

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

**JEAN MICHEL WINTER**

**Método de Seleção de Canais baseado em Sensoriamento  
Espectral Distribuído para Redes Wireless *HART***

Porto Alegre

2017

**JEAN MICHEL WINTER**

**Método de Seleção de Canais baseado em Sensoriamento  
Espectral Distribuído para Redes WirelessHART**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Controle e Automação.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira

Porto Alegre

2017

JEAN MICHEL WINTER

## **Método de Seleção de Canais baseado em Sensoriamento Espectral Distribuído para Redes WirelessHART**

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

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS

Doutor pela Universidade de Stuttgart, Stuttgart, Alemanha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Adrião Duarte Doria Neto, UFRN

Doutor pelo Instituto Politécnico Nacional de Toulouse – Toulouse, França

Prof. Dr. Dennis Brandão, USP

Doutor pela Universidade do Estado de São Paulo - São Carlos, Brasil

Prof. Dr. Edison Pignaton de Freitas, UFRGS

Doutor pela Universidade de Halmstad – Halmstad, Suécia

Prof. Dr. João César Netto, UFRGS

Doutor pela Universidade Católica da Lovaina – Lovaina, Bélgica

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Valner Brusamarello

Porto Alegre, Agosto de 2017.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha família, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Ao Professor Carlos Eduardo Pereira, pelo apoio, incentivo e oportunidades de desenvolvimento dentro do grupo de pesquisa.

Ao Professor Ivan Muller e aos colegas do PPGEE pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

À Patrícia Santander Garcia, pelo companheirismo, incentivo e apoio nos principais desafios durante esta jornada.

À CAPES pela provisão da bolsa de doutorado.

Aos meus pais e familiares que me apoiaram durante esta jornada.

## **ABSTRACT**

Wireless sensor networks have been expanding rapidly in many applications for different areas such as residential, office and industrial. Wireless connections bring many advantages as installation feasibility, scalability, mobility and reduce infrastructure costs. However, wireless network performance is affected by many factors as, for example, environment characteristics and other wireless communication technologies at the same coverage area. The wireless communication resources are limited and many times shared, allowing interferences from different kind of electromagnetic sources. This work presents a solution for an efficient use of the wireless communication network resources, investigate and propose adaptive methods for an industrial wireless network, the WirelessHART protocol, using dynamic mechanisms of spectrum sensing and channel selection between the devices. A protocol spectrum management architecture based on distributed sensing and monitoring of communications performance is presented, in compliance with WirelessHART protocol, allowing the classification of a set of specific channels between peer devices during the communication network's operation. Also, it is presented the channel selection performance for IEEE 802.11 interference.

**Keywords: Wireless sensor networks, Spectrum Sensing, Industrial protocols, WirelessHART**

## RESUMO

Redes de sensores sem fio tem ganhado grande destaque em diferentes aplicações, tais como, domésticas, comercial e industrial, trazendo mais flexibilidade e mais conveniência em nossas vidas. Entretanto, seu desempenho é influenciado por diversos fatores como, por exemplo, características do ambiente de propagação das ondas de rádio e outras tecnologias de comunicação sem fio que podem coexistir em uma mesma área de cobertura. Os recursos utilizados nas comunicações sem fio são limitados e muitas vezes não exclusivos possibilitando interferências provenientes de diferentes tipos de fontes. O presente trabalho busca soluções para o uso mais eficiente dos recursos da rede de comunicação sem fio, são investigados e propostos métodos adaptativos para uma rede sem fio industrial, o protocolo *WirelessHART*, utilizando mecanismos dinâmicos de sensoriamento de espectro e seleção de canal entre os dispositivos da rede. É apresentada uma arquitetura de gerenciamento do espectro em conformidade com o protocolo, baseado em sensoriamento do espectro distribuído e no monitoramento do desempenho das comunicações. A arquitetura utilizada permite a classificação de um conjunto de canais específicos entre os pares de dispositivos durante a operação da rede de comunicação. O trabalho demonstra o desempenho dos mecanismos desenvolvidos para a detecção de interferências com redes do tipo IEEE 802.11.

**Palavras-chave:** Redes de sensores sem fio, Sensoriamento do espectro, Protocolos Industriais, *WirelessHART*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>TEORIA .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>REDES DE COMUNICAÇÃO SEM FIO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Redes fixas .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Redes de acesso móvel .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Redes ad hoc .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Redes de Sensores sem Fio .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>RUÍDO E INTERFERÊNCIA .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.1</b>	<b>ZigBee .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.2</b>	<b>WirelessHART .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.3</b>	<b>WIA-PA .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.4</b>	<b>ISA100.11a .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Comentários .....</b>	<b>28</b>
<b>2.4</b>	<b>TECNOLOGIA WIRELESSHART .....</b>	<b>31</b>
<b>2.4.1</b>	<b>WirelessHART e o Modelo OSI .....</b>	<b>32</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Mecanismos de Coexistência WirelessHART .....</b>	<b>37</b>
2.4.2.1	Arquitetura Centralizada e Acesso ao Meio .....	37
2.4.2.2	Avaliação do Canal Ocupado .....	38
2.4.2.3	ARQ (Automatic Repeat Request) .....	39
2.4.2.4	Salto de Canais .....	39
2.4.2.5	Lista Proibida de Canais .....	40
2.4.2.6	Rede do tipo malha .....	41
2.4.2.7	Baixo Ciclo de Trabalho .....	42
2.4.2.8	Modulação .....	43
<b>2.5</b>	<b>RÁDIOS COGNITIVOS .....</b>	<b>43</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Dimensões de Sensoriamento .....</b>	<b>46</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Métodos de Sensoriamento de Espectro .....</b>	<b>47</b>
2.5.2.1	Filtro Combinado .....	47
2.5.2.2	Sensoriamento baseado na forma da onda .....	48
2.5.2.3	Sensoriamento baseado em ciclo-estacionário .....	48
2.5.2.4	Sensoriamento por detecção de energia .....	49
2.5.2.5	Identificação por rádio .....	50
2.5.2.6	Outros métodos .....	51
<b>3</b>	<b>ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1</b>	<b>WIRELESSHART E COEXISTÊNCIA EM REDES SEM FIO .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Comentários .....</b>	<b>58</b>
<b>3.2</b>	<b>TRABALHOS COM O WIRELESSHART .....</b>	<b>59</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Comentários .....</b>	<b>65</b>
<b>3.3</b>	<b>REDES COGNITIVAS EM APLICAÇÕES INDUSTRIAIS .....</b>	<b>66</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Comentários .....</b>	<b>73</b>
<b>4</b>	<b>WIRELESSHART COM SELEÇÃO DE CANAIS .....</b>	<b>75</b>
<b>4.1</b>	<b>SENSORIAMENTO ESPECTRAL NO WIRELESSHART .....</b>	<b>77</b>

<b>4.1.1 Recursos Utilizados no WirelessHART .....</b>	<b>77</b>
4.1.1.1 Uso do espectro de frequência.....	80
4.1.1.2 Uso de espaços no tempo .....	80
4.1.1.3 Análise de distribuição de recursos .....	81
<b>4.1.2 Requisitos de Hardware.....</b>	<b>83</b>
<b>4.1.3 Sensoriamento de Espectro no WirelessHART .....</b>	<b>84</b>
<b>4.1.4 Arquitetura Proposta .....</b>	<b>89</b>
<b>4.1.5 Detecção de Energia no WH.....</b>	<b>92</b>
<b>4.1.6 Métricas da camada física e MAC .....</b>	<b>93</b>
<b>4.1.7 Aplicação e métricas no WH.....</b>	<b>95</b>
<b>4.2 APLICAÇÃO DE ANÁLISES, ABORDAGENS ESTATÍSTICAS E PREDIÇÃO .....</b>	<b>98</b>
<b>4.2.1 Comunicação gateway WH.....</b>	<b>100</b>
<b>4.2.2 Identificação da rede WH .....</b>	<b>105</b>
<b>4.2.3 Sensoriamento.....</b>	<b>105</b>
<b>4.2.4 Análise .....</b>	<b>105</b>
<b>4.2.5 Decisão .....</b>	<b>109</b>
<b>4.2.6 Adaptação.....</b>	<b>110</b>
<b>4.2.7 Comentários .....</b>	<b>110</b>
<b>5 MÉTODOS E MATERIAIS .....</b>	<b>111</b>
<b>5.1 FERRAMENTAS DE SOFTWARE.....</b>	<b>111</b>
<b>5.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....</b>	<b>111</b>
<b>5.3 ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>113</b>
<b>5.3.1 Parâmetros de Interferência do IEEE 802.11 .....</b>	<b>115</b>
<b>5.3.2 Procedimentos do Ensaio - Condições do Ambiente .....</b>	<b>116</b>
<b>6 RESULTADOS .....</b>	<b>118</b>
<b>6.1 TOPOLOGIA DA REDE.....</b>	<b>118</b>
<b>6.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO DISPOSITIVO DE CAMPO 2.....</b>	<b>118</b>
<b>6.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO DISPOSITIVO DE CAMPO 5.....</b>	<b>134</b>
<b>6.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS DISPOSITIVOS DE CAMPO 2 E 5 .....</b>	<b>143</b>
<b>6.4.1 Comentários e Discussões .....</b>	<b>146</b>
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>149</b>
<b>8 TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>152</b>
<b>8.1 ADAPTAÇÃO DA REDE WH.....</b>	<b>152</b>
<b>8.2 MÉTODOS DE APRENDIZADO .....</b>	<b>153</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>154</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Taxonomia de redes sem fio. (KUMAR, 2008).....	19
Figura 2. Exemplo de rede <i>WirelessHART</i> .....	32
Figura 3. Modelo OSI e o padrão WH. (CHEN, 2010).....	33
Figura 4. Estrutura da DLPDU WH. (HCF, 2008).....	34
Figura 5. Espaço de tempo para envio e recebimento de mensagens (timeslot). O tempo de execução do CCA é de 128 $\mu$ s.....	39
Figura 6 . Exemplo de salto de canais em uma rede WH. Ocorre a troca de canal para cada mensagem enviada.....	40
Figura 7. a) Rede <i>WirelessHART</i> com rodas diretas para o gateway. b) Rotas alternativas. ....	42
Figura 8 . Ciclo cognitivo (WANG, 2011).....	45
Figura 9. Dimensões do espectro de rádio. (Adaptado de YUCEK, 2009).....	47
Figura 10. Principais métodos de sensoriamento de espectro, relação entre precisão e complexidade. (YUCEK, 2009). ....	51
Figura 11. Perda de pacotes e latência gerada no WH por interferencia IEEE802.11. (PETERSEN, 2009).....	53
Figura 12. Confiabilidade no WH com interferência de jamming. (PETERSEN, 2009).....	54
Figura 13. Taxa de erro de pacotes para o WH e o IEEE802.15.4. (DOMINICS, 2009). ....	57
Figura 14. Arquitetura proposta em (FERRARI, 2009). ....	62
Figura 15. Ciclo do método adaptativo de canais para redes <i>WirelessHART</i> . ....	77
Figura 16. Relação entre <i>superframe</i> e as conexões.....	78
Figura 17 . Ciclo do <i>superframe</i> de 1024 espaços de tempo.....	82
Figura 18. Ilustração do problema do usuário escondido, relacionado a sensoriamento de espectro limitado por região. (ARSLAN, 2007).....	86
Figura 19. Exemplo de arquitetura que considera a inserção de um dispositivo exclusivo para sensoriamento da rede.....	86
Figura 20. Exemplo de arquitetura com o uso de múltiplos rádios embarcados nos dispositivos de campo da rede. ....	87
Figura 21. Arquitetura que não altera os dispositivos utilizados tradicionalmente em uma rede WH.....	88
Figura 22. Máquina de estado TDMA proposta. Inclui a característica do sensoriamento de espectro integrado no WH. (WINTER, 2014).....	91
Figura 23. Indicadores de desempenho da comunicação. Lado esquerdo ilustra situação atual, lado direito ilustra proposta neste trabalho. ....	94
Figura 24. Proposta da Camada MAC da pilha <i>WirelessHART</i> . Inclusão de mecanismos para registro de falhas de comunicação associados aos canais e vizinhos. ....	97
Figura 25. Proposta de arquitetura de análise de espectro.....	99
Figura 26. Fluxograma do algoritmo proposto para implementação de salto de canais adaptativo no WH. ....	100
Figura 27. Frame Hart sobre UDP.....	101
Figura 28. Exemplo de troca de mensagens entre aplicação coordenadora e gateway WH...	104

