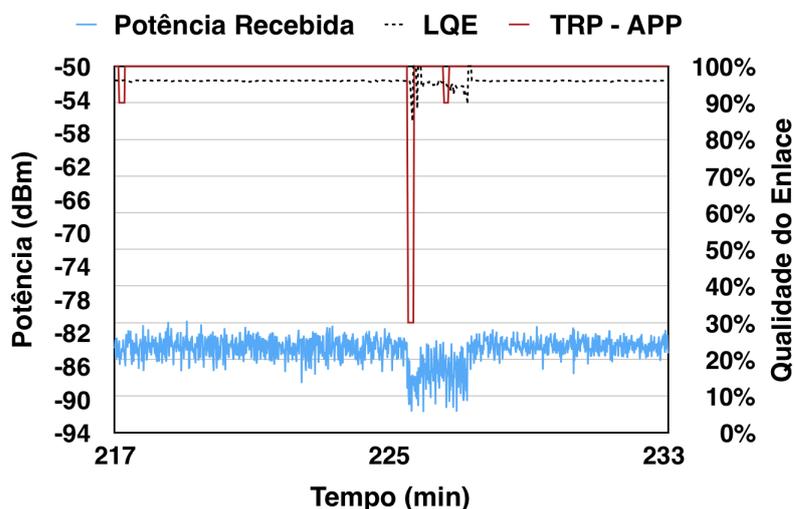


Figura 7.14 Potência recebida, TRP na camada de aplicação e valor fornecido pelo estimador (LQE) para o nó final 14.

Às vezes, o procedimento de troca de canal é acionado várias vezes em um curto intervalo de tempo, até que o nó passe a utilizar um canal com boa qualidade. Por exemplo, após o minuto 225, o nó final 14 trocou o canal devido a um possível problema de desvanecimento profundo detectado pelo coordenador. Depois disso, mais três trocas de canal ocorreram nos dois minutos seguintes, até que o nó escolheu um canal com uma qualidade superior a 90%, de acordo com o estimador de qualidade de enlace. Depois disso, o nó permaneceu usando o mesmo canal até o final da replicação. Em alguns casos, como demonstrado nos experimentos descritos em [75], os canais podem manter as mesmas características durante várias horas antes que uma mudança abrupta em suas características ocorra. Se a aplicação suportar limiares de qualidade mais baixos, o procedimento de troca de canal é executado com menos frequência.

Redes com Topologia em Árvore

Apenas ABMP e TSCH foram analisados para redes com topologia em árvore. Foram considerados quatro cenários, em que cada um foi utilizado um CP, um conjunto de coordenadores intermediários (2 ou 4) e o mesmo número de nós finais por coordenador (8 ou 12). Assim, foram avaliadas redes com 16, 24, 32 e 48 nós finais. Tanto no TSCH como no ABMP, foi atribuído um intervalo de tempo por *slotframe* para cada nó final e múltiplos intervalos de tempo foram atribuídos aos coordenadores encaminharem os pacotes para o CP. Nesta análise, agregação de pacotes não foi considerada, o que poderia diminuir o atraso global. Este mecanismo pode ser aplicado em ambos os protocolos da mesma maneira.

Foram realizadas dez replicações para cada cenário, com os nós posicionados aleatoriamente. A distância máxima entre os coordenadores e o CP foi igual a $30\sqrt{2}$ m e a distância máxima entre os nós finais e os coordenadores intermediários foi igual a $40\sqrt{2}$ m. Também foram realizadas 10 replicações com a mesma rede (os nós posicionados no mesmo local), para avaliar o desempenho da rede para os nós individuais.

No TSCH, o canal a ser utilizado por um transmissor em cada intervalo de tempo depende do ID do receptor. Assim, em cada intervalo de tempo, diferentes canais são utilizados para diferentes receptores. Uma vez que os 16 canais disponíveis são usados, uma possível colisão só pode ocorrer se dois receptores (com IDs i_a e i_b) estiverem posicionados próximos um do outro e se $(i_a - i_b) = 16n$, para algum inteiro n . Como nas simulações descritas nesta seção foram utilizados no máximo quatro coordenadores, as transmissões ocorrem sem colisões.

No ABMP, a decisão sobre os canais utilizados pelos nós finais para transmitir os pacotes de dados é feita localmente. Assim, diferentes coordenadores poderiam alocar o mesmo canal para o mesmo intervalo de tempo e, dependendo da posição dos coordenadores, poderiam ocorrer colisões. Na implementação atual do ABMP, uma abordagem simples é usada para evitar colisões, na qual diferentes conjuntos de canais são usados em cada sub-rede. Em cenários com dois coordenadores, oito canais foram atribuídos para cada sub-rede e em cenários com quatro coordenadores, quatro canais foram atribuídos para cada sub-rede. Isso diminui o grau de liberdade do mecanismo de adaptação de canal. Em trabalhos futuros, serão investigados mecanismos mais elaborados para definir a lista de canais utilizados em cada sub-rede. Como foi utilizado salto em frequência para as transmissões dos *beacons*, gerenciado pelo CP, para esses pacotes todos os canais podem ser usados.

Uma análise foi realizada para definir o número de intervalos de tempo alocados aos coordenadores (N_s) para encaminhar pacotes de dados em cada *slotframe*, a fim de alcançar uma boa relação de compromisso entre o número de pacotes que um coordenador pode encaminhar por nó final, por segundo, e a duração do *slotframe*, que influencia o atraso na rede. Em média, o coordenador pode encaminhar A_n pacotes por segundo de cada nó final conectado a ele. Se A_n for menor que a taxa de transmissão de pacote do nó final multiplicada pelo número máximo de tentativas de transmissão por pacote, alguns pacotes podem ser descartados no coordenador. Por outro lado, quanto maior o valor de A_n , maior o atraso da rede. A duração de um *slotframe* (SF_d), em milissegundos, é definida para o ABMP de acordo com

$$SF_d = (2 + (N_{co} \times N_s) + e) \times T_{len}, \quad (7.6)$$

em que N_{co} é o número de coordenadores na rede, e é o número de nós finais conectados a cada coordenador e T_{len} é a duração dos intervalos de tempo, em milissegundos. No ABMP, dois intervalos de tempo por *slotframe* são dedicados para transmitir os *beacons*. A Fórmula 7.6 considera que todos os intervalos de tempo têm a mesma duração.

A taxa A_n é definida por

$$A_n = \frac{N_s}{e \times t \times (SF_d \times 10^3)}, \quad (7.7)$$

em que t é o número de pacotes transmitidos por segundo pelos nós finais.

A Tabela 7.4 contém os valores de N_s , A_n e SF_d para cada configuração e para cada protocolo. Para tornar a estrutura de tempo semelhante ao TSCH, $T_{len} = 10$ ms também foi usado para o ABMP. A taxa de transmissão de pacote é $t = 1$ pacote/s. Para os cenários com 16, 24 e 32 nós finais, foi possível ter um valor de A_n maior que dois, para evitar descartar pacotes, mesmo no pior caso, quando todos os nós têm RNP igual a 2. Para redes com 48 nós finais, o valor de A_n foi igual a 1,5 e 1,53 pacotes por segundo por nó final, para ABMP e TSCH, respectivamente. Portanto, é possível que os coordenadores descartem alguns pacotes. Para esta configuração, SF_d é igual a 500 ms para o ABMP e 480 ms para o TSCH. Uma vez que o intervalo entre as transmissões de dois pacotes é 1 s nas simulações e os nós podem transmitir cada pacote até duas vezes, para valores de SF_d maiores que 500 ms o número de pacotes descartados no *buffer* da camada de aplicação poderia ser muito elevado. Nos resultados das simulações com topologia em estrela, o RNP foi de cerca de 1,15 e 1,3 para as redes ABMP e TSCH, respectivamente. Assim, valores de A_n iguais a 1,5 e 1,53 pacotes por segundo por nó final são suficientes para manter uma boa qualidade de serviço neste caso.

Tabela 7.4 Parâmetros usados para configurar a estrutura de *slotframe* dos protocolos.

N_{co}	e	N_s	A_n	A_n	SF_d	SF_d
			ABMP	TSCH	ABMP	TSCH
2	8	3	2,34	2,50	160 ms	140 ms
2	12	7	2,08	2,16	280 ms	260 ms
4	8	5	2,08	2,16	300 ms	280 ms
4	12	9	1,5	1,53	500 ms	480 ms

A Figura 7.15 ilustra a estrutura do *slotframe* para a rede com dois coordenadores intermediários e oito nós finais por sub-rede. Nesse cenário, $N_s = 3$, então cada coordenador possui três intervalos de tempo no final do *slotframe*, de forma intercalada, para encaminhar pacotes recebidos dos nós finais. As transmissões dos nós finais nas duas sub-redes ocorrem em simultâneo, usando canais diferentes. Devido às transmissões em simultâneo, o tamanho do *slotframe* é pequeno, mesmo considerando os intervalos de tempo para encaminhamento dos *beacons* e dos pacotes de dados pelos coordenadores intermediários. Por exemplo, em uma rede em estrela com 16 nós finais, os *slotframes* precisam ter 17 intervalos de tempo. Para a rede com 16 nós finais e dois coordenadores intermediários, os *slotframes* possuem 16 intervalos de tempo, mesmo considerando os intervalos de tempo alocados aos coordenadores intermediários.