Figura 29. Diagrama de sequência para a comunicação da aplicação com os elementos da rede WH.....	105
Figura 30. Limiar de interferência tolerável (do IEEE802.11) para corromper pacotes (IEEE802.15.4).....	107
Figura 31. Dispositivos de campo WH.....	111
Figura 32. Gateway comercial WH.....	112
Figura 33. Distribuição dos dispositivos WH.....	113
Figura 34. Ilustração das diferentes regiões quanto ao SIR.....	114
Figura 35. Frequências utilizadas (a) WH e (b) IEEE 802.11.....	116
Figura 36. Monitoramento do espectro (FieldFox).....	116
Figura 37. Distribuição dos dispositivos WH e zona de maior interferência.....	117
Figura 38. Topologia de rede WH.....	118
Figura 39. Dispositivo de campo 2 e seus respectivos vizinhos.....	119
Figura 40. Variação do limiar de energia e mapa de classificação de canais (Dispositivo 2 para 4).....	120
Figura 41. Relação de pacotes perdidos por canal e vizinho (2 para o 4).....	121
Figura 42. Desempenho do sensoriamento de espectro dos canais utilizados do Dispositivo 2 para o 4 e resposta da variação de limiar de energia.....	122
Figura 43. Desempenho do classificador de canais (dispositivo 2 para 4).....	124
Figura 44. Variação do limiar de energia e mapa de classificação de canais (Dispositivo 2 para 5).....	125
Figura 45. Desempenho do sensoriamento de espectro dos canais utilizados do Dispositivo 2 para o 5 e resposta da variação de limiar de energia.....	126
Figura 46. Desempenho do classificador de canais (dispositivo 2 para 5).....	127
Figura 47. Variação do limiar de energia e mapa de classificação de canais (Dispositivo 2 para 1).....	129
Figura 48. Relação de pacotes perdidos por canal e vizinho (2 para o 1).....	130
Figura 49. Desempenho do sensoriamento de espectro dos canais utilizados do Dispositivo 2 para o 1 e resposta da variação de limiar de energia.....	131
Figura 50. Desempenho do classificador de canais (dispositivo 2 para 1).....	132
Figura 51. Comparação de variação do limiar de energia do dispositivo 2 para os seus diferentes vizinhos, registrando o desempenho do canal 13.....	133
Figura 52. Variação do limiar de energia e mapa de classificação de canais (Dispositivo 5 para 1).....	135
Figura 53. Relação de pacotes perdidos por canal e vizinho (5 para o 1).....	136
Figura 54. Desempenho do sensoriamento de espectro dos canais utilizados do Dispositivo 5 para o 1 e resposta da variação de limiar de energia.....	137
Figura 55. Desempenho do classificador de canais (dispositivo 5 para 1).....	138
Figura 56. Variação do limiar de energia e mapa de classificação de canais (Dispositivo 5 para 2).....	139
Figura 57. Relação de pacotes perdidos por canal e vizinho (5 para o 2).....	140
Figura 58. Desempenho do sensoriamento de espectro dos canais utilizados do Dispositivo 5 para o 2 e resposta da variação de limiar de energia.....	141
Figura 59. Desempenho do classificador de canais (dispositivo 5 para 2).....	142
Figura 60. Desempenho do método de classificação dos canais WH entre pares de dispositivos (Dispositivo 2 para o 1).....	143
Figura 61. Desempenho do método de classificação dos canais WH entre pares de dispositivos (Dispositivo 5 para o 1).....	144
Figura 62. Desempenho do método de classificação dos canais WH entre pares de dispositivos (Dispositivo 5 para o 1).....	145

Figura 63. Desempenho do método de classificação dos canais WH entre pares de dispositivos  
(Dispositivo 5 para o 2). ..... 146

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação entre os protocolos WIA-PA, <i>WirelessHART</i> e ISA100.11a. (LIANG, 2011). .....	30
Tabela 2. Tabela de conexões a para um dispositivo em uma rede <i>WirelessHART</i> .....	80
Tabela 3: Tipo de Mensagem. ....	101
Tabela 4: Identificador de Mensagem. ....	101
Tabela 5: Dados de requisição HART sobre UDP. ....	102
Tabela 6: Dados de Resposta HART sobre UDP. ....	103
Tabela 7. Equipamentos utilizados. ....	112
Tabela 8 . Relação de parâmetros utilizados no ds dispositivos de campo. ....	115

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ASN: Absolut Slot Number

CCA: Clear Channel Assessment

CDMA: Code Division Multiple Access

CIWA: Chinese Industrial Wireless Alliance

CSMA: Carrier Sense Multiple Access

DLPDU: Data Link Protocol Data Unit

DSSS: Direct Spread Spectrum Sequence

GCAR: Grupo de Controle, Automação e Robótica

GSM: Global System for Mobile

IEC: International Electrotechnical Commission

ISM: Industrial Scientific and Medical

IWLAN: Industrial Wireless Local Area Network

LAN: Local Area Network

LLC: Logical Link Control

LQI: Link Quality Indicator

MAC: Medium Access Control

PER: Packet Error Rate

PLR: Packet Loss Rate

RC: Rádio Cognitivo

SDR: Software Defined Radio

SIR: Signal to Interference Ratio

SNR: Signal Noise to Ratio

TDMA: Time Division Multiple Access

UWB: Ultra Wide Band

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

WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave

WLAN: Wireless Local Area Network

WH: *WirelessHART*

WPAN: Wireless Personal Area Network

## 1 INTRODUÇÃO

Facilidade de instalação, escalabilidade, mobilidade e redução de custos de infraestrutura são algumas das vantagens de redes de comunicação sem fio, quando comparadas às infraestruturas baseadas em cabos. Tecnologias de comunicação sem fio têm sido incorporadas em diferentes dispositivos e aplicações nas últimas décadas, os benefícios promovidos por tais tecnologias têm aumentado ainda mais a demanda por comunicação sem fio. Pela necessidade de sistemas de comunicação adequados, diferentes padrões foram lançados nos últimos anos, tais como, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, UWB e outros. Setores críticos, que exigem confiabilidade nas comunicações, como o setor industrial, também têm buscado soluções dentro deste contexto. Redes de comunicação sem fio em aplicações industriais são geralmente instaladas em ambientes severos e com muito ruído, normalmente cercado por infraestrutura densa de metais, movimentação frequente de grandes equipamentos e outras condições de mudança, além de numerosas fontes de rádio frequência e interferência eletromagnética. As características do ambiente industrial impõem critérios mais rigorosos quando comparado com as aplicações tradicionais baseadas em infraestruturas de cabos. Tecnologias, como o *WirelessHART* (WH), ISA100.11a e o WIA-PA, são padrões de comunicação desenvolvidos recentemente para atender os requisitos da indústria. Estes padrões são baseados em uma banda de frequência largamente utilizada, o 2.4GHz, que é usualmente utilizado em aplicações de redes locais e é umas das faixas ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*), estabelecido pela União Internacional de Telecomunicação, possui algumas vantagens, como, por exemplo, a regulamentação livre de uso em nível mundial.

Uma das grandes preocupações relacionada à comunicação sem fio está na possibilidade de interferências, que pode causar danos à qualidade de comunicação e, no caso da indústria, perdas no processo de produção. Interferências externas têm um grande impacto

no desempenho de redes de sensores sem fio, aumentando a taxa de perda de pacotes, o número de retransmissões e, conseqüentemente, a latência da rede.

O padrão *WirelessHART*, o primeiro dos padrões de comunicação sem fio certificado para aplicação em automação de processos, inclui vários recursos para fornecer comunicação confiável em ambientes industriais. O padrão WH usa técnicas de espalhamento espectral, salto de canais, redundância de transmissão, rotas alternativas, entre outras características. Entretanto, apesar dos recursos empregados o padrão não incorpora nenhum mecanismo de predição ou mesmo de seletividade quanto ao uso dos recursos da rede. Em paralelo, novos conceitos de rádios são introduzidos, como o de Rádios Cognitivos (RC), possibilitando o surgimento de uma nova geração de redes de comunicação sem fio, capaz de utilizar o espectro de forma mais eficiente. Os conceitos de RC buscam a mudança dinâmica dos parâmetros de transmissão do rádio de acordo com as interações do ambiente no qual ele opera, com o objetivo de quebrar o paradigma de coexistência "egoísta" entre diferentes padrões de comunicação, onde não existe preocupação em adaptação com comunicações concorrentes, apenas o uso de mecanismos de proteção e tolerância a interferências.

A adoção em larga escala de redes de comunicação industriais em plantas e áreas de processos deve estar alinhada com o desenvolvimento de métodos e ferramentas de predição de conectividade, podendo ser utilizado para certificar a qualidade ou confiabilidade do fluxo de informações em redes industriais. A predição de conectividade deve contar com a possibilidade de coexistência entre tecnologias de rádio e propagação heterogênea.

A proposta desta tese consiste no estudo e desenvolvimento de métodos que possibilitem condições de adaptação de redes de comunicação sem fio industriais quanto à uma melhor utilização do espectro, baseado nas condições do ambiente. A proposta é embasada na tecnologia *WirelessHART*, e busca introduzir uma arquitetura utilizando um conjunto de novos mecanismos que permitam descobrir de forma distribuída os melhores

recursos da rede, para cada dispositivo da rede, possibilitando a coexistência efetiva, por meio da seleção de canais com outros dispositivos que também realizam comunicação em uma mesma área de cobertura.

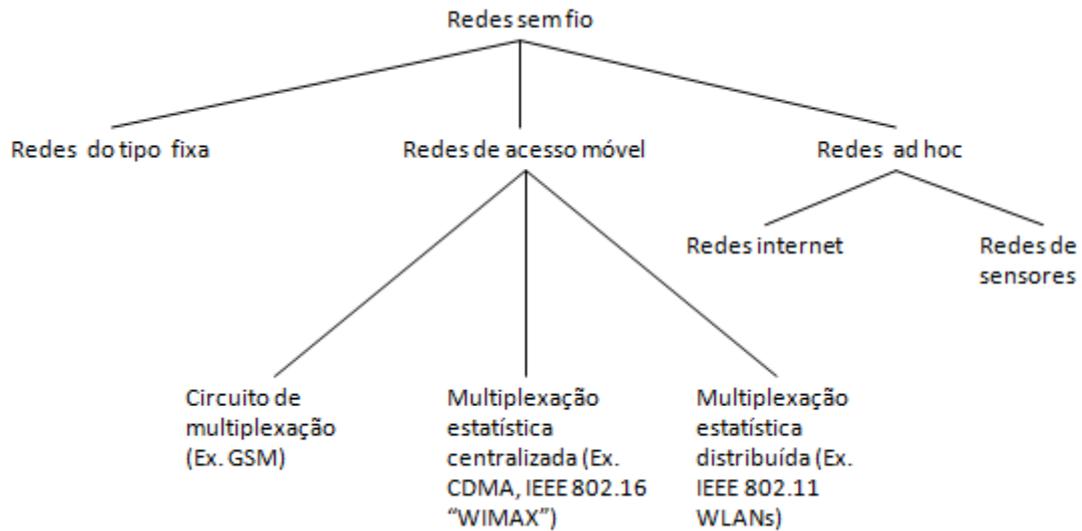
O trabalho é estruturado como segue: no Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica e que serve de embasamento para a compreensão do trabalho, incluindo neste capítulo uma análise dos principais protocolos de comunicação que concorrem com o WH, assim como uma visão geral do protocolo WH. No Capítulo 3 é apresentado o estado da arte que inclui: estudos de coexistência em redes WH, trabalhos que abordam melhorias no padrão e estudos de redes cognitivas industriais. No Capítulo 4 é apresentada a proposta desta tese, demonstrando análises e as estratégias propostas para o WH. O Capítulo 5 descreve as ferramentas e o cenário utilizado na implementação da solução, assim como no estudo de caso. O Capítulo 6 faz uma abordagem apresentando o desempenho da solução proposta. Finalmente, o Capítulo 7 e 8 apresentam as conclusões e trabalhos futuros.

## 2 TEORIA

Neste capítulo são apresentados alguns dos conceitos de base que ajudam no entendimento da teoria das redes de comunicação sem fio. Primeiramente, é apresentada uma visão geral sobre redes de comunicação sem fio, alguns conceitos, tipos e suas características. Na sequência uma abordagem sobre questões de interferência e suscetibilidade da comunicação sem fio. Ainda, uma visão geral sobre os principais padrões de comunicação sem fio para automação de processos é explorada, após este detalhamento a tecnologia de comunicação WH é descrita mais amplamente. Na última parte, a teoria e conceitos de RC são introduzidos, etapas essenciais, dimensões de análise e, finalmente, uma análise dos métodos de sensoriamento.

### 2.1 Redes de Comunicação sem Fio

Desde o surgimento de dispositivos de comunicação sem fio, tais como, o telégrafo de Morse (1837), o telefone de Bell (1837), o rádio do Padre Landel de Moura (1893) e o rádio de Marconi, utilizado para comunicações através do oceano Atlântico (1901), diversas tecnologias têm sido desenvolvidas para o uso de sistemas compostos por rádios transmissores. Quando diversos dispositivos com transceptores de rádio dividem uma determinada porção do espectro para troca de informações entre eles, é aplicado o conceito de rede de comunicação sem fio. Em (KUMAR, 2008) é apresentada uma taxonomia para as diferentes aplicações de redes de sensores sem fio, em que são divididas em três grandes categorias: redes fixas, redes de acesso móvel e redes do tipo *ad hoc*. A Figura 1 ilustra os diferentes grupos.



**Figura 1. Taxonomia de redes sem fio. (KUMAR, 2008).**

### 2.1.1 REDES FIXAS

Estas redes incluem as conexões com linhas de visada de ponto-a-ponto, usualmente para comunicações de longa distância. Normalmente, utilizam-se antenas de alto ganho em alturas elevadas. Infraestruturas de redes fixas são frequentemente uma alternativa para o alto custo de instalação de cabos e fibras ópticas entre diferentes estações.

### 2.1.2 REDES DE ACESSO MÓVEL

Este tipo de rede, diferentemente das redes fixas, usualmente possui múltiplos acessos em uma determinada área de cobertura. Geralmente, nestas redes existe apenas um salto entre o dispositivo até o ponto de acesso para uma rede de cabos, ou seja, o caminho entre dois usuários possui apenas uma, ou talvez duas conexões sem fio. Este tipo de rede é dividido em setores regionais, chamado de células. Para cada célula há uma Estação Base (EB), o qual é conectado a uma rede com cabos, por esta razão são redes com poucos saltos de conexão entre os usuários. Métodos de acesso ao meio, como o FDM-TDMA (*Frequency Division Multiplexed - Time Division Multiple Access*) e CDMA (*Code Division Multiple Access*), são exemplos de tecnologias utilizadas nestas redes. Dentro do contexto de redes móveis, ainda pode haver subdivisões, como multiplexação de circuitos, multiplexação estatística

centralizada e multiplicação estatística distribuída, atribuída a tecnologias, como a GSM (*Global System for Mobile*), CDMA e WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), e redes IEEE 802.11, respectivamente.

### **2.1.3 REDES AD HOC**

Uma rede do tipo *ad hoc* comporta diversos dispositivos arbitrariamente localizados em uma determinada área. Possui uma infraestrutura independente e deve ser capaz de se auto administrar. Cada equipamento possui um rádio transceptor sendo que usualmente todos os dispositivos dividem uma mesma banda de frequência. Para tal situação, a dificuldade é a comunicação entre os diversos dispositivos. Os dispositivos devem identificar e descobrir vizinhos com o objetivo de formar uma topologia, caminhos com qualidade de conexão devem ser encontrados e métodos de agendamento ou de eliminação de colisões devem ser aplicados para garantir o envio dos pacotes entre os dispositivos da rede. Algumas redes podem requerer que os dispositivos sejam capazes de encaminhar pacotes de outros dispositivos, neste caso, métodos de multi saltos devem ser aplicados. Normalmente, os dispositivos desta rede são dispositivos em miniatura em que cada um comporta: um sistema micro processado; um ou mais sensores; baixo consumo de energia, transceptor de rádio para baixa taxa de dados e bateria. Redes do tipo *ad hoc* são aplicadas para solução de problemas locais, onde não há disponibilidade de outra infraestrutura de comunicação ou tal infraestrutura não possa ser utilizada por razões de segurança, dificuldade de instalação, etc. Exemplos comuns de rede do tipo *ad hoc* são: redes de laptops e redes entre dispositivos móveis.

### **2.1.4 REDES DE SENSORES SEM FIO**

As chamadas redes de sensores sem fio têm revivido os aspectos incorporados no conceito de redes do tipo *ad hoc*. Sensores espacialmente distribuídos em uma determinada área com o objetivo de monitorar variáveis físicas ou condições do ambiente, tais como,

temperatura, pressão, luminosidade, etc., e cooperativamente passar os dados através da rede para a estação coletora definem o conceito. Redes de sensores sem fio são constituídas por "nodos" e podem ter desde alguns até milhares de dispositivos, podem ter grande variação de tamanho e podem ser programados para desempenhar tarefas complexas além de apenas transmitir o que é observado. Podem ser estacionários ou móveis e são geralmente alimentados por uma fonte limitada de energia, usualmente para economizar energia os dispositivos desligam os transmissores durante períodos de ociosidade. Entretanto não devem perder a conectividade com a rede. Em um ambiente dinâmico é um grande desafio prover qualidade em conectividade ao mesmo tempo em que deve se economizar energia. O projeto de redes de comunicação sem fio impõe diversos desafios, abrangendo uma grande diversidade de tópicos dentro do campo da engenharia elétrica. Além da necessidade de economia de energia outras características, tais como, segurança, taxa de dados de transmissão, confiabilidade na comunicação, capacidade de auto-organização, alcance da rede e latência da rede, são alguns dos aspectos de preocupação para o desenvolvimento de um nodo sensor.

## **2.2 Ruído e Interferência**

Diferentes parâmetros contidos em sistemas de comunicação sem fio, tais como, modulação, correção de erro, espalhamento do espectro, salto de frequência, tamanho dos pacotes, ciclo de trabalho, potência de transmissão e topologia da rede, podem afetar o desempenho e qualidade da comunicação. O trabalho de (YANG, 2011), classifica em dois grupos: i) parâmetros que afetam somente o desempenho do próprio sistema e ii) parâmetros que afetam as interações entre dois sistemas distintos de comunicação. Com exceção do esquema de modulação e a correção de erros, todos os outros são parâmetros que pertencem ao segundo tipo. Em geral, o ruído representa qualquer sinal indesejado de natureza aleatória

de uma fonte externa ou do próprio transmissor, o qual pode perturbar ou mascarar o sinal desejado. O sinal interferente, refere-se à um sinal externo capaz de alterar as características do sinal transmitido. Ambos sinais quando sobrepostos no mesmo instante de tempo e na mesma banda de frequência podem perturbar os resultados da comunicação. Nas interferências por co-canal, a fonte interferente irradia na mesma ou em uma frequência sobreposta ao transceptor em consideração. Outro caso é o de interferência por canal adjacente que ocorre quando a fonte interferente irradia sinal em uma banda de frequência vizinha podendo deixar algum sinal de energia na banda utilizada pelo transceptor desejado e ou o receptor pode ter imperfeições nos filtros e capturar o sinal da banda vizinha. Os transceptores de comunicação sem fio devem prover um limite mínimo de qualidade na transmissão, ou seja, tolerar um valor mínimo de relação sinal ruído SNR (*Signal Noise to Ratio*) no receptor. Há diferentes possibilidades de fontes de ruído e interferência, tais como:

**Ruído térmico:** Ocorre em função da agitação dos elétrons que geram correntes intermitentes e são em função da temperatura do ambiente. Os enlaces de comunicação ocupam apenas uma porção do espectro, sendo importante para análises a distribuição do ruído térmico em função da frequência, ou seja, a densidade de potência espectral do ruído. Para frequências de até  $10^{12}$  Hz, a densidade espectral de ruído (watts/Hz) é aproximadamente constante. O ruído térmico pode ser caracterizado como ruído branco, pois está distribuído na frequência com o mesmo nível de potência. Para uma temperatura de 300 K a densidade espectral correspondente é de -174 dBm/Hz (MOLISCH, 2005).

**Ruído artificial:** Os ruídos artificiais podem ter níveis tão altos que podem superar o limite de sensibilidade do receptor. Fontes artificiais de ruídos podem ser provenientes de outros sistemas de comunicação operando na mesma banda de frequência, assim como de dispositivos eletrônicos com outros propósitos.

**Ruído impulsivo:** este tipo de ruído é caracterizado como um fenômeno não estacionário. O impacto do ruído impulsivo em sistemas de comunicações digitais é dependente das características do impulso, tais como potência, taxa de repetição e tempo de duração. O ruído impulsivo pode afetar diferentes estágios de um receptor causando variação da intensidade do sinal, mensagens de erro e perda de sincronização;

**Jamming:** Rádio *jamming* é um tipo de interferência deliberado para corromper comunicações. É baseado na emissão de sinais ou pulsos aleatórios, existem diferentes classificações e métodos de utilização que são detalhados no trabalho de (WENYUAN, et al., 2006). O uso de *jamming* nas comunicações resulta na diminuição da relação sinal ruído causando danos na transmissão dos dispositivos;

**Outras fontes de interferência:** Diversos sistemas de comunicação operam em bandas não licenciadas (bandas de frequência que não apresentam custo para utilização). Muitos padrões de comunicação utilizam faixas desta banda levando à coexistência de diferentes padrões e possível interferência. As interferências também podem ocorrer fora da banda de transmissão de outros serviços de comunicação. Esse tipo de interferência ocorre em função das harmônicas de ordem elevada que podem estar sendo utilizados em uma banda de frequência diferente, mas que produzem um segundo ou um terceiro harmônico que situa diretamente na banda de frequência de interesse.

São diversos os distúrbios que interferências podem causar em um sistema de comunicação e há uma variedade de métricas que podem ser utilizadas, tais como taxa de perda de pacotes, latência, *jitter*, etc., e uma série de variáveis como, por exemplo, distância entre os dispositivos, potência, taxas de transmissão, etc., que podem ser utilizadas com métricas de coexistência. Abaixo são citadas as definições de algumas métricas acima da camada física que podem ser utilizadas para análise de desempenho de sistemas de comunicação:

**Jitter:** representa a magnitude da variação do atraso (STALLINGS, 2007). Em aplicações de tempo real esta é uma medida importante, pois os pacotes são esperados em intervalos fixos de tempo no local de destino. Pacotes atrasados que chegam "tarde demais" são normalmente descartados para aplicações como transmissão de áudio e vídeo, bem como em aplicações que requerem uma malha de controle em laço fechado, em que pacotes atrasados podem resultar em uma resposta errônea ao sistema de controle.