Nos cenários avaliados neste capítulo, todos os nós da rede possuem apenas um transceptor para realizar comunicação, além dos nós LQE integrados aos coordenadores. Duas soluções para reduzir a latência poderiam ser empregadas no ABMP. A primeira é a utilização de múltiplos transceptores no CP. Como apenas um dos nós da rede seria equipado com múltiplos

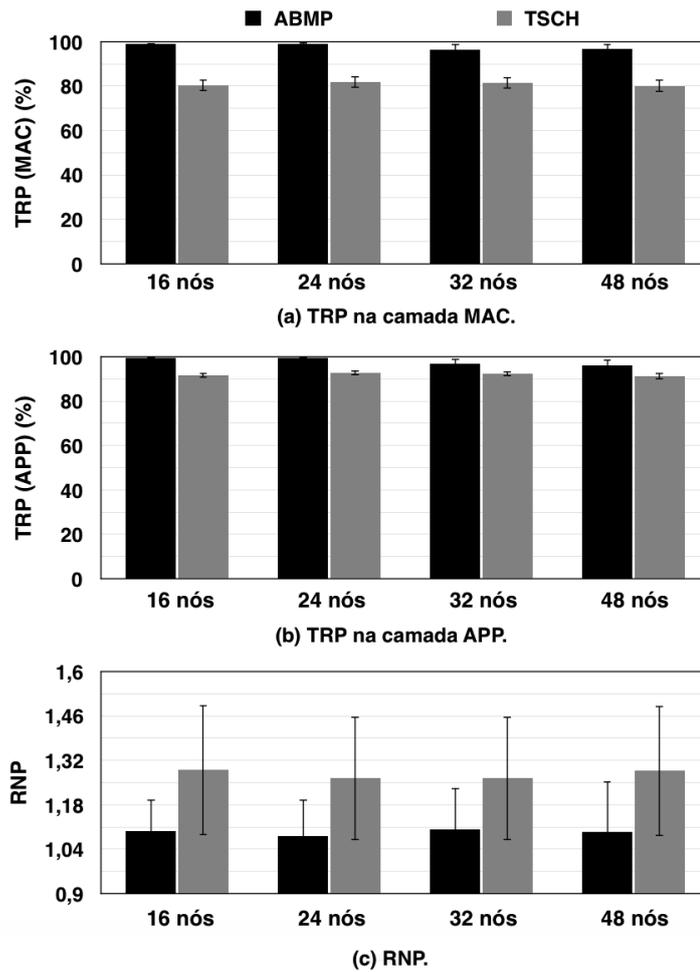


Figura 7.16 (a) Taxa de recepção de pacote na camada MAC. (b) Taxa de recepção de pacote na camada de aplicação. (c) Número requerido de transmissões de pacote.

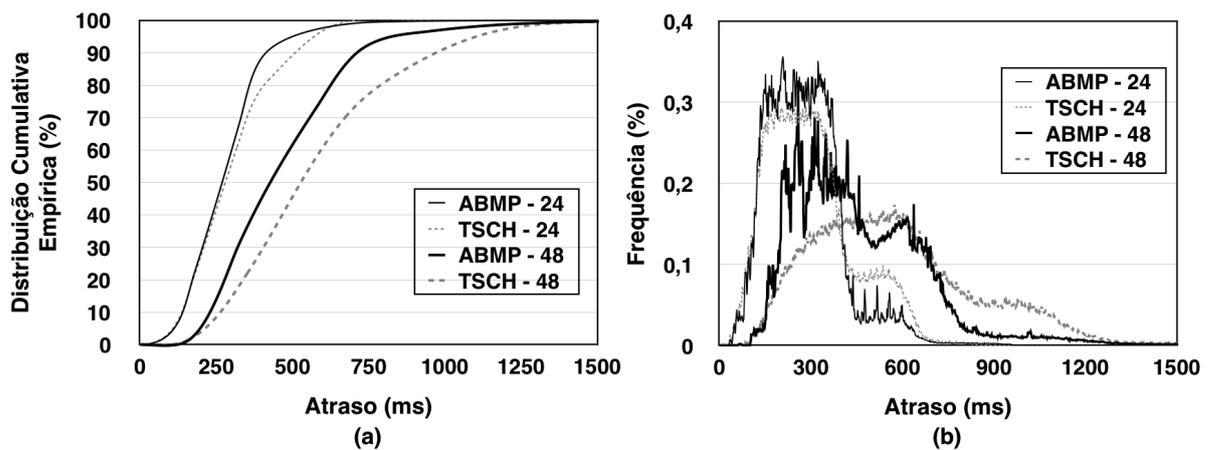


Figura 7.17 Função de distribuição cumulativa empírica (a) e o histograma (b) do atraso para redes com topologia em árvore.

que no ABMP canais melhores são utilizados para transmitir os pacotes, o atraso global do ABMP foi menor do que para o TSCH. Na rede com 24 nós finais, 96,4% dos pacotes foram entregues com atraso inferior a 560 ms para o ABMP (dois períodos de *slotframe* no ABMP) e

93,52 % dos pacotes foram entregues para o TSCH, considerando esse mesmo limite de tempo. Em ambos os protocolos, mais de 99% dos pacotes foram entregues com atraso inferior a 840 ms (três períodos de *slotframe* no ABMP).

Na rede com 48 nós finais, 62,64% dos pacotes foram entregues com um atraso menor que 500 ms para o ABMP (um período de *slotframe* no ABMP), enquanto que 44,16 % dos pacotes foram entregues para o TSCH considerando esse mesmo limite de tempo. Ao usar o ABMP, 97,16% dos pacotes foram entregues com atraso inferior a 1 s, enquanto que 91,54% dos pacotes foram entregues para o TSCH com esse limite de atraso. Assim, mesmo com o elevado número de nós finais e sem agregação de pacotes, foi possível obter uma boa qualidade de serviço para a aplicação avaliada, que transmite um pacote por segundo.

Na Figura 7.18 pode-se ver a função de distribuição cumulativa empírica do intervalo de tempo entre a recepção de dois pacotes consecutivos, para os dois protocolos avaliados. Para o cenário com 24 nós finais, em 94,07% do tempo o intervalo entre a recepção de dois pacotes foi inferior a 1,2 s para o ABMP. Ao usar TSCH, o intervalo foi menor que 1,2 s durante 81,53% do tempo. Para o cenário com 48 nós finais, em 92,98% do tempo, o intervalo entre a recepção de dois pacotes foi menor do que 1,2 s para o ABMP, enquanto que o intervalo foi inferior a 1,2 s durante 72,86% do tempo quando utilizando o TSCH.

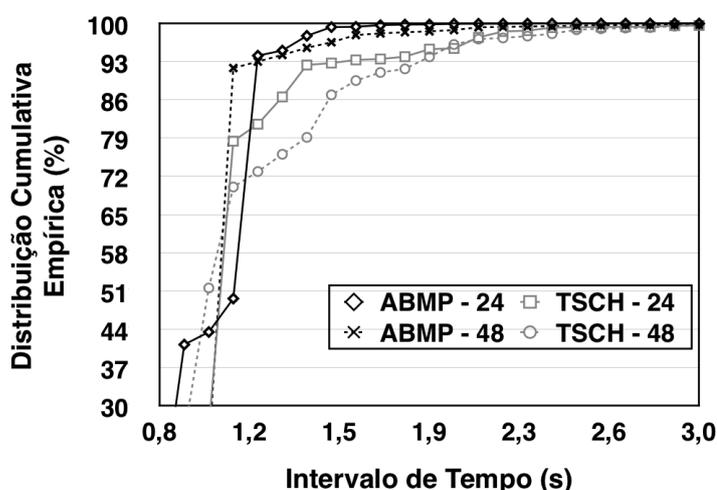


Figura 7.18 Intervalo de tempo entre a recepção de dois pacotes para redes com topologia em árvore.

A Tabela 7.3 contém o tempo máximo de desconexão para os protocolos avaliados para os cenários com 24 e 48 nós finais. Novamente é possível ver que o tempo máximo de desconexão do TSCH é muito baixo. No ABMP, mesmo considerando que o desempenho geral da rede foi significativamente maior, o tempo máximo de desconexão para um nó final individual pode ser maior devido a graves problemas na qualidade dos canais. Por exemplo, no cenário com 48 nós finais, um dos nós, em uma das replicações permaneceu cerca de 5 min desconectado da rede. No entanto, este é um caso isolado, uma vez que para este cenário, o intervalo entre a recepção de dois pacotes foi inferior a 10 s (o tempo máximo aproximado para o TSCH) durante 99,91% do tempo e inferior a 40 s durante 99,99% do tempo.