**Taxa de perda de pacotes:** número de pacotes descartados na camada MAC (*Medium Access Control*) em função de erros nos bits do pacote, vide equação (1);

$$PLR = \frac{P_F}{P_{Tx}}, \quad (1)$$

sendo  $P_F$  o número de pacotes com falhas e  $P_{Tx}$  número de pacotes transmitidos. Esta métrica é frequentemente utilizada para avaliar condições de ruído ou interferência no meio.

**Latência:** é a quantidade de tempo que uma mensagem tem para atravessar um sistema. Em uma rede de computadores, por exemplo, é uma expressão de quanto tempo um pacote leva para ir de um ponto designado para outro. Em alguns casos é a medida do tempo necessário para que um pacote seja devolvido ao remetente. O parâmetro latência depende da velocidade do meio de transmissão (por exemplo, espaço livre, fios de cobre ou fibra óptica), e também de atrasos na transmissão que podem ocorrer ao longo do caminho por meio de dispositivos (por exemplo, modems e roteadores). É uma medida fundamental de desempenho da rede e para considerações de tempo real, determinando a quantidade de tempo entre o início de uma ação e da sua conclusão. A baixa latência indica uma alta eficiência de rede.

O impacto de fontes interferentes pode causar alterações nos valores esperados das métricas citadas acima, sendo estas uma boa referência em procedimentos de análise de qualidade de enlace de comunicações sem fio.

### 2.3 Protocolos de Comunicação Sem Fio para Aplicações Industriais

Tecnologias de comunicação sem fio têm chamado grande atenção para o campo das aplicações industriais, especialmente redes de sensores sem fio, as quais têm potencial de importantes contribuições neste setor, tais como redução de custos, mobilidade, flexibilidade e escalabilidade (AKERBERG, 2011). Redes sem fio oferecem vantagens competitivas, como redução de falhas em conexões, instalação em locais de difícil acesso, fácil manutenção entre outras. Entretanto, para que as aplicações de automação industrial possam utilizar os benefícios das redes de comunicação sem fio é necessário que alguns critérios de desempenho sejam satisfeitos, especialmente para aplicações de controle. Requisitos de latência, sincronismo e confiabilidade são alguns dos critérios essenciais para o uso de tecnologias de comunicação sem fio. Diferentes organizações, como ISA (*International Society of Automation*), HCF (*Hart Communication Foundation*) e ZigBee têm demonstrado esforço para o desenvolvimento de tecnologias que sejam adequadas ao setor industrial. Inicialmente, os padrões Bluetooth (1998) e ZigBee (2002) foram introduzidos e apresentados ao mercado como protocolos para aplicações industriais, mas simplesmente não atenderam os requisitos da indústria. Em 2007, foi lançado o padrão WH, seguido por mais dois padrões o ISA100.11a e o WIA-PA, padrões específicos para propósitos industriais. Redes sem fio do tipo LAN (WLAN – *Wireless Local Area Network*) e do tipo PAN (WPAN – *Wireless Personal Network*), também foram interessantes para a automação industrial, e alguns padrões utilizando transceptores IEEE 802.11 e IEEE 802.15.1 têm sido utilizados, tais como IWLAN (*Industrial Wireless Local Area Network*) da Siemens e WISA (*Wireless Interface for Sensors and Actuators*) da ABB (*Asea Brown Boveri*) (FROTZSCHER, 2014). Entretanto, as redes do tipo WLAN não são utilizadas para aplicações críticas de plantas industriais em razão da falta de suporte para os requisitos de comunicação em tempo real.

A seguir é apresentada uma visão geral sobre alguns dos principais padrões para redes de sensores sem fio.

### 2.3.1 ZIGBEE

O ZigBee foi desenvolvido por um consórcio de grandes empresas, ZigBee Alliance. A rede ZigBee utiliza topologia em malha, com capacidade de até 64.000 dispositivos em uma única rede. Permite operação regional em 915MHz (Americas) e 868MHz (Europa), mas como alternativa global pode operar em 2.4GHz. O ZigBee utiliza o IEEE 802.15.4 e adiciona camada de rede e segurança além de um *framework* para a aplicação. A rede do ZigBee é composta por diferentes tipos de dispositivos, os quais carregam diferentes funções: coordenador, roteador e dispositivos terminadores. A especificação ZigBee tem duas implementações disponíveis: ZigBee (2006) e ZigBee PRO (2007). A implementação ZigBee é mais apropriada para aplicações de redes menores. A versão ZigBee PRO trouxe escalabilidade na rede, podendo suportar milhares de dispositivos, além disso a versão PRO adicionou outras características que o tornaram mais robusto em relação a primeira versão, tais como melhorias nos mecanismos de segurança da rede. Na versão de 2006 havia uma chave global na rede, enquanto na versão 2007 foram introduzidas chaves exclusivas para pares de dispositivos. Outras diferenças estão na facilidade de fragmentação de grandes pacotes de mensagens, endereçamento estocástico e roteamento em malha. O padrão ZigBee se tornou um padrão bem popular, especialmente para aplicações como monitoramento de ambientes, automação residencial, sistemas de cuidados pessoais de saúde e outros. Entre as boas características do ZigBee estão o baixo consumo de energia e a diversidade de topologias, o que o torna um bom candidato para aplicações com redes de sensores sem fio. Para aplicações industriais o padrão ficou um pouco mais distante. Características, como o método de acesso ao meio que é baseado no CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with*

*Collision Avoidance*), implicam em dificuldades para garantir determinismo na rede e uma comunicação cíclica em tempo real.

### **2.3.2 WIRELESSHART**

Desenvolvido pela Fundação de Comunicação HART (*Highway Addressable Remote Transducer*), o WH é uma extensão do padrão HART. Foi o primeiro padrão aberto de comunicação sem fio certificado para aplicações de monitoramento e controle, IEC 62591 (*International Electrotechnical Commission*). Também é baseado no padrão IEEE 802.15.4 e opera na banda de 2.4GHz. Utiliza 15 canais, com salto de canais para cada mensagem enviada. A rede é do tipo malha, sendo que cada dispositivo da rede é apto a encaminhar mensagens entre os nodos e não há níveis de hierarquia entre os dispositivos de campo o que simplifica o processo de instalação. O WH possui uma arquitetura centralizada com três entidades: o ponto de acesso, o gateway e o gerenciador de rede. Muitas vezes todos estão concentrados em um único dispositivo. Uma das características favoráveis do WH para sua adoção na indústria é a garantia de determinismo nas comunicações entre os dispositivos, logo que o acesso ao meio utiliza o método TDMA com a adição de múltiplos mecanismos de redundância em caso de alguma falha.

### **2.3.3 WIA-PA**

O WIA-PA (*Wireless Networks for Industrial Automation - Process Automation*), foi proposto pela CIWA (*Chinese Industrial Wireless Alliance*), com o objetivo de desenvolver um padrão de alta confiabilidade, eficiência energética e com uma solução inteligente para roteamento entre nodos da rede. O padrão é certificado pela IEC (IEC 62601), e é totalmente compatível com o padrão IEEE 802.15.4. O acesso ao meio é um misto de tecnologias CSMA, TDMA e FDMA. Utiliza 16 canais dentro do 2.4GHz. A rede WIA-PA pode utilizar esquemas de gerenciamento de rede centralizado ou distribuído. Outra característica importante é o suporte a protocolos legados, como o HART e outros.

### 2.3.4 ISA100.11A

ISA100.11a foi desenvolvido pelo grupo de trabalho ISA em 2009. Semelhante ao WH, a camada física é baseada no IEEE 802.15.4, também utilizando salto de canais e lista proibida de canais. O ISA100.11a possui diferentes métodos para salto de canais, tais como salto lento, salto rápido e salto misturado. O método de acesso ao meio combina TDMA com CSMA e na camada de rede há compatibilidade com o IPV6, abrindo possibilidade de conexão com à Internet. Suporta conexão com outros protocolos, incluindo o HART. O protocolo apresenta grande complexidade e sobrepõem muitas características do WH. Entretanto, dos padrões mais aceitos para aplicações industriais o ISA100.11a foi o último a receber a certificação IEC, em 2014 (IEC 62734).

### 2.3.5 COMENTÁRIOS

Os padrões ZigBee PRO, WH, WIA-PA e ISA100.11a, no modo TSCH (*Time Slotted Channel Hopping*), são padrões baseados no IEEE 802.15.4. Entre estes, WH, WIA-PA e ISA100.11a foram desenvolvidos para atender critérios de automação de processos industriais, usando conceitos derivados do TSMP (*Time Synchronized Mesh Protocol*). O modelo TSMP foi desenvolvido pela Dust Network (DUST NETWORKS, 2015), sendo um método de acesso ao meio e protocolo de rede projetado para baixo consumo de energia, baixa taxa de dados e comunicação confiável. Protocolos de comunicação baseados em métodos de contenção, tais como o CSMA, são incapazes de garantir tempo de entrega de mensagens. Ainda, existe o problema de terminal escondido, o qual possibilita interferências provenientes da própria rede. O ZigBee PRO opera com um MAC baseado no CSMA, sendo inadequado para aplicações com requisitos de comunicação determinísticas.

Baseado nos últimos avanços e entre todos os padrões disponíveis, o WH e o ISA100.11a são os principais dominantes do mercado (KUMAR, 2014). Todos os dispositivos de campo WH apresentam o mesmo comportamento e esta característica agrega

facilidades para a questão de interoperabilidade e simplicidade entre desenvolvedores e fornecedores, favorecendo a aceitação do padrão no mercado. Nas camadas superiores, modelo OSI, os padrões ISA100.11a e WIA-PA apresentam divergências e tornam a convergência um desafio. O WH é o único dos padrões que possui uma especificação completa da camada de aplicação do protocolo, sendo novamente favorável a questões de interoperabilidade. O ISA100.11a possui uma grande quantidade de parâmetros opcionais, possibilitando adaptações para diferentes aplicações. Entretanto, implica em maior complexidade e dificuldades quanto à questão de interoperabilidade entre fornecedores. Talvez estas questões tenham influenciado o processo mais lento de aceitação por parte do mercado quando comparado ao WH. O WIA-PA é um padrão promissor, apresenta um conjunto de características que atendem os critérios da indústria. Entretanto, trabalhos como o de (QI, 2014), relatam alguns problemas de segurança que o padrão não consegue atender como, por exemplo, no processo de associação do dispositivo à rede, em que não há uma chave de difusão para os novos dispositivos, tornando a rede WIA-PA vulnerável a ataques maliciosos do tipo Sybil e DOS. O trabalho de (MULLER, 2012) aponta como característica desfavorável o uso do CSMA-CA como forma primária de acesso ao meio na ponta extrema da rede, onde estão os dispositivos de campo, implicando em dificuldades para os requisitos de comunicação em tempo real.

O trabalho de (LIANG, 2011), apresenta uma tabela comparativa entre os três padrões com maior potencial para aplicações industriais. É fornecida uma visão geral destes padrões, são listados cinco aspectos principais: arquitetura, sistema de gerenciamento, tecnologia de comunicação, rede e aplicação.