Tabela 7.5 Tempo máximo de desconexão de um nó para redes com topologia em árvore.

	ABMP	TSCH
24 nós finais	71,34 s	9,12 s
48 nós finais	302 s	10,08 s

Se mais canais fossem utilizados para o mecanismo de adaptação de canal nas sub-redes, o tempo máximo de desconexão poderia ser reduzido. Em trabalhos futuros, outras otimizações para evitar grandes tempos de desconexão no ABMP também serão estudadas, uma vez que isso pode ser proibitivo para algumas aplicações muito críticas.

Na Figura 7.19 pode-se ver a TRP na camada de aplicação para cada nó individual considerando a rede com 48 nós finais e quatro coordenadores. Nesta rede, o CP possui ID 0, os coordenadores intermediários possuem ID de 1 a 4 e os nós finais possuem ID de 5 a 52. A TRP ao usar o ABMP foi maior para quase todos os nós finais, com apenas uma exceção (o nó final 10), que foi o que possuía a maior distância para o seu coordenador intermediário (52,17 m). Para outros nós finais, posicionados também muito distantes dos coordenadores, a TRP apresentou uma alta variância para o ABMP, mas o desempenho foi ainda melhor do que o conseguido com o TSCH. Novamente, este resultado poderia ser melhor para o ABMP se mais canais fossem permitidos para as sub-redes. Como neste cenário apenas quatro canais foram alocados para o mecanismo de adaptação de canal em cada sub-rede, às vezes é difícil escolher um bom canal para um nó final específico.

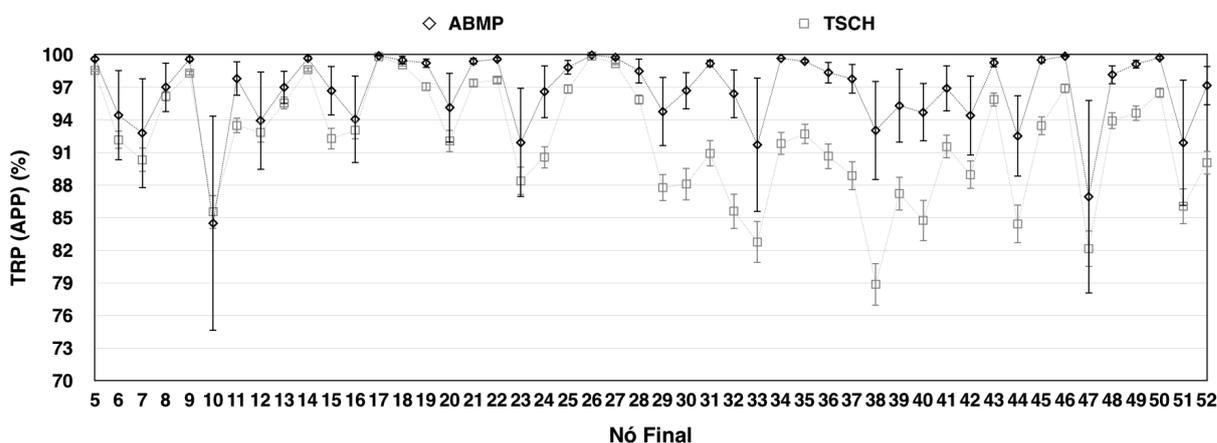


Figura 7.19 TRP na camada de aplicação para uma rede com 48 nós finais e quatro coordenadores.

Outro aspecto importante é a influência dos protocolos no consumo de energia dos nós sensores. Existem quatro razões principais para o desperdício de energia [134]: *overhearing*, colisões, escuta ociosa e a sobrecarga de pacotes de controle. Nos protocolos baseados em contenção, como o CSMA/CA, muita energia pode ser desperdiçada devido a colisões, escuta ociosa e *overhearing*, quando pacotes designados para outros nós são recebidos. Nos protocolos baseados em TDMA, os nós podem desligar o transceptor quando não estão transmitindo ou recebendo pacotes, para evitar a escuta ociosa. Com uma alocação adequada dos intervalos

de tempo, colisões e *overhearing* também podem ser evitados. Por outro lado, a sobrecarga devido aos mecanismos de sincronização utilizados em protocolos baseados em TDMA pode ser elevada, tal como em protocolos baseados em *beacons*.

Nos protocolos TSCH e ABMP, o consumo de energia depende principalmente do número de intervalos de tempo nos quais o transceptor permanece ativo. Quando os protocolos usam retransmissão de pacotes, o RNP possui grande influência no consumo de energia, uma vez que quanto maior o RNP, mais transmissões são realizadas. Para os protocolos baseados em *beacons*, como é o caso do ABMP, também deve-se levar em consideração o consumo de energia referente à recepção dos *beacons*. Nas simulações, os nós foram configurados para transmitir a uma taxa de 1 pacote/s e as replicações duraram cinco horas. Na Figura 7.20 são mostrados o número médio de intervalos de tempo em que os nós finais realizaram transmissão de pacotes (a) e o número médio de intervalos de tempo em que os nós finais aguardaram a recepção de um pacote (b), para todas as redes com topologia em árvore analisadas nesta seção. A análise considera apenas os nós finais, uma vez que nas RSSFIs os nós coordenadores podem ser instalados de forma planejada, em locais com alimentação disponível.

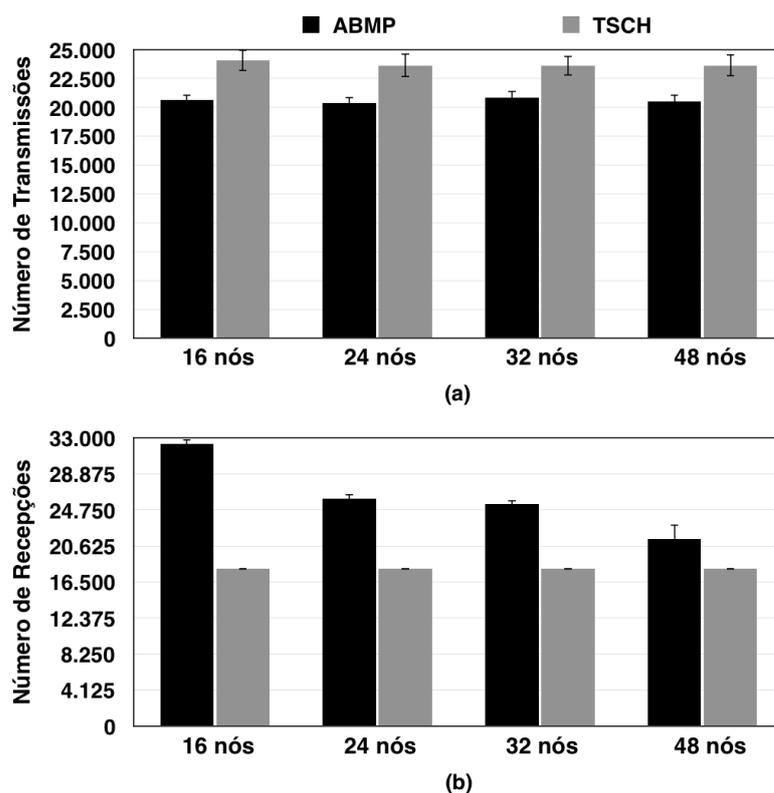


Figura 7.20 (a) Número médio de transmissões por nó. (b) Número médio de intervalos ativos para recepção de pacotes por nó.

Cada nó gerou cerca de 18.000 pacotes de dados em cada replicação. Considerando todos os cenários, os nós realizaram cerca de 13,29% mais transmissões, em média, quando estavam usando o TSCH, mas a diferença entre TCSH e ABMP foi ligeiramente menor para os cenários com quatro coordenadores.

No TSCH o número de intervalos de tempo em que os nós finais permaneceram ativos para recepção de pacotes é sempre o mesmo (~ 18.000), uma vez que no TSCH os nós finais recebem apenas os pacotes ACK relativos à primeira tentativa de transmissão, dentro do mesmo intervalo em que ocorreu a transmissão. No ABMP os nós finais precisam receber pelo menos um *beacon* transmitido a cada *multi-slotframe*. Quando o nó final realiza alguma transmissão dentro do *multi-slotframe*, em alguns casos um *beacon* adicional precisa ser recebido com o *ACK bitmap*. Considerando todos os cenários, os nós receberam cerca de 30,09% mais pacotes, em média, quando estavam usando o ABMP. No entanto, para o cenário com 48 nós finais, o percentual foi de 16,06%.