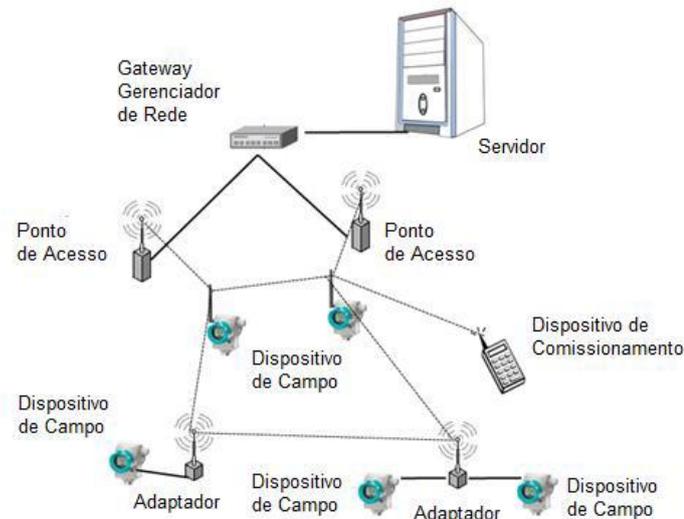
**Tabela 1. Comparação entre os protocolos WIA-PA, *WirelessHART* e ISA100.11a. (LIANG, 2011).**

	<b>Comparação</b>	<b>WIA-PA</b>	<b><i>WirelessHART</i></b>	<b>ISA100.11a</b>
<b>Arquitetura</b>	<i>Composição da rede</i>	Servidor, gateway, dispositivo de roteamento e handheld	Gerenciador de rede, gateway, dispositivo de campo e handheld	Dispositivo de campo e infraestrutura de dispositivos
	<i>Pilha do protocolo</i>	IEEE802.15.4 camada física e MAC, DLSL, rede e aplicação	IEEE802.15.4 camada física, DLL definido, rede, transporte e aplicação	IEEE802.15.4 camada física, DLL, rede, transporte e aplicação
<b>Gerenciamento do sistema</b>	<i>Esquema de gerenciamento</i>	Híbrido: centralizado e distribuído	Centralizado	Centralizado. Discussões distribuído, mas não especificado
	<i>Ponto singular de falha no sistema</i>	Não, redundância permitida		
	<i>Atribuição do endereço de gerenciamento</i>	Fixo	Fixo	Dinâmico
	<i>Função de agregação de pacotes</i>	Dois níveis de agregação	Agrega em uplink e downlink	Agrega no dispositivo de campo
	<i>Segurança</i>	Camada de aplicação e DLL; Opcional; chaves simétricas e assimétricas	Camada de transporte e DLL; chave simétrica	Camada de rede e DLL; Opcional; Chave simétrica e pública
	<i>Medida do tempo</i>	UTC	Contagem de slots (ASN)	TAI
	<i>Duração do timeslot</i>	Todos slots 10ms	Todos slots 10ms	Flexível: diferentes tamanhos para diferentes redes
	<i>Padrão de tempo</i>	Todos nodos sincronizados por UTC/TAI	ASN para UTC. Todos nodos sincronizados	Todos nodos sincronizados com o TAI
<b>Tecnologias de comunicação</b>	<i>Compatibilidade com o IEEE802.15.4</i>	Camada física e MAC	Camada física	Camada física
	<i>Estrutura do superframe</i>	Baseado no IEEE802.15.4	Sem estrutura	Sem estrutura
	<i>Mecanismo de multi acesso</i>	CSMA, TDMA e FDMA	TDMA e CSMA	TDMA e CSMA
	<i>Salto de frequência</i>	AFH, AFS e TH	Salto de canais	Salto lento, salto rápido e misto
<b>Tecnologia de rede</b>	<i>Topologia de rede</i>	Híbrido: malha e estrela	Malha ou estrela	Malha
	<i>Função de roteamento</i>	Dispositivo de campo não tem função de roteamento	Todos dispositivos	Dispositivo de campo não tem função de roteamento
	<i>Tecnologia de roteamento</i>	Estático e redundante	Origem, grafos, híbrido e por <i>superframe</i>	Origem, grafos e híbrido
	<i>Fragmentação</i>	Camada de rede	Camada de rede e aplicação	Camada de aplicação
	<i>Padrão de associação de dispositivos</i>	Padrão distinto para diferentes dispositivos	Não faz distinção	
	<i>Padrão de desconexão à rede</i>	Desconexão ativa e passiva	Não faz distinção	
<b>Tecnologias de aplicação</b>	<i>Suporte para protocolos legados</i>	HART/ <i>WirelessHART</i> , Profibus, Modbus e FF	HART	HART/ <i>WirelessHART</i> , Profibus, Modbus e FF
	<i>Múltiplos protocolos de aplicação</i>	Sim, suportado pelo GW		
	<i>Aplicação</i>	Orientado a objeto (simples)	Comandos	Orientado a objeto (complexo)
	<i>Função de alerta</i>	Método de relatório	Comandos	Alteração de objeto
	<i>Comunicação entre objetos</i>	VCR	Sem suporte	UFO

## 2.4 Tecnologia *WirelessHART*

Neste capítulo uma análise mais completa é realizada sobre o WH, com o objetivo de um melhor entendimento quanto as principais características deste padrão. A norma que contempla as definições do WH foi introduzida em 2007 e em 2010, o padrão WH, foi certificado pela IEC (IEC62591), sendo então o primeiro padrão de comunicação sem fio com certificação para aplicações industriais. Em 2014 o padrão WH foi creditado novamente, recebendo a certificação nacional chinesa GB/T, consolidando-o ainda mais sua adoção no setor industrial. Atualmente o padrão WH é conduzido pelo grupo FieldComm.

O padrão WH apresenta uma arquitetura centralizada utilizando uma topologia em malha, podendo ter diferentes dispositivos presentes na rede, tais como, gerenciador de rede, gerenciador de segurança, ponto de acesso, gateway, dispositivos de campo, adaptadores e *handheld*. O gerenciador de rede e segurança assim como o gateway e o ponto de acesso podem ser agrupados em um único equipamento. Os adaptadores são utilizados para integrar dispositivos HART já existentes na rede WH, o *handheld* é um dispositivo móvel utilizado para comissionamento e eventual manutenção nos dispositivos de campo. Os dispositivos de campo podem ser aplicados para desempenhar funções de sensoriamento assim como de atuação, cada dispositivo de rede tem a capacidade de encaminhamento de mensagens. A Figura 2 ilustra uma rede WH típica.



**Figura 2. Exemplo de rede *WirelessHART*.**

A comunicação é determinística, segura e de baixo consumo de energia. Opera na faixa de frequência ISM de 2.4GHz, banda não licenciada mundialmente, utilizando 15 canais espaçados por uma faixa de 5MHz, com uma taxa efetiva de comunicação de 12,7 kB/s.

#### **2.4.1 WIRELESSHART E O MODELO OSI**

A Figura 3 ilustra o padrão WH comparado às camadas do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*). O protocolo WH compartilha a mesma camada de aplicação utilizada no padrão HART, no entanto com camada física, de enlace e rede diferentes.

Camada OSI	Função	HART	
7 Aplicação	Fornecer aos usuários as aplicações da rede.	Comandos orientados. Tipos de dados pré-definidos. Procedimentos de aplicações.	
6 Apresentação	Converte dados de aplicação entre a rede e a máquina local		
5 Sessão	Conecta os serviços de gerenciamento com as aplicações.		
4 Transporte	Transfere mensagens de forma transparente e independente na rede.	Transferência de conjunto de dados. Segmentação de dados. Negociação da segmentação de dados.	
3 Rede	Roteamento dos pacotes de ponta a ponta. Endereçamento da rede.		Otimização de energia, redundância de caminhos. Auto organização da rede.
2 Enlace	Estabelece pacote da estrutura de dados. Detecção de erros.	Conexão Elétrica/mecânica, transmissão de bits.	Segurança e confiabilidade. Tempo de sincronização. TDMA/CSMA.
1 Física	Conexão Elétrica / mecânica e transmissão.	Sinal analógico e digital simultaneamente.	Wireless 2.4 GHz, baseado em rádios 802.15.4, 10dBm.
		Com fio FSK/PSK e RS485	Sem fio 2.4GHz

**Figura 3. Modelo OSI e o padrão WH. (CHEN, 2010)**

### Camada Física

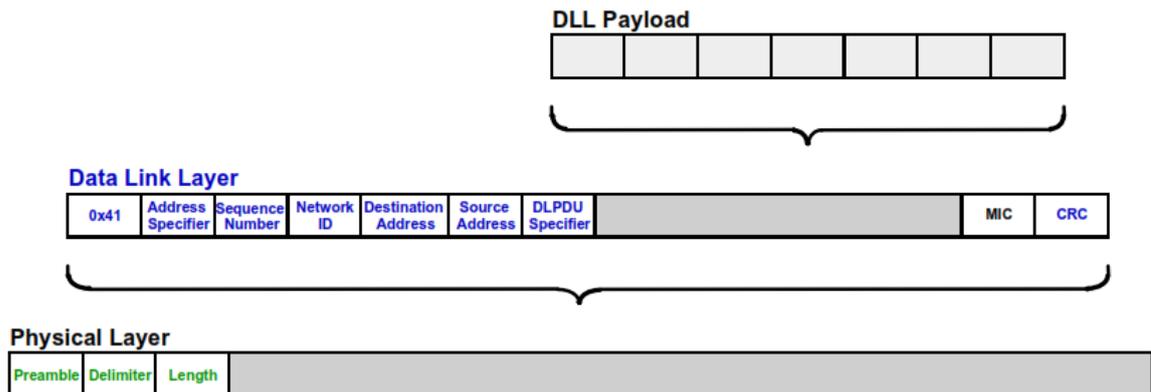
Baseada no padrão IEEE 802.15.4 – 2006 utiliza banda ISM, com taxa de dados de até 250 kbit/s. Os canais são enumerados do 11 ao 26, com intervalo de 5 MHz entre dois canais adjacentes. A potência de transmissão diferentemente do IEEE 802.15.4 (0 dBm) deve ser de pelo menos até 10 dBm, podendo ser programada de -10 a 10 dBm.

### Camada de Enlace

A camada de enlace tem como tarefa criar e gerenciar os quadros de tempo (*frames*) utilizados na comunicação, além de ser responsável pela transferência segura de dados entre os nodos da rede, detectando e corrigindo possíveis erros provenientes da camada física. Possui duas subcamadas, LLC e MAC (*Logical Link Control e Media Access Control*).

### Subcamada *Logical Link Control*

O LLC é responsável pelo controle de erros, controle de fluxo de pacotes, montagem dos quadros e endereçamento. É onde é especificado o formato da DLPDU (*Data Link Protocol Data Unit*). A Figura 4 ilustra a estrutura básica.



**Figura 4. Estrutura da DLPDU WH. (HCF, 2008)**

São cinco os tipos de DLPDU deste padrão:

- **Data:** contém informação da rede e do dispositivo em trânsito para o destino do seu dispositivo final;
- **Keep Alive:** responsável pela manutenção de conexão entre dispositivos vizinhos. O *payload* para este tipo de DLPDU é vazio e é utilizado para sincronização da rede e confirmação de comunicação com um dispositivo vizinho. Também na descoberta de um vizinho, o dispositivo deve emitir periodicamente DLPDUs do tipo *Keep Alive*;
- **Advertise:** fornece informação para os dispositivos vizinhos que podem agregar-se à rede. É utilizado para convidar novos dispositivos a associarem-se na rede. Quando um dispositivo deseja associar-se à rede ele checa por este tipo de DLPDU e usa as informações no *payload* para sincronizar-se com a rede e iniciar o processo de associação;

- **Disconnect:** o DLPDU de desconexão é gerado por um dispositivo que está deixando a rede. Implica que o dispositivo não estará mais disponível para comunicação e pode ser removido da lista de vizinhos. Todas as conexões estabelecidas com os vizinhos deste dispositivo são removidas. Para uma DLPDU do tipo *disconnect* o *payload* está vazio;
- **ACK:** representa a resposta de nível imediato para receber transmissões DLPDU de outras fontes. O ACK contém o código de resposta que indica se o dispositivo receptor aceitou a DLPDU.

Há quatro níveis de prioridade no DLPDU das mensagens, abaixo eles são apresentados em ordem de maior prioridade:

**Comando:** Nível de prioridade mais alta. No tipo comando, qualquer pacote contendo dados relacionados a diagnóstico, configuração, ou controle de informação deve ser classificado como prioridade de comando.

**Dados de Processo:** Pacotes contendo dados como, comandos 3 e 9, ou estatísticas da rede, comandos 779 e 780, por exemplo, devem ser classificados com nível de prioridade "Dados de Processo". Somente o gerenciamento da rede (indicado com prioridade de Comando) é mais importante do que a entrega dos valores das variáveis de processo ou parâmetros de ajustes de dispositivos. Pacotes com nível de prioridade "Dados de Processo" devem ser negados de outros dispositivos quando três quartos do buffer do dispositivo está ocupado.

**Normal:** Os pacotes que não estão nos critérios citados (Comando, Dados de Processo ou Alarme), devem ser classificados com nível de prioridade Normal. Pacotes neste nível de prioridade devem ser negados por outros dispositivos quando metade da memória do dispositivo está ocupada.

**Alarme:** Pacotes contêm apenas informações de alarme. Dispositivos não devem armazenar mais de um pacote com este nível de prioridade. Alarme é o tipo de menor prioridade.

Como existe a possibilidade de agregar múltiplos comandos em um único pacote, o DLPDU deve assumir a prioridade mais alta das mensagens dentro das mensagens agregadas.

### **Subcamada MAC**

Referente à camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC), uma política híbrida é adotada baseada em Acesso ao Meio por Divisão do Tempo (TDMA) e Acesso Múltiplo por Sensoriamento da Portadora (CSMA). Fundamentalmente a subcamada MAC é responsável pela propagação das DLPDUs através das conexões. Para realizar esta função o dispositivo deve possuir:

- Tabelas de vizinhos, *superframes*, links e grafos que configuram a comunicação entre o dispositivo e seus vizinhos. Estas tabelas são preenchidas pelo Gerenciador de Rede;
- Um escalonador de conexões que avalia a tabela de dispositivos e escolhe o próximo espaço de tempo para ser usado na recepção e envio de um pacote.

### **Camada de Rede**

A camada de rede e a camada de transporte cooperam para fornecer de forma segura e confiável comunicação de ponta a ponta para os dispositivos da rede. É onde os pacotes recebidos pelos serviços da camada de enlace são transferidos para os dispositivos e os pacotes encaminhados de outros dispositivos são enviados para a camada de enlace, além de processar os pacotes recebidos da camada de aplicação.

No modelo de protocolo de 7 camadas OSI, a camada de rede é a responsável pelas funções de roteamento de rede designando o endereçamento e entrega dos dados. A camada de transporte controla a confiabilidade e tempo de transmissão dos dados entre os nós da rede através de controle de fluxo, segmentação ou separação, e o controle de erro. A camada de sessão controla o diálogo, a sessão, e conexões entre dois nós da rede. No padrão WH a

camada de rede engloba todas estas três camadas. É neste ponto que ambas as versões, sem fio baseadas em TDMA e com fio HART *Token-Passing*, começam a assemelhar-se (HCF, 2007).

### **Camada de Aplicação**

A camada de aplicação é baseada em comandos, o WH mantém as características do protocolo HART, porém com comandos adequados para as novas funcionalidades da comunicação sem fio. A camada de aplicação é responsável pelo gerenciamento dos comandos utilizados. Por meio desta camada os parâmetros da rede e configurações necessárias são gerenciados, assim como, o usuário final pode acessar informações da rede. Os comandos são distribuídos em seis grupos que são Universal, Práticos, Família de Dispositivos, Funções Específicas e Comandos sem fio.

#### **2.4.2 MECANISMOS DE COEXISTÊNCIA *WIRELESSHART***

O protocolo WH introduz diferentes mecanismos que aumentam sua capacidade de coexistir com possíveis fontes de interferência. Estes mecanismos são estudados e detalhados abaixo. As características presentes podem ser classificadas como soluções inerentes ao protocolo, considerando que atuam independente da ocorrência de interferência.

##### **2.4.2.1 Arquitetura Centralizada e Acesso ao Meio**

O protocolo WH utiliza uma arquitetura centralizada concentrando a distribuição de recursos, agendamento das comunicações, sincronização dos dispositivos e otimização da rede no gerenciador de rede. A arquitetura centralizada permite determinar de forma mais controlada a distribuição dos recursos de tempo (*slots*) para os dispositivos na rede, sendo adequado o uso do esquema de acesso ao meio TDMA e CSMA-CA. Através do acesso ao meio com TDMA, o canal de comunicação é dividido em intervalos de tempo. Cada dispositivo utiliza o canal de comunicação durante certa porção de tempo. Os espaços de tempo para a comunicação são agendados e distribuídos para cada dispositivo da rede por

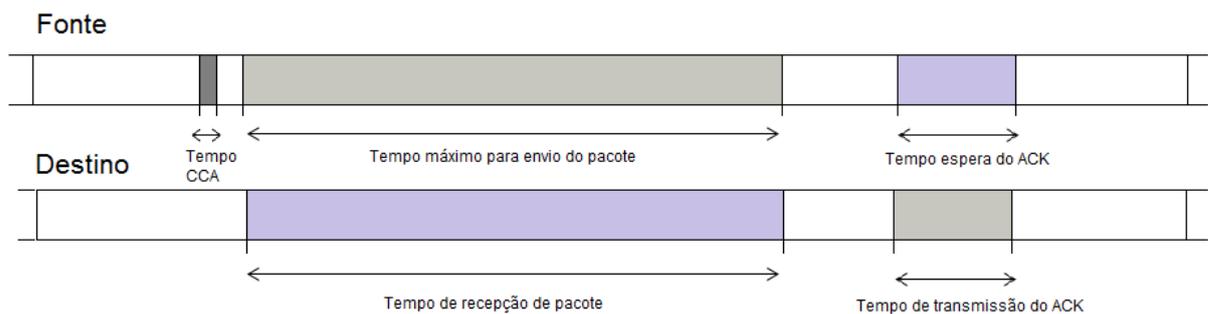
meio do gerenciador de rede. Normalmente somente um dispositivo é configurado para transmitir em um espaço de tempo. Esta estratégia mantém o tráfego em condição constante e também garante uma baixa latência na rede, resolve o problema do nodo escondido e evita colisões de pacotes na comunicação entre os dispositivos de uma mesma rede WH. O WH também possui espaços de tempo compartilhados, nos quais múltiplos dispositivos podem transmitir e outro dispositivo receber. Neste caso a colisão é detectada após a transmissão pelo não recebimento da confirmação de entrega e, quando isto ocorre, os dispositivos que não confirmaram a entrega da mensagem tentam reenviar utilizando outro espaço de tempo.

Um dos pontos negativos de uma arquitetura centralizada é a baixa dinamicidade nas alterações que ocorrem na rede, além da acuracidade necessária no dispositivo para manter-se sincronizado na rede.

#### **2.4.2.2 Avaliação do Canal Ocupado**

O WH também é provido com o mecanismo de CCA (*Clear Channel Assessment*). Este mecanismo implica na escuta do canal, ligeiramente antes da transmissão, e classifica o canal como ocupado ou limpo. O CCA é um método presente na norma IEEE 802.15.4, e no WH, o CCA reporta um meio ocupado na detecção de um sinal com a mesma portadora utilizada no protocolo. A detecção do canal ocupado não é realizada para o envio da mensagem de confirmação de recebimento.

A Figura 5 ilustra o espaço de tempo de transmissão e recepção do pacote indicando o instante no qual o CCA é ativado. O modo utilizado no WH, detecção de preâmbulo, pode tornar mais eficiente a sensibilidade, mas impede que seja identificada coexistência com tecnologias diferentes de comunicação, sendo um mecanismo com eficácia somente para protocolos com mesma modulação que o IEEE 802.15.4. No WH ainda há a possibilidade de desabilitar o CCA por meio do comando 805 do protocolo.



**Figura 5. Espaço de tempo para envio e recebimento de mensagens (timeslot). O tempo de execução do CCA é de 128  $\mu$ s.**

#### 2.4.2.3 ARQ (*Automatic Repeat Request*)

A requisição de repetição automática garante o reconhecimento da transmissão da mensagem. Se nenhuma confirmação é recebida, o transmissor reporta as falhas e realiza novas tentativas de transmissão. Há uma situação na qual o reconhecimento é enviado, mas não recebido e, neste caso, para o transmissor o envio da mensagem falhou enquanto para o receptor a mensagem foi recebida, de modo que esta situação pode gerar confusão para as ações do gerenciador de rede.

#### 2.4.2.4 Salto de Canais

O salto de frequência dos canais utilizados é um dos métodos de difusão do espectro, trocando o canal da frequência para cada transação de mensagens. Cada dispositivo contém uma tabela de canais a qual é passada no início da formação da rede. O canal a ser utilizado é determinado durante a operação da rede e é dado pela seguinte equação (2):

$$CA = (DC + ASN) \% NC \quad (2)$$

onde:

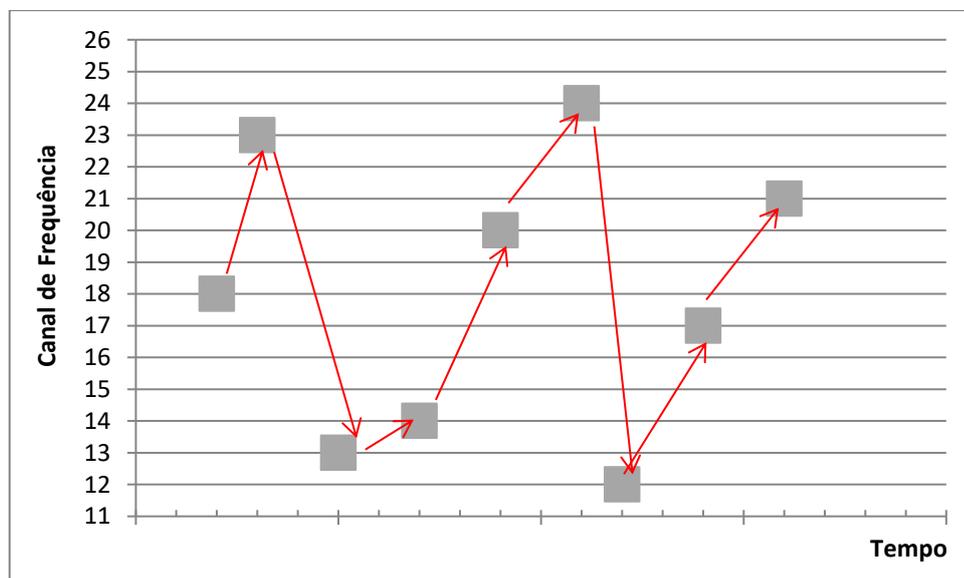
CA: canal Utilizado

DC: deslocamento de Canal

ASN: número absoluto da rede

NC: número de canais

O deslocamento de canal é um número de canal lógico, é permanente e é um atributo para uma dada conexão. O ASN (*Absolute Slot Number*) é um valor absoluto na rede, o qual é incrementado a cada transação da comunicação, sendo que na criação do ASN, este é iniciado em 0. O número de canais pode variar em razão de determinações por parte do administrador da rede, o qual pode determinar manualmente, e apenas antes da inicialização da rede, quais canais devem estar disponíveis para determinada rede WH. Por meio da relação entre estes parâmetros o próximo canal a ser utilizado é determinado e conhecido pelos nodos participantes da comunicação. A Figura 6 ilustra o salto de canais entre as mensagens. Este mecanismo de diversidade de canais aumenta a confiabilidade da rede, pois além de reduzir possibilidade de interferência de outros protocolos ou fontes interferentes, reduz os efeitos de interferência do próprio protocolo WH, como pelos efeitos de desvanecimento por multi-caminhos.