A quantidade de recepções no ABMP diminuiu significativamente para redes com mais nós finais. Em cenários com menos nós o *multi-slotframe* possui uma menor duração, o que aumenta a taxa de transmissão de *beacons*. Uma alternativa é utilizar períodos inativos no ABMP ao final de cada *slotframe*, de modo a aumentar o tamanho dos *slotframes* e reduzir a taxa de transmissão de *beacons*. Neste caso, o tamanho do *slotframe* pode ser ajustado para se adequar exatamente à taxa de transmissão de pacote dos nós, que foi o que ocorreu no cenário com 48 nós finais, em que os *slotframes* possuíam 500 ms de duração e cada nó transmitia cada pacote até duas vezes, em um período de um segundo. No entanto, ao incluir períodos inativos, embora o intervalo de tempo médio entre a recepção de dois pacotes possa ser mantido próximo ao intervalo entre duas transmissões, o atraso para entrega dos pacotes ficaria maior. Caso existam requisitos críticos de atraso; ou seja, se os pacotes gerados na camada de aplicação precisarem alcançar o receptor em um curto intervalo de tempo após uma aquisição do sensor, o uso de períodos inativos poderia ser proibitivo.

Outra possível solução para reduzir o número médio de recepções de pacote no ABMP é usar um número maior de *slotframes* por *multi-slotframe*. Nos cenários descritos neste capítulo, cada *multi-slotframe* possui oito *slotframes* ($k = 8$) e os *beacons* são transmitidos usando oito canais diferentes. Uma alternativa seria transmitir múltiplos *beacons* com cada um dos canais da lista dentro de um *multi-slotframe*, de forma intercalada, de modo a usar um valor maior de k , mantendo a lista de canais utilizados para transmitir os *beacons* com o mesmo tamanho. Isso permitiria alcançar um menor atraso, mas tornaria o mecanismo de adaptação de canal menos reativo. No entanto, como observado para os resultados com 48 nós finais, o mecanismo de adaptação de canal funcionou bem, mesmo considerando *multi-slotframes* com duração de 4 s.

Mesmo precisando receber mais pacotes, a diferença de consumo de energia entre o ABMP e o TSCH pode não ser muito grande, devido ao menor número de retransmissões no ABMP, uma vez que em geral as transmissões consomem mais energia do que as recepções de pacote. Por exemplo, de acordo com a folha de dados do transceptor utilizado nos experimentos realizados nesta tese, o MRF24J40, a corrente drenada durante as recepções é em torno de 19 mA e a corrente drenada durante as transmissões é em torno de 23 mA, considerando uma potência de transmissão de 0 dBm. Em trabalhos futuros, estudos experimentais serão realizados para investigar o consumo de energia do ABMP em plataformas reais para RSSF. Mecanismos para

realizar o planejamento automático de redes ABMP, levando em consideração os requisitos da aplicação, e buscando otimizar os aspectos envolvidos no protocolo, como confiabilidade, reatividade, atraso e consumo de energia também serão investigados.

7.4 Conclusões do Capítulo

Este capítulo apresentou um novo protocolo multicanal adaptativo, chamado ABMP, que usa a arquitetura com nós dedicados ao monitoramento de qualidade de enlace descrita no Capítulo 6. O protocolo proposto usa uma abordagem híbrida, em que foi utilizado salto em frequência para os pacotes transmitidos em *broadcast* (os *beacons*) e adaptação de canal para os pacotes de dados transmitidos em *unicast*.

Os canais utilizados para a transmissão dos pacotes de dados, bem como a lista de canais utilizados para transmitir os *beacons* são reconfigurados dinamicamente, baseado nos valores obtidos a partir da estimação em tempo real da qualidade dos enlaces. Além disso, no ABMP os nós finais não precisam receber todos os *beacons* para manter a comunicação, o que diminui a sobrecarga imposta pela recepção dos *beacons* e permite um aumento no desempenho da rede, como demonstrado por meio de estudos teóricos e de simulação.

O ABMP foi comparado com outros cinco protocolos, sendo três baseados no modo DSME, um baseado no modo TSCH, além do CSMA/CA. O ABMP superou os outros protocolos em termos de taxa de entrega de pacote, atraso e determinismo. A TRP média na camada de aplicação permaneceu perto de 100% para todos os cenários, mesmo considerando as variações na qualidade do canal ao longo do tempo. Além disso, o ABMP se mostrou mais determinístico, uma vez que não apresenta grande espalhamento na função de distribuição cumulativa empírica do atraso e nem na função de distribuição cumulativa empírica do intervalo de recepção entre dois pacotes consecutivos.

Por meio dos estudos descritos neste capítulo, pode-se observar que o uso de adaptação de canal é uma boa alternativa para alcançar grande confiabilidade na transmissão de pacotes de dados *unicast*, quando a qualidade dos enlaces é monitorada continuamente. Para os pacotes transmitidos em *broadcast* o uso de salto em frequência é uma boa solução para lidar com as variações espaciais na qualidade dos canais. Alguns aspectos ainda podem ser otimizados no ABMP, como o aumento na quantidade de canais utilizados pelas sub-redes e abordagens para reduzir o tempo máximo de desconexão, que foi a única métrica em que o ABMP apresentou desempenho pior em comparação com o TSCH. Esses pontos serão explorados em trabalhos futuros, como explicado em mais detalhes no Capítulo 8.

CAPÍTULO 8

Considerações Finais e Perspectivas de Trabalhos Futuros

Nesta tese, os desafios para a implantação de RSSFs em ambientes industriais foram apresentados e vários resultados experimentais, obtidos em ambientes industriais *indoor* e *outdoor* foram descritos. Por meio dos experimentos foi possível verificar as características do canal sem fio em ambientes industriais, que podem influenciar o desempenho das RSSFIs. Portanto, as redes precisam ser implementadas levando em consideração todos os aspectos que afetam o canal sem fio, como problemas de sombreamento, atenuação, variações espaciais na qualidade dos canais e o comportamento não estacionário do canal sem fio em longos períodos de tempo.

Foi discutida a utilização de protocolos multicanais e alocação dinâmica de canais para melhorar a qualidade de serviço das RSSFIs, permitindo que essas redes se adaptem às características dinâmicas dos canais e possam mitigar os problemas devido à interferência e aos efeitos causados pelo perfil de multipercurso do ambiente. Alguns padrões foram lançados nos últimos anos com foco em RSSFI, como o WirelessHART, o ISA100.11a e o IEEE 802.15.4e. Esses padrões, que também foram descritos na tese, implementam mecanismos de diversidade de canal (ex: salto em frequência ou adaptação de canal) para lidar com os problemas do canal sem fio em ambientes industriais.

Mesmo para esses padrões, alguns desafios ainda precisam ser enfrentados. Nos protocolos que usam salto em frequência, é necessário configurar a lista negra de forma adequada para garantir uma boa qualidade de serviço. No entanto, a lista negra geralmente é definida de forma centralizada e pode ser difícil configurar uma lista negra que proporcione boa qualidade de comunicação para toda a rede, devido às variações na qualidade dos canais. Nos protocolos que usam adaptação de canal é possível alocar canais com base nas características do canal sem fio do ponto de vista de um par de transmissor e receptor específico. No entanto, um mecanismo para estimar a qualidade dos enlaces em tempo real é necessário. A implementação dos mecanismos para configurar a lista negra em protocolos que usam salto em frequência e para estimar a qualidade dos enlaces em protocolos que usam adaptação de canal não são definidos pelo pa-

drão. Além disso, alguns protocolos são baseados na transmissão de pacotes de sincronização em *broadcast* (os *beacons*) utilizando um canal de controle. No entanto, problemas na qualidade do canal utilizado para transmitir os *beacons* podem prejudicar seriamente a qualidade de comunicação para alguns nós na rede.

Neste contexto, é necessário o desenvolvimento de soluções que permitam realizar o monitoramento da qualidade dos enlaces em tempo real sem gerar sobrecarga na aplicação principal sendo executada pela RSSFI. Também é necessário implementar protocolos adaptativos, que usam informações sobre a qualidade dos enlaces para reconfigurar os parâmetros de operação da rede de forma dinâmica. Nesta tese foi proposta uma nova arquitetura para RSSFIs, utilizando nós dedicados ao monitoramento de qualidade de enlace. Essa abordagem permite utilizar o RSSI de maneira mais efetiva para a estimação de qualidade dos canais sem sobrecarregar os nós que executam a aplicação principal, levando em consideração problemas causados pelo perfil de multipercurso do ambiente e a influência de fontes de interferência externas. Informações sobre duplicação de pacotes na rede também são utilizadas para estimar a qualidade no sentido inverso do enlace, para identificar problemas de assimetria. Por meio desta solução, nenhuma sobrecarga é imposta aos nós finais da rede e não há aumento no tráfego, diferente de outras soluções encontradas na literatura, que utilizam pacotes de diagnóstico ou incluem redundância nos pacotes. A solução proposta foi validada a partir de experimentos em um ambiente industrial real.