**Figura 6 . Exemplo de salto de canais em uma rede WH. Ocorre a troca de canal para cada mensagem enviada.**

#### 2.4.2.5 Lista Proibida de Canais

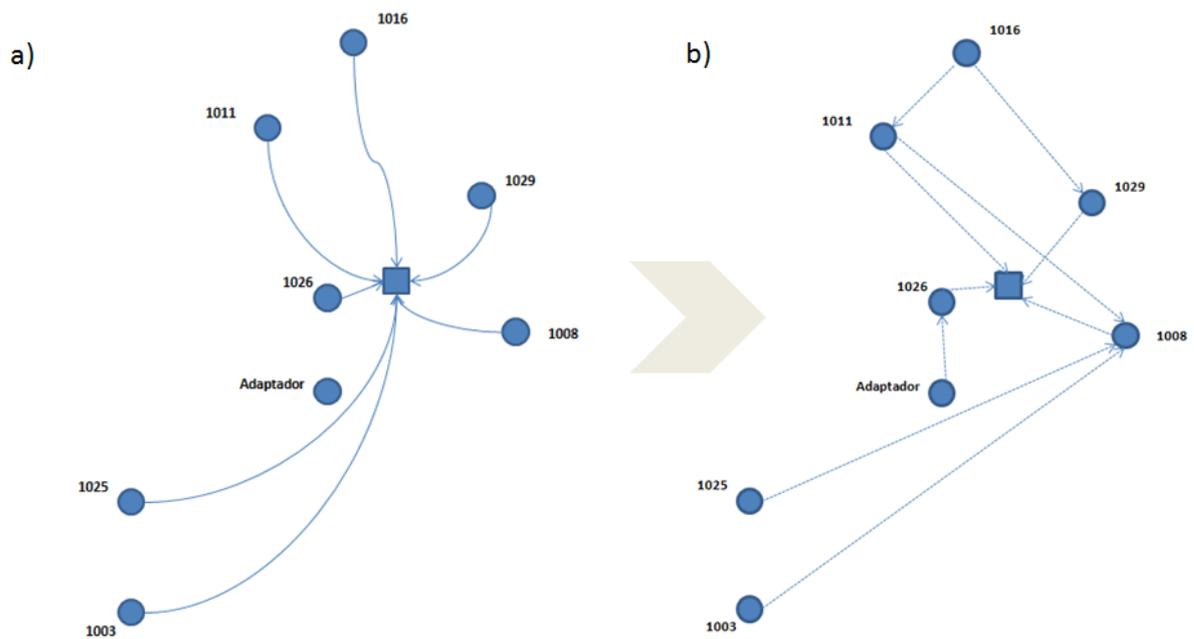
O padrão WH introduz o conceito de lista proibida de canais (chamada de "*black list*"), permitindo que alguns canais possam ser retirados dos canais utilizados na rede. Este mecanismo é eficaz para rejeição de interferências de redes estacionárias ou de banda estreita.

A lista proibida pode trazer benefícios em soluções de comunicação WH em relação a interferências permanentes como, por exemplo, redes do tipo WLAN que podem ser evitadas, uma vez que a banda do WH é relativamente estreita. Entretanto, esta é uma solução que necessita um estudo prévio da condição de ocupação do espectro de frequência e requer a necessidade da inicialização da rede WH à toda alteração na lista proibida de canais.

#### **2.4.2.6 Rede do tipo malha**

A rede do tipo malha também deve ser considerada uma característica que torna o protocolo mais robusto às condições de coexistência, uma vez que permite o uso de diferentes rotas para o envio das mensagens. O padrão WH requer que cada dispositivo de campo seja capaz de fazer o roteamento das mensagens. As mensagens podem mover-se através de dispositivos intermediários, sendo que cada movimento entre dispositivos ao longo da rota para o encaminhamento até o dispositivo de destino final é chamado de salto (*hop*). A latência da rede deve aumentar à medida que o dispositivo apresenta maior número de saltos para o destino final da mensagem (FERRARI, et al., 2012).

O trabalho (WINTER, 2013) apresenta a análise de uma rede WH montada em laboratório. Neste exemplo as conexões entre os diversos dispositivos foram avaliadas. A partir dos dados coletados durante a operação neste cenário analisou-se a dinâmica de encaminhamento de pacotes entre os diversos dispositivos. A Figura 7 ilustra as rotas diretas para o gateway da rede, assim como as rotas alternativas utilizadas pelos dispositivos para encaminhamento de mensagens.



**Figura 7. a) Rede *WirelessHART* com rotas diretas para o gateway. b) Rotas alternativas.**

A condição de todos os dispositivos de campo suportarem a capacidade de encaminhar as mensagens melhora as características de confiabilidade da rede WH. Considerando a condição em que o enlace entre dois dispositivos não possui uma relação sinal ruído suficiente para garantir a entrega da mensagem o protocolo em nível lógico encaminha a mensagem por outra conexão que pode ter uma relação sinal ruído melhor em função de apresentar uma condição espacial diferente como, por exemplo, estar fora de uma zona de interferência ou mesmo mais próximo do dispositivo de destino.

#### **2.4.2.7 Baixo Ciclo de Trabalho**

O WH tem suas camadas inferiores baseadas na especificação do IEEE 802.15.4, o qual foi desenvolvido para aplicações com baixo consumo de potência e baixas taxas de transmissão (250kb/s e 20kb/s). No WH o tamanho máximo de uma mensagem, já na camada física, é de 127 bytes e o tempo de transmissão é de 10ms. Estas condições implicam em uma taxa máxima por canal de 12.7kB/s. Aplicações típicas do IEEE 802.15.4 são especificadas para rodar com baixos ciclos de operação (menos que 1%). Desta forma também se diminui a

probabilidade de colisão de pacotes uma vez que a demanda da rede é baixa, causando menos interferências em outros padrões, além da questão de reduzir o consumo da bateria.

#### **2.4.2.8 Modulação**

A camada física especificada para este padrão utiliza um esquema de modulação quase ortogonal, em que cada símbolo é representado por uma das 16 sequências quase ortogonais PN (*pseudo-random noise*). Este é um método de modulação de potência eficiente que consegue uma relação baixa de sinal ruído (*SNR*) e da relação sinal interferência (*SIR*) requisitos em detrimento de uma largura de banda do sinal que é significativamente maior do que a velocidade de símbolo. A norma do IEEE 802.15.4 estima para um detector típico de baixo custo uma taxa de erros de pacotes de 1% (PER) para valores do SNR entre 5 a 6 dB.

O objetivo de espalhar o espectro é transmitir o sinal além da largura de banda, usando mais frequências e menos potência por frequência. Um método de espalhamento de frequência largamente utilizado é o DSSS (*Direct Spread Spectrum Sequence*). No WH o DSSS é aplicado para cada mensagem transmitida e ao invés de realizar o espalhamento sobre os 15 canais, cada canal é dividido em sub canais onde os dados são espalhados.

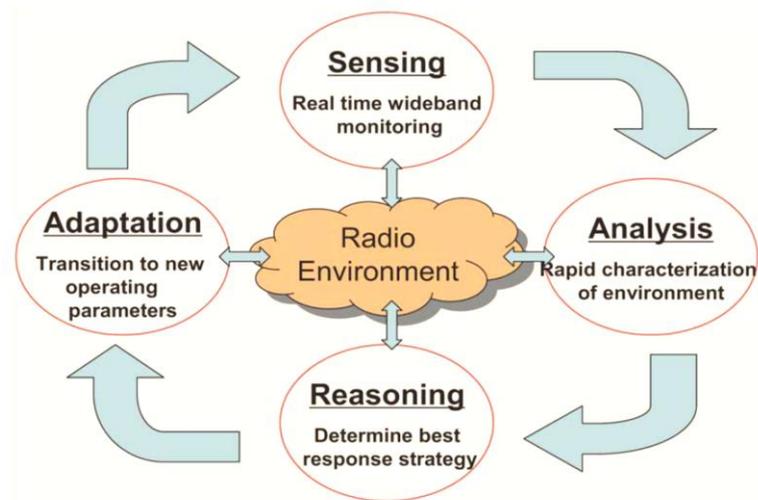
No caso do DSSS a possibilidade de coexistência é aumentada no sentido da rede interferente, neste caso mitigando a interferência em outros padrões enquanto o salto de canais é utilizado como mecanismo de defesa para outras interferências. Ambos os mecanismos ganham maior destaque para mitigar interferências temporárias.

### **2.5 Rádios Cognitivos**

O conceito de rádios cognitivos (RC), introduzido por (MITOLA, 1993), explora os recursos subutilizados do espectro pelo reuso destes recursos de forma oportunista. Sistemas de rádios cognitivos operam com o objetivo de utilizar os chamados espaços brancos, estes no contexto de telecomunicação são as bandas de frequência alocadas para usuários licenciados

que não estão em uso localmente e temporariamente. A teoria dos RC denomina dois tipos de usuários: primário (detentor da banda e com alta prioridade) e secundário (usuários sem direito a banda e com baixa prioridade). Os usuários secundários devem utilizar as técnicas de RC com o objetivo de identificar quando a banda de frequência está sendo ou não utilizada pelo usuário primário e possuir capacidades que permitam mudanças dos parâmetros de rádio. Muitas vezes estes sistemas são providos por geolocalização e um banco de dados, com capacidade de prover informações da situação do uso do espectro de frequência, o que é uma alternativa para os métodos de sensoriamento de espectro. O sistema com RC deve ser capaz de identificar o usuário primário e liberar a banda utilizada o mais rápido possível, não prejudicando o usuário primário. Esta condição atribui um grande desafio para o projeto de RC.

O trabalho de (WANG, 2011) ilustra um ciclo típico de um RC, o que inclui: detecção dos espaços brancos do espectro, seleção da melhor banda de frequência, coordenação do acesso ao espectro com outros usuários e liberação do canal quando necessário. Em (ARSLAN, 2007) são destacados os seguintes componentes essenciais de um RC: i) a habilidade de medir; ii) sentir; iii) aprender e; iv) estar ciente das características do canal de rádio frequência, tais como, a disponibilidade do espectro e potência, nodos na rede, requisitos do usuário e regulamentação local das operações (restrições). A Figura 8 ilustra as etapas demonstradas em (WANG, 2011).