Baseado na nova arquitetura proposta, um novo protocolo de acesso ao meio foi desenvolvido, denominado Protocolo Adaptativo Multicanal Baseado em *Beacons* (*Adaptive and Beacon-based Multi-channel Protocol – ABMP*). O ABMP utiliza uma abordagem híbrida em que os pacotes *broadcast* são transmitidos utilizando salto em frequência, para lidar com as variações espaciais na qualidade dos canais, e os pacotes de dados *unicast* são transmitidos com adaptação de canal, em que um único canal é utilizado enquanto o enlace apresentar boa qualidade. Todos os canais utilizados na rede são alocados de forma dinâmica e adaptativa, baseado nos valores de qualidade do enlace providos pelos nós LQE. O protocolo foi avaliado e comparado com outras abordagens, que são utilizadas nos protocolos definidos nos padrões IEEE 802.15.4e, WirelessHART e ISA100.11a, por meio de estudos teóricos e de simulação. O ABMP apresentou melhor desempenho em termos de taxa de recepção de pacote, latência e determinismo em todos os cenários avaliados.

Também foi proposto um novo modelo para simulação realista de protocolos multicanais em RSSFI. Esse modelo permite a simulação de protocolos multicanais e mecanismos para alocação dinâmica de canais, considerando um ambiente de propagação realista e as características não estacionárias do canal em longos períodos de tempo. Além disso, o modelo considera a diferença entre os diferentes canais e a assimetria dos enlaces e apresentou resultados similares aos observados em experimentos realizados em ambientes industriais. O modelo de simulação foi implementado e integrado ao simulador de código aberto Castalia e o seu código foi disponibilizado para que possa ser utilizado pela comunidade acadêmica. A implemen-

tação atual do modelo para o simulador Castalia, bem como a implementação dos protocolos de acesso ao meio avaliados nesta tese podem ser obtidos a partir do seguinte endereço: <https://github.com/ruandg/Castalia-IWSN>.

8.1 Propostas de Trabalhos Futuros

As seguir são listadas algumas propostas de trabalhos futuros, que podem ser desenvolvidas tomando como base os resultados obtidos nesta tese:

- Realizar a avaliação experimental do protocolo ABMP com redes com topologia em estrela e em árvore, para verificar a sobrecarga do protocolo e o menor tamanho possível de intervalo de tempo que pode ser alcançado com plataformas reais;
- Desenvolver mecanismos para reuso de canais dentro das sub-redes, por meio de algoritmos para otimizar a implantação das redes e algoritmos dinâmicos a serem integrados ao nó LQE para permitir a reconfiguração dinâmica da lista de canais usados pelo mecanismo de adaptação de canal em cada sub-rede;
- Explorar o uso de rotas redundantes e abordagens adaptativas mais elaboradas para a transmissão dos pacotes de dados, de modo a manter boa qualidade de serviço e diminuir o tempo máximo de desconexão dos nós no ABMP;
- Desenvolver algoritmos para planejamento automático da rede, baseado em informações sobre os requisitos de cada nó sensor em termos de determinismo e confiabilidade (ex: definir qual topologia usar, quantos intervalos de tempo alocar para cada nó sensor etc);
- Explorar agregação de pacotes e uso de múltiplos transceptores no nó sorvedouro para reduzir latência;
- Estudar aspectos relacionados à segurança e tolerância a falhas em camadas superiores (ex: uso de redundância nos dispositivos e detecção de anomalias nas medições);
- Avaliar o desempenho do ABMP em diferentes tipos de ambientes industriais e para diferentes tipos de aplicações, de modo a investigar otimizações para nichos específicos de aplicações.

8.2 Lista de Publicações

A seguir são listados os artigos relacionados a este trabalho de tese que já foram publicados ou submetidos até o momento.

Artigos em Periódicos

- Gomes, R. D., Alencar, M. S., Fonseca, I. E., Lima Filho, A. C. Desafios de Redes de Sensores sem Fio Industriais. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, v. 4, p. 16–27, 2014.
- 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, p. 25–32, 2015.
- Gomes, R. D.; Queiroz, D. V., Lima Filho, A. C., Fonseca, I. E., Alencar, M. S. Real-Time Link Quality Estimation for Industrial Wireless Sensor Networks Using Dedicated Nodes. *Ad Hoc Networks*. v. 59, p. 116–133, 2017.
- Gomes, R. D., Queiroz, D. V., Fonseca, I. E., Alencar, M. S. A Simulation Model for Industrial Multi-Channel Wireless Sensor Networks. *Journal of Communication and Information Systems*, v.32, p. 29–40, 2017.
- Gomes, R. D., Gomes, E. B., Fonseca, I. E., Alencar, M. S., Benavente-Peces, C. Evaluation of Multi-Channel Communication for an Outdoor Industrial Wireless Sensor Network. *IEEE Sensors Letters* (submetido).
- Gomes, R. D., Fonseca, I. E., Alencar, M. S., Benavente-Peces, C. An Adaptive and Beacon-based Multi-Channel Protocol for Industrial Wireless Sensor Networks. *Computer Communications* (submetido).

Artigos em Congressos

- Gomes, R. D., Rocha, G. B., Lima Filho, A. C., Fonseca, I. E., Alencar, M. S. Distributed approach for channel quality estimation using dedicated nodes in industrial WSN. *IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, Washington DC., p. 1943–1948, 2014;
- Gomes, R. D., Queiroz, D. V., Fonseca, I. E., Alencar, M. S. Modelo para Simulação Realista de Redes de Sensores sem Fio Industriais. *XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Juiz de Fora, p.1–5, 2015.
- Gomes, R. D., Alencar, M. S., Queiroz, D. V., Fonseca, I. E. Evaluation of Link Quality Estimators for Industrial Wireless Sensor Networks. In: *XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, 2016, Santarém, PA. *Anais do XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, p. 1–5, 2016.
- Gomes, R. D., Alencar, M. S., Queiroz, D. V., Fonseca, I. E., Benavente-Peces, C. Comparison Between Channel Hopping and Channel Adaptation for Industrial Wireless Sensor Networks. In: *6th International Conference on Sensor Networks*, 2017, Porto. *Proceedings of 6th International Conference on Sensor Networks*, p. 1–12, 2017.

- Gomes, R. D., Queiroz, D. V., Fonseca, I. E., Alencar, M. S., Benavente-Peces, C. Mini-Curso: Redes de Sensores sem Fio Industriais. In: XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017, São Pedro, SP (proposta de mini-curso aceita).

Referências Bibliográficas

- [1] B. Lu and V. C. Gungor. “Online and Remote Motor Energy Monitoring and Fault Diagnostics Using Wireless Sensor Networks”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 4651–4659, 2009.
- [2] V. C. Gungor and H. G. P. “Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 4258–4265, 2009.
- [3] A. Lima-Filho, R. Gomes, M. Adissi, T. Borges da Silva, F. Belo and M. Spohn. “Embedded System Integrated Into a Wireless Sensor Network for Online Dynamic Torque and Efficiency Monitoring in Induction Motors”. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 17, no. 3, pp. 404–414, 2012.
- [4] M. P. Sousa and W. T. A. Lopes. “Desafios em Redes de Sensores sem Fio”. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, vol. 1, no. 1, pp. 41–47, 2011.
- [5] R. D. Gomes, M. O. Adissi, A. C. Lima-Filho, M. A. Spohn and F. Belo. “On the Impact of Local Processing for Motor Monitoring Systems in Industrial Environments Using Wireless Sensor Networks”. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2013, pp. 1–14, 2013.
- [6] E. Tanghe, W. Joseph, L. Verloock, L. Martens, H. Capoen, K. V. Herwegen and W. Vanthomme. “The Industrial Indoor Channel: Large-Scale and Temporal Fading at 900, 2400, and 5200 MHz”. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, pp. 2740–2751, 2008.
- [7] L. Tang, K.-C. Wang, Y. Huang and F. Gu. “Channel Characterization and Link Quality Assessment of IEEE 802.15.4-Compliant Radio for Factory Environments”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 3, no. 2, pp. 99–110, 2007.
- [8] P. Agrawal, A. Ahlén, T. Olofsson and M. Gidlund. “Long Term Channel Characterization for Energy Efficient Transmission in Industrial Environments”. *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 8, pp. 3004–3014, 2014.

-
- [9] N. Baccour, A. Koubâa, L. Mottola, M. A. Zúñiga, H. Youssef, C. A. Boano and M. Alves. “Radio Link Quality Estimation in Wireless Sensor Networks: A Survey”. *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 8, no. 4, pp. 34:1–34:33, 2012.
- [10] O. Gnawali, R. Fonseca, K. Jamieson, D. Moss and P. Levis. “Collection Tree Protocol”. In *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '09, pp. 1–14. ACM, 2009.
- [11] R. D. Gomes, G. B. Rocha, A. C. L. Filho, I. E. Fonseca and M. S. Alencar. “Distributed approach for channel quality estimation using dedicated nodes in industrial WSN”. In *2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, pp. 1943–1948, 2014.
- [12] P. Ferrari, A. Flammini, S. Rinaldi and E. Sisinni. “Performance Assessment of a WirelessHART Network in a Real-World Testbed”. In *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 953–957, 2012.
- [13] I. Silva, L. A. Guedes, P. Portugal and F. Vasques. “Reliability and Availability Evaluation of Wireless Sensor Networks for Industrial Applications”. *Sensors*, vol. 12, no. 1, pp. 806–838, 2012.
- [14] R. D. Gomes, I. E. Fonseca and M. S. Alencar. “Protocolos Multicanais para Redes de Sensores sem Fio Industriais”. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, vol. 5, no. 2, pp. 25–32, 2015.
- [15] S. Petersen and S. Carlsen. “Performance Evaluation of WirelessHART for Factory Automation”. In *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, pp. 1–9, 2009.
- [16] “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer”. *IEEE Std 802.15.4e-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2011)*, pp. 1–225, April 2012.
- [17] D. D. Guglielmo, S. Brienza and G. Anastasi. “IEEE 802.15.4e: A survey”. *Computer Communications*, vol. 88, pp. 1 – 24, 2016.
- [18] M. Gürsu, M. Vilgelm, S. Zoppi and W. Kellerer. “Reliable Co-Existence of 802.15.4e TSCH-based WSN and Wi-Fi in an Aircraft Cabin”. In *2016 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, pp. 663–668, May 2016.
- [19] R. D. Gomes, M. S. Alencar, D. V. Queiroz, I. E. Fonseca and C. Benavente-Peces. “Comparison Between Channel Hopping and Channel Adaptation for Industrial Wireless Sensor Networks”. In *6th International Conference on Sensor Networks*, pp. 1–12, 2017.

-
- [20] D. S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket and R. Morris. “A High-throughput Path Metric for Multi-hop Wireless Routing”. In *Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '03*, pp. 134–146. ACM, 2003.
- [21] R. Fonseca, O. Gnawali, K. Jamieson and P. Levis. “Four-Bit Wireless Link Estimation”. In *Proceedings of the Sixth ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-VI)*, 2007.
- [22] N. Baccour, A. Koubâa, H. Youssef and M. Alves. “Reliable Link Quality Estimation in Low-Power Wireless Networks and its Impact on Tree-Routing”. *Ad Hoc Networks*, vol. 27, pp. 1 – 25, 2015.
- [23] S. Rekik, N. Baccour, M. Jmaiel and K. Drira. “Low-Power Link Quality Estimation in Smart Grid Environments”. In *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp. 1211–1216, 2015.
- [24] F. Barac, S. Caiola, M. Gidlund, E. Sisinni and T. Zhang. “Channel Diagnostics for Wireless Sensor Networks in Harsh Industrial Environments”. *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 11, pp. 3983–3995, Nov 2014.
- [25] A. Willig, K. Matheus and A. Wolisz. “Wireless Technology in Industrial Networks”. *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 6, pp. 1130–1151, 2005.
- [26] A. C. Lima-Filho, E. G. dos Anjos, J. L. A. dos Santos and F. A. Belo. “Self-Powered Telemetric Torque Meter”. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 133, no. 045001, pp. 1–7, 2011.
- [27] P. Stenumgaard, J. Chilo, P. Ferrer-Coll and P. Angskog. “Challenges and Conditions for Wireless Machine-to-Machine Communications in Industrial Environments”. *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 6, pp. 187–192, 2013.
- [28] J. Ferrer-Coll, P. Angskog, J. Chilo and P. Stenumgaard. “Characterisation of Highly Absorbent and Highly Reflective Radio Wave Propagation Environments in Industrial Applications”. *IET Communications*, vol. 6, pp. 2404–2412, 2012.
- [29] H. Hou, L. and N. W. Bergmann. “Induction Motor Fault Diagnosis Using Industrial Wireless Sensor Networks and Dempster-Shafer Classifier Fusion”. In *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2992–2997, 2011.
- [30] M. Erdelj, N. Mitton and E. Natalizio. *Applications of Industrial Wireless Sensor Networks*. CRC Press, 2015/06/08 2013.
- [31] “ISA100, Wireless Systems for Automation”.
Disponível em <http://www.isa.org/isa100>. Acessado em: 10/05/2017.

-
- [32] K. Das, P. Zand and P. Havinga. “Industrial Wireless Monitoring with Energy-Harvesting Devices”. *IEEE Internet Computing*, vol. 21, no. 1, pp. 12–20, Jan 2017.
- [33] M. A. Hanson, H. C. P. Jr., A. T. Barth, K. Ringgenberg, B. H. Calhoun, J. H. Aylor and J. Lach. “Body Area Sensor Networks: Challenges and Opportunities”. *Computer*, vol. 42, no. 1, pp. 58–65, Jan 2009.
- [34] A. da Silva, R. Povinelli and N. Demerdash. “Rotor Bar Fault Monitoring Method Based on Analysis of Air-Gap Torques of Induction Motors”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 4, pp. 2274–2283, 2013.
- [35] F. Salvadori, M. de Campos, P. S. Sausen, R. F. Camargo, C. S. Gehrke, C. Rech, M. A. Spohn and A. C. Oliveira. “Monitoring in Industrial Systems Using Wireless Sensor Network With Dynamic Power Management”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, pp. 3104–3111, 2009.
- [36] E. Esfahani, S. Wang and V. Sundararajan. “Multisensor Wireless System for Eccentricity and Bearing Fault Detection in Induction Motors”. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 3, pp. 818–826, 2014.
- [37] J. Hu. “The Application of Wireless Sensor Networks to In-Service Motor Monitoring and Energy Management”. In *First International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*, pp. 165–169, 2008.
- [38] J. Hu. “In-service Motor Monitoring and Energy Management System Based on Wireless Sensor Networks”. In *International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp. 823–826, 2008.
- [39] E. Sisinni, A. Depari and A. Flammini. “Design and Implementation of a Wireless Sensor Network for Temperature Sensing in Hostile Environments”. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 237, pp. 47 – 55, 2016.
- [40] V. C. Gungor, D. Sahing, T. Kocak and S. Ergut. “A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, pp. 28 – 41, 2013.
- [41] S. A. Nikolidakis, D. Kandris, D. D. Vergados and C. Douligieris. “Energy Efficient Automated Control of Irrigation in Agriculture by Using Wireless Sensor Networks”. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 113, no. 0, pp. 154 – 163, 2015.
- [42] F. P. Correia, M. S. de Alencar, W. T. A. Lopes, M. S. de Assis and B. G. Leal. “Propagation Analysis for Wireless Sensor Networks Applied to Viticulture”. *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2017, pp. 1–10, 2017.

-
- [43] A. Gonzáles, N. Leone, M. Murdoch, P. Mazzara and J. Oreggioni. “A Wireless Sensor Network Implementation for an Industrial Environment”. In *The Argentine School of Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications*, pp. 82–86, 2010.
- [44] A. Ulusoy, O. Gurbuz and A. Onat. *Wireless Control Networks with Real-Time Constraints*. CRC Press, 2015/06/09 2013.
- [45] A. Ulusoy, A. Onat and O. Gurbuz. “Wireless Model Based Predictive Networked Control System over IEEE 802.15.4”. In *2013 IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pp. 382–387, 2013.
- [46] J. Araújo, M. Mazo, A. Anta, P. Tabuada and K. H. Johansson. “System Architectures, Protocols and Algorithms for Aperiodic Wireless Control Systems”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 1, pp. 175–184, 2014.
- [47] I. S. .TM. “Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)”, 2006.
- [48] J.-S. Lee. “Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low-Rate Wireless Personal Area Networks”. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 52, no. 3, pp. 742–749, 2006.
- [49] H. Karl and A. Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. First Edition. Wiley, 2005.
- [50] R. Soua and P. Minet. “Multichannel Assignment Protocols in Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey”. *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 16, pp. 2–21, 2015.
- [51] J. L. A. Santos, R. C. C. Araujo, A. C. Lima Filho, F. A. Belo and J. Lima. “Telemetric System for Monitoring and Automation of Railroad Networks”. *Transportation Planning and Technology*, vol. 34, pp. 593–603, 2011.
- [52] P. Cheong, K.-F. Chang, Y.-H. Lai, S.-K. Ho, I.-K. Sou and K.-W. Tam. “A ZigBee-Based Wireless Sensor Network Node for Ultraviolet Detection of Flame”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 11, pp. 5271–5277, 2011.
- [53] Z. Hanzalek and P. Jurcik. “Energy Efficient Scheduling for Cluster-Tree Wireless Sensor Networks With Time-Bounded Data Flows: Application to IEEE 802.15.4/ZigBee”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 6, no. 3, pp. 438–450, 2010.
- [54] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, M. Mutka and N. Xi. “The Evolution of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey”. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 101–120, 2013.

-
- [55] W. Guo, W. Healy and M. Zhou. “Impacts of 2.4-GHz ISM Band Interference on IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Network Reliability in Buildings”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 9, pp. 2533–2544, 2012.
- [56] F. Penna, C. Pastrone, M. Spirito and R. Garello. “Measurement-Based Analysis of Spectrum Sensing in Adaptive WSNs under Wi-Fi and Bluetooth Interference”. In *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th*, pp. 1–5, 2009.
- [57] C.-J. M. Liang, N. B. Priyantha, J. Liu and A. Terzis. “Surviving Wi-Fi Interference in Low Power ZigBee Networks”. In *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '10*, pp. 309–322. ACM, 2010.
- [58] Microchip. “MiWi Protocol”.
Disponível em <http://www.microchip.com/miwi/>. Acessado em: 21/04/2015.
- [59] R. Wagner and R. Barton. “Performance Comparison of Wireless Sensor Network Standard Protocols in an Aerospace Environment: ISA100.11a and ZigBee Pro”. In *2012 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1–14, 2012.
- [60] J. Song, S. Han, A. K. Mok and D. Chen. “WirelessHART: Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control”. In *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, pp. 377–386, 2008.
- [61] J. Frey and T. Lennvall. *Wireless Sensor Networks for Automation. In Networked Embedded Systems (Richard Zurawski)*. First Edition. CRC Press, 2009.
- [62] C. Lu, A. Saifullah, B. Li, M. Sha, H. Gonzalez, D. Gunatilaka, C. Wu, L. Nie and Y. Chen. “Real-Time Wireless Sensor-Actuator Networks for Industrial Cyber-Physical Systems”. *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 5, pp. 1013–1024, May 2016.
- [63] P. Bartolomeu, M. Alam, J. Ferreira and J. Fonseca. “Survey on Low Power Real-Time Wireless MAC Protocols”. *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 75, pp. 293 – 316, 2016.
- [64] R. Souza, P. Minet and E. Livolant. “Wave: a Distributed Scheduling Algorithm for Convergecast in IEEE 802.15.4e TSCN Networks”. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 27, no. 4, pp. 557–575, 2016. doi:10.1002/ett.2991.
- [65] P. Du and G. Roussos. “Adaptive Channel Hopping for Wireless Sensor Networks”. In *2011 International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (iCOST)*, pp. 19–23, Oct 2011.
- [66] P. Du and G. Roussos. “Spectrum-Aware Wireless Sensor Networks”. In *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 2321–2325, Sept 2013.

-
- [67] G. Alderisi, G. Patti, O. Mirabella and L. L. Bello. “Simulative Assessments of the IEEE 802.15.4e DSME and TSCH in Realistic Process Automation Scenarios”. In *2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, pp. 948–955, July 2015.
- [68] W.-C. Jeong and J. Lee. “Performance evaluation of IEEE 802.15.4e DSME MAC protocol for wireless sensor networks”. In *2012 First IEEE Workshop on Enabling Technologies for Smartphone and Internet of Things (ETSIoT)*, pp. 7–12, June 2012.
- [69] J. Lee and W. C. Jeong. “Performance Analysis of IEEE 802.15.4e DSME MAC Protocol Under WLAN Interference”. In *2012 International Conference on ICT Convergence (ICTC)*, pp. 741–746, Oct 2012.
- [70] S. Capone, R. Brama, F. Ricciato, G. Boggia and A. Malvasi. “Modeling and Simulation of Energy Efficient Enhancements for IEEE 802.15.4e DSME”. In *2014 Wireless Telecommunications Symposium*, pp. 1–6, April 2014.
- [71] I. Juc, O. Alphand, R. Guizzetti, M. Favre and A. Duda. “Energy Consumption and Performance of IEEE 802.15.4e TSCH and DSME”. In *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 1–7, April 2016.
- [72] M. Anwar, Y. Xia and Y. Zhan. “TDMA-Based IEEE 802.15.4 for Low-Latency Deterministic Control Applications”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 1, pp. 338–347, Feb 2016.
- [73] G. Patti, G. Alderisi and L. L. Bello. “Introducing Multi-level Communication in the IEEE 802.15.4e Protocol: The MultiChannel-LLDN”. In *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, pp. 1–8, Sept 2014.
- [74] G. Patti and L. L. Bello. “A Priority-Aware Multichannel Adaptive Framework for the IEEE 802.15.4e-LLDN”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6360–6370, Oct 2016.
- [75] P. Agrawal, A. Ahlen, T. Olofsson and M. Gidlund. “Characterization of Long Term Channel Variations in Industrial Wireless Sensor Networks”. In *IEEE International Conference on Communications*, pp. 1–6, 2014.
- [76] T. Olofsson, A. Ahlén and M. Gidlund. “Modeling of the Fading Statistics of Wireless Sensor Network Channels in Industrial Environments”. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 12, pp. 3021–3034, 2016.
- [77] I. F. Akyildiz, W. Lee, M. C. Vuran and S. Mohanty. “NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey”. *Computer Networks Journal*, vol. 50, pp. 2127–2159, 2006.

-
- [78] L. Bello and E. Toscano. “Coexistence Issues of Multiple Co-Located IEEE 802.15.4/ZigBee Networks Running on Adjacent Radio Channels in Industrial Environments”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 5, pp. 157–167, 2009.
- [79] J. Ferrer-Coll. “RF Channel Characterization in Industrial, Hospital and Home Environments”. Phd thesis, KTH School of Information and Communication Technology, 2012.
- [80] J. Chilo, C. Karlsson, P. Angskog and P. Stenumgaard. “EMI Disruptive Effect on Wireless Industrial Communication Systems in a Paper Plant”. In *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 221–224, 2009.
- [81] P. Angskog, C. Karlsson, J. F. Coll and P. Chilo, J. Stenumgaard. “Sources of Disturbances on Wireless Communication in Industrial and Factory Environments”. In *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 281–284, 2010.
- [82] R. Gomes, M. Spohn, A. Lima, E. Gomes dos Anjos and F. Belo. “Correlation Between Spectral Occupancy and Packet Error Rate in IEEE 802.15.4-based Industrial Wireless Sensor Networks”. *IEEE Latin America Transactions (Revista IEEE America Latina)*, vol. 10, no. 1, pp. 1312–1318, 2012.
- [83] A. Sikora and V. Groza. “Coexistence of IEEE802.15.4 With Other Systems in the 2.4 GHz-ISM-Band”. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005. IMTC 2005. Proceedings of the IEEE*, volume 3, pp. 1786–1791, 2005.
- [84] V. C. Gungor, B. Lu and H. G. P. “Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 3557–3564, 2010.
- [85] T. S. Rappaport. *Comunicações sem Fio – Princípios e Práticas*. Segunda Edição. Pearson, 2009.
- [86] M. S. Alencar, M. P. Sousa, W. J. L. Queiroz, W. T. A. Lopes and F. Madeiro. “Redes de Sensores sem Fio: Aplicações, Tendências e Desafios”. In *XII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, pp. 1–8, 2013.
- [87] A. Goldsmith. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [88] F. Barac, M. Gidlund and T. Zhang. “Scrutinizing Bit- and Symbol-Errors of IEEE 802.15.4 Communication in Industrial Environments”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 7, pp. 1783–1794, 2014.
- [89] N.-C. Wang and K. Yao. “Characterizing Fading Channel Under Abrupt Temporal Variations”. In *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 5056–5060, 2013.

-
- [90] K. A. Remley, G. Koepke, C. Holloway, Camell and G. D. “Measurements in Harsh RF Propagation Environments to Support Performance Evaluation of Wireless Sensor Networks”. *Sensor Review*, vol. 29, pp. 211–222, 2009.
- [91] R. D. Gomes, M. S. Alencar, I. E. Fonseca and A. C. Lima Filho. “Desafios de Redes de Sensores sem Fio Industriais (in Portuguese)”. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, vol. 4, no. 1, pp. 16–27, 2014.
- [92] J. Proakis. *Digital Communications*. Third Edition. McGraw-Hill, 1995.
- [93] M. Varela and M. Sanchez. “RMS Delay and Coherence Bandwidth Measurements in Indoor Radio Channels in the UHF Band”. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, pp. 515–525, 2001.
- [94] H. MacLeod, C. Loadman and Z. Chen. “Experimental Studies of the 2.4-GHz ISM Wireless Indoor Channel”. In *Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference*, pp. 63–68, 2005.
- [95] D. M. Amzucu, H. Li and E. Fledderus. “Indoor Radio Propagation and Interference in 2.4 GHz Wireless Sensor Networks: Measurements and Analysis”. *Wireless Personal Communications*, vol. 76, pp. 245–269, 2014.
- [96] L.-O. Varga, M. Heusse, R. Guizzetti and A. Duda. “Why is Frequency Channel Diversity so Beneficial in Wireless Sensor Networks?” In *IFIP Wireless Days*, Toulouse, France, 2016. IFIP.
- [97] T. Watteyne, S. Lanzisera, A. Mehta and K. S. J. Pister. “Mitigating Multipath Fading through Channel Hopping in Wireless Sensor Networks”. In *2010 IEEE International Conference on Communications*, pp. 1–5, 2010.
- [98] A. Gongga, O. Landsiedel, P. Soldati and M. Johansson. “Revisiting Multi-channel Communication to Mitigate Interference and Link Dynamics in Wireless Sensor Networks”. In *2012 IEEE 8th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, pp. 186–193, 2012.
- [99] M. Sha, G. Hackmann and C. Lu. “ARCH: Practical Channel Hopping for Reliable Home-Area Sensor Networks”. In *2011 17th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, pp. 305–315, 2011.
- [100] O. D. Incel. “A survey on Multi-Channel Communication in Wireless Sensor Networks”. *Computer Networks*, vol. 55, no. 13, pp. 3081–3099, 2011.
- [101] L. H. Correia, T.-D. Tran, V. N. Pereira, J. C. Giacomini and J. M. S. Silva. “DynMAC: A Resistant MAC Protocol to Coexistence in Wireless Sensor Networks”. *Computer Networks*, vol. 76, pp. 1 – 16, 2015.

-
- [102] Y. Wu, J. Stankovic, T. He and S. Lin. “Realistic and Efficient Multi-Channel Communications in Wireless Sensor Networks”. In *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*, pp. –, 2008.
- [103] X. Wang, X. Wang, X. Fu, G. Xing and N. Jha. “Flow-Based Real-Time Communication in Multi-Channel Wireless Sensor Networks”. In *Proceedings of the 6th European Conference on Wireless Sensor Networks, EWSN '09*, pp. 33–52. Springer-Verlag, 2009.
- [104] J. Ansari and P. Mähönen. “Channel Selection in Spectrum Agile and Cognitive MAC Protocols for Wireless Sensor Networks”. In *Proceedings of the 8th ACM International Workshop on Mobility Management and Wireless Access*, pp. 83–90, 2010.
- [105] J. Ko and A. Mishra. “DynaChannAl: Dynamic Channel Allocation with Minimal End-to-End Delay for Two-tier Wireless Sensor Networks”. *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 13, no. 16, pp. 1482–1497, 2012.
- [106] A. Saifullah, Y. Xu, C. Lu and Y. Chen. “Distributed Channel Allocation Protocols for Wireless Sensor Networks”. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 25, no. 9, pp. 2264–2274, 2014.
- [107] M. Yigit, O. D. Incel and V. C. Gungor. “On the Interdependency Between Multi-Channel Scheduling and Tree-based Routing for WSNs in Smart Grid Environments”. *Computer Networks*, vol. 65, no. 0, pp. 1 – 20, 2014.
- [108] O. Incel, A. Ghosh, B. Krishnamachari and K. Chintalapudi. “Fast Data Collection in Tree-Based Wireless Sensor Networks”. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, no. 1, pp. 86–99, 2012.
- [109] A. Bildea, O. Alphand, F. Rousseau and A. Duda. “Link Quality Metrics in Large Scale Indoor Wireless Sensor Networks”. In *IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1888–1892, 2013.
- [110] W. Ikram, S. Petersen, P. Orten and N. F. Thornhill. “Adaptive Multi-Channel Transmission Power Control for Industrial Wireless Instrumentation”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, pp. 978–990, 2014.
- [111] K. Benkic, M. Malajner, P. Planinsic and Z. Cucej. “Using RSSI Value for Distance Estimation in Wireless Sensor Networks based on ZigBee”. In *15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing*, pp. 303–306, 2008.
- [112] C. Noda, S. Prabh, M. Alves, C. A. Boano and T. Voigt. “Quantifying the Channel Quality for Interference-aware Wireless Sensor Networks”. *SIGBED Rev.*, vol. 8, no. 4, pp. 43–48, 2011.

-
- [113] S. Zacharias, T. Newe, O. Sinead and E. Lewis. “2.4 GHz IEEE 802.15.4 Channel Interference Classification Algorithm Running Live on a Sensor Node”. In *2012 IEEE Sensors*, pp. 1–4, 2012.
- [114] Z. Jindong, W. Shuanhu, M. Chunxiao, F. Baode and L. Yunhong. “Study and Prediction of Wireless Link Quality for Adaptive Channel Hopping”. *Journal of Networks*, vol. 7, no. 11, pp. 1884–1891, 2012.
- [115] M. Eskola and T. Heikkilä. “Classification of Radio Channel Disturbances for Industrial Wireless Sensor Networks”. *Ad Hoc Networks*, vol. 42, pp. 19 – 33, 2016.
- [116] F. Entezami, M. Tuncliffe and C. Politis. “Find the Weakest Link: Statistical Analysis on Wireless Sensor Network Link-Quality Metrics”. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 9, no. 3, pp. 28–38, Sept 2014.
- [117] C. Vallati, E. Ancillotti, R. Bruno, E. Mingozzi and G. Anastasi. “Interplay of Link Quality Estimation and RPL Performance: An Experimental Study”. In *Proceedings of the 13th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, & Ubiquitous Networks*, PE-WASUN ’16, pp. 83–90. ACM, 2016.
- [118] V. C. Gungor and M. K. Korkmaz. “Wireless Link-Quality Estimation in Smart Grid Environments”. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 8, no. 2, pp. 214068, 2012.
- [119] Z. Q. Guo, Q. Wang, M. H. Li and J. He. “Fuzzy Logic Based Multidimensional Link Quality Estimation for Multi-Hop Wireless Sensor Networks”. *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 10, pp. 3605–3615, Oct 2013.
- [120] S. Rekik, N. Baccour, M. Jmaiel and K. Drira. “Holistic Link Quality Estimation-based Routing Metric for RPL Networks in Smart Grids”. In *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1–6, Sept 2016.
- [121] W. Du, D. Navarro and F. Mieleve. “Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 Sensor Networks in Industrial Applications”. *International Journal of Communication Systems*, vol. 28, no. 10, pp. 1657–1674, July 2015.
- [122] F. Barac, K. Yu, M. Gidlund, J. Akerberg and M. Bjorkman. “Towards Reliable and Lightweight Communication in Industrial Wireless Sensor Networks”. In *IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics*, pp. 1218–1224, July 2012.
- [123] Castalia. “Castalia Simulator”.
Disponível em <https://github.com/boulis/Castalia>. Acessado em: 07/03/2017.

-
- [124] T. Chamberlains. *Learning Omnet++*. First Edition. Packt Publishing, 2013.
- [125] A. Leon-Garcia. *Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering*. Terceira Edição. Pearson, 2008.
- [126] IT++. “IT++ Library 4.3.1”.
Disponível em <http://itpp.sourceforge.net/4.3.1/>. Acessado em: 07/03/2017.
- [127] L. Hou and N. Bergmann. “Novel Industrial Wireless Sensor Networks for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 10, pp. 2787–2798, 2012.
- [128] R. Kulkarni, A. Forster and G. Venayagamoorthy. “Computational Intelligence in Wireless Sensor Networks: A Survey”. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 13, pp. 68–96, 2010.
- [129] S. Haykin. *Redes Neurais: Princípios e Práticas*. Second Edition. Bookman, 2001.
- [130] K. Srinivasan, P. Dutta, A. Tavakoli and P. Levis. “An Empirical Study of Low-power Wireless”. *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 6, no. 2, pp. 16:1–16:49, March 2010.
- [131] J. Huang, G. Xing, G. Zhou and R. Zhou. “Beyond co-existence: Exploiting WiFi White Space for Zigbee Performance Assurance”. In *18th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*, pp. 305–314, 2010.
- [132] A. Flammini, D. Marioli, E. Sisinni and A. Taroni. “Design and Implementation of a Wireless Fieldbus for Plastic Machineries”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 747–755, 2009.
- [133] P. Bartolomeu, M. Alam, J. Ferreira and J. Fonseca. “Implementation and Analysis of Wireless Flexible Time-Triggered Protocol”. *Ad Hoc Networks*, vol. 58, pp. 36 – 53, 2017. Hybrid Wireless Ad Hoc Networks.
- [134] G. Franchino and G. Buttazzo. “A Power-Aware MAC Layer Protocol for Real-Time Communication in Wireless Embedded Systems”. *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 82, pp. 21 – 34, 2017.
- [135] P. K. Sahoo, S. R. Pattanaik and S.-L. Wu. “A Novel IEEE 802.15.4e DSME MAC for Wireless Sensor Networks”. *Sensors*, vol. 17, no. 1, 2017.
- [136] Y. Serizawa, R. Fujiwara, T. Yano and M. Miyazaki. “Reliable Wireless Communication Technology of Adaptive Channel Diversity (ACD) Method Based on ISA100.11a Standard”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 1, pp. 624–632, Jan 2017.

- [137] *IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. 2006.
- [138] U. Colesanti and S. Santini. “The Collection Tree Protocol for the Castalia Wireless Sensor Networks Simulator”. Technical report, ETH Zurich, June 2011.