**Figura 8 . Ciclo cognitivo (WANG, 2011).**

O trabalho de (THOMAS, 2007) apresenta o conceito de redes cognitivas que, embora similar ao conceito de rádios cognitivos, amplia as habilidades de percepção, planejamento e decisão para além de dispositivos isolados e abre desafios mais críticos para o conjunto de dispositivos que compõem uma rede de comunicação de ponta a ponta. Para uma rede cognitiva é esperado que a rede seja capaz de modificar uma ou mais camadas da pilha utilizada nos nodos, um exemplo deste conceito pode ser uma rede com dispositivos que possuam a capacidade de modificar parâmetros das antenas, de forma a direcionar ou maximizar os ganhos de transmissão e recepção, mudanças mais complexas podem estar associadas a mudanças nas camadas superiores, como na camada de controle de acesso. Diferentemente do RC, a rede cognitiva tem como objetivo o desempenho da rede na comunicação de ponta a ponta e não apenas de um único usuário. Ambos os conceitos compartilham os processos cognitivos, tais como, a capacidade de aprendizado das decisões passadas para influenciar as decisões futuras. Entretanto, implementações de redes cognitivas apresentam grande complexidade especialmente em questões de sincronismo e confiabilidade. As implicações dos nodos trocarem configurações em diferentes momentos podem, inclusive, gerar um desempenho pior do que a rede sem adaptações. Variações na topologia também podem dificultar processos de readaptação através de atrasos de notificação de todos os

dispositivos. Esse tipo de complexidade pode implicar em perda de mensagens e conseqüentemente perda de confiabilidade. Redes cognitivas é um conceito de tecnologia emergente e devem ser capazes de tratar da complexidade da capacidade de gerenciar de forma adequada diferentes parâmetros atendendo os requisitos de uma comunicação confiável (sucesso na entrega de pacotes). Este trabalho busca uma aproximação do conceito de rede cognitiva aplicada ao protocolo WH.

### 2.5.1 DIMENSÕES DE SENSORIAMENTO

A definição de oportunidade de espectro explora diferentes dimensões para determinar os espaços vazios. Frequência, espaço e tempo são as dimensões mais exploradas na literatura, entretanto existem outras possibilidades, como a posição geográfica, o código, ângulo de chegada do sinal e polarização do sinal. O trabalho de (YUCEK, 2009) lista possíveis dimensões de sensoriamento:

**Frequência:** Disponibilidade no domínio da frequência em determinadas faixas do espectro;

**Tempo:** Disponibilidade em determinada faixa de frequência durante certo período, é adequado para faixas que não são utilizadas de forma contínua;

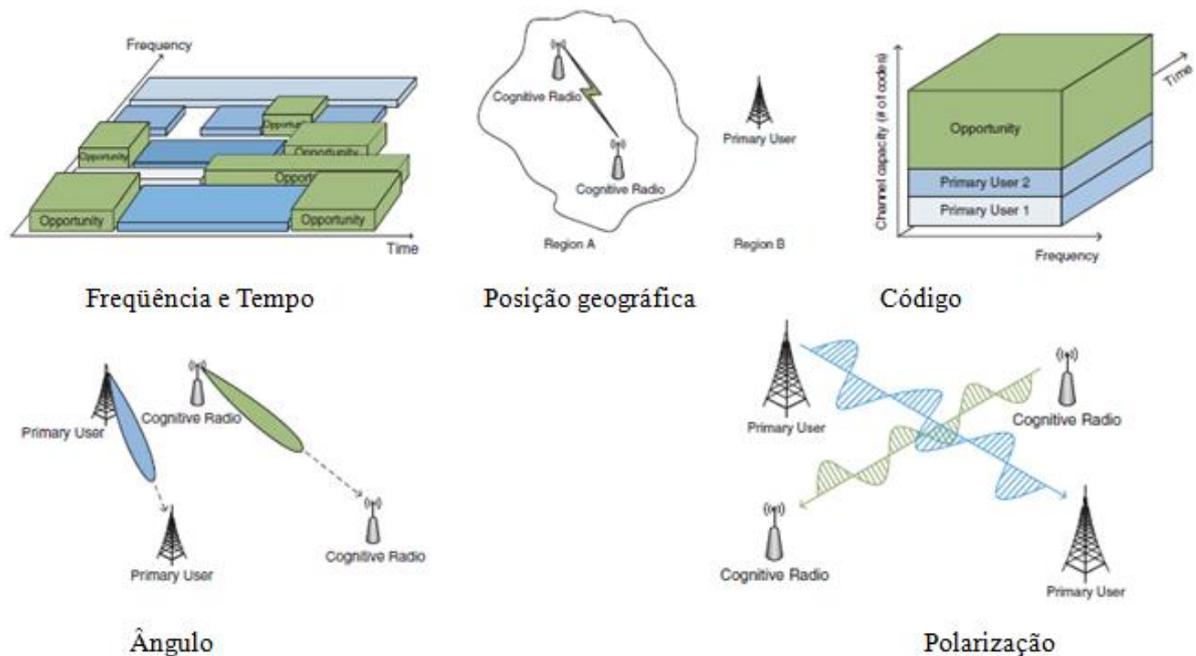
**Posição geográfica:** Localização entre dispositivos e redes (latitude, longitude e elevação), considera a distância entre os dispositivos. A atenuação do sinal é um fator favorável neste caso;

**Código:** O código de espalhamento, tempo de salto, ou salto de frequência usado pelos usuários primários. Informação de tempo é necessária para sincronização.

**Ângulo:** Utiliza a medida da direção de chegada do sinal do usuário primário. O objetivo é verificar a disponibilidade de transmissão em diferentes direções, sem sobrepor o sinal do usuário primário;

**Polarização do sinal:** Avalia a medida da polarização e a forma de onda do sinal do usuário primário. É necessário identificar a forma de onda utilizada nos sinais captados do ambiente para permitir uma transmissão com sinal ortogonal.

A Figura 9 ilustra as dimensões descritas.



**Figura 9. Dimensões do espectro de rádio. (Adaptado de YUCEK, 2009).**

O processo de sensoriamento do espectro pode incluir uma ou um conjunto de dimensões para determinar a oportunidade de utilização dos espaços vazios. Entretanto, cada dimensão possui parâmetros próprios de sensoriamento acarretando em sistemas de detecção distintos e complexos.

## 2.5.2 MÉTODOS DE SENSORIAMENTO DE ESPECTRO

Alguns trabalhos como o de (AKYILDIZ, 2011) e (YUCEK, 2009) fazem um levantamento dos métodos de sensoriamento de espectro mais comumente encontrados na literatura. Nesta seção estes métodos são descritos de forma mais detalhada:

### 2.5.2.1 Filtro Combinado

Este é um poderoso mecanismo de sensoriamento e identificação de outros padrões de comunicação sem fio. Entre as vantagens deste método estão à rápida resposta para uma

probabilidade de alarme falso e sua capacidade de aumentar a relação sinal ruído. Por outro lado, este método requer a demodulação do sinal detectado, o que por sua vez requer um conhecimento prévio do sinal, por exemplo, frequência de operação, largura de banda, formato dos quadros, tipo de modulação, entre outras. Esta característica implica em uma implementação complexa, considerando a ampla gama de possíveis sinais existentes. Outra grande desvantagem é o consumo de energia que é elevado para tal tipo de sistema.

#### **2.5.2.2 Sensoriamento baseado na forma da onda**

Necessita de um período curto de detecção e é baseado na detecção de padrões de sinais utilizados durante etapa de sincronização. A maioria dos padrões de comunicação sem fio existentes utilizam sinais de sincronização, tais como, o preâmbulo e sequência de espalhamento. A partir da detecção de um padrão, o reconhecimento é feito por meio de uma correlação com o sinal conhecido. Este método é aplicado somente para sistemas de padrões conhecidos, em que o usuário secundário assume que o sinal do usuário primário possui um padrão perfeitamente conhecido. Sensoriamento baseado na forma de onda é uma versão simplificada do método de filtro combinado. Da mesma forma que o sensoriamento por filtro combinado, o método por detecção baseado em forma de onda também necessita de um amplo conhecimento dos padrões existentes. Carregar características de diversos padrões implica em possíveis dificuldades para o processo de correlação das informações. Outra característica relevante é a necessidade de sincronização entre o usuário primário e o detector, erros de sincronização podem degradar o desempenho da detecção severamente (CHANG, 2012).

#### **2.5.2.3 Sensoriamento baseado em ciclo-estacionário**

O método de sensoriamento por meio da detecção de processos ciclo-estacionário é baseado nas propriedades estatísticas de um determinado sinal que varia ciclicamente no tempo. O processo ciclo-estacionário é capaz de diferenciar um sinal de ruído de um sinal de padrões de comunicação. Os ruídos são detectados como sinais amplo estacionários sem

nenhuma correlação, ao contrário de sinais modulados que são ciclo-estacionário com correlação espectral pela redundância da periodicidade do sinal. Neste método deve-se considerar também que diferentes padrões de comunicação possuem diferentes características ciclo-estacionários. Através de um conhecimento amplo das características de outros padrões a detecção pode ser mais precisa, por outro lado desenvolver estas informações pode ser uma tarefa complexa. O sensoriamento baseado no método ciclo-estacionário, não desempenha bons resultados quando o ruído é estacionário aumentando a incerteza de detecção do método (TANDRA, 2007).

#### **2.5.2.4 Sensoriamento por detecção de energia**

O método de detecção de energia é considerado uma técnica simples de sensoriamento de espectro. É o método mais utilizado em estudos de sensoriamento de espectro (PAWELCZAK, 2011). Apresenta critérios de baixa capacidade computacional e uso de poucos recursos. Outra característica favorável deste método é a não necessidade de conhecimento prévio de padrões de comunicação. Geralmente é utilizado com critérios de limiar de detecção que, quando comparados à energia medida, levam a uma classificação de canal que pode ser ocupado ou livre. Entretanto, em troca às características de simplicidade do método, a detecção de energia apresenta um desempenho inferior em relação aos métodos discutidos anteriormente. O método não é capaz de diferenciação entre sinais modulados, ruído e interferência. O desempenho de detecção de energia é relacionado pela potência do sinal de ruído, potência do sinal e pelo tempo de detecção, em que baixa potência de ruído, alta potência de sinal e tempos longos de detecção apresentam melhores resultados. A escolha de um limiar adequado minimiza uma decisão errada.

O método de detecção de energia assume o modelo de hipóteses demonstrado nas equações (3) e (4) para um determinado sinal recebido:

$$\mathcal{H}_0: (t) = n(t), \quad (3)$$

$$\mathcal{H}_1: (t) = x(t) + n(t) \quad (4)$$

Onde,  $x(t)$  é o sinal interferente (outra rede de comunicação sem fio) e  $n(t)$  é o ruído branco gaussiano.  $H_0$  é uma hipótese nula, significa que não há sinais interferentes presentes na faixa medida, enquanto  $H_1$  significa a presença de outros sinais. As estatísticas de detecção podem ser definidas por meio de uma média da energia medida para uma quantidade  $N$  de amostras (equação 5).

$$T = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |y(t)|^2 \quad (5)$$

A decisão quanto ao espectro estar ocupado ou não pode ser feito por meio de comparações com as análises estatísticas de  $T$ , a partir de um limiar pré-determinado  $\lambda$ . O desempenho da detecção por energia é caracterizado por duas probabilidades: a probabilidade de falso alarme  $P_F$  e a probabilidade de detecção  $P_D$ . A  $P_F$  denomina a probabilidade de a hipótese decidida ser  $H_1$  enquanto na verdade é  $H_0$  (equação 6).

$$P_F = P_r(T > \lambda | \mathcal{H}_0) \quad (6)$$

$P_D$  denomina a probabilidade de o teste decidir corretamente  $H_1$  (equação 7).

$$P_D = P_r(T > \lambda | \mathcal{H}_1) \quad (7)$$

Um bom detector deve garantir uma probabilidade alta de detecção de  $P_D$ , e resultados baixos para  $P_F$ . Alguns trabalhos, como em (TAHERPOUR, 2008), propõem métodos de determinar um limiar dinâmico a partir da variância do sinal de ruído, utilizando algoritmos para estimar de forma mais acurada a variância do ruído no ambiente. Ainda, há a possibilidade de utilizar métodos sem dependência da variância do sinal de ruído, como no trabalho de (ZENG, 2008), que utiliza algoritmos de detecção com resultados semelhantes a métodos que utilizam a variância do sinal de ruído, mas necessita de suposições para ser aplicado.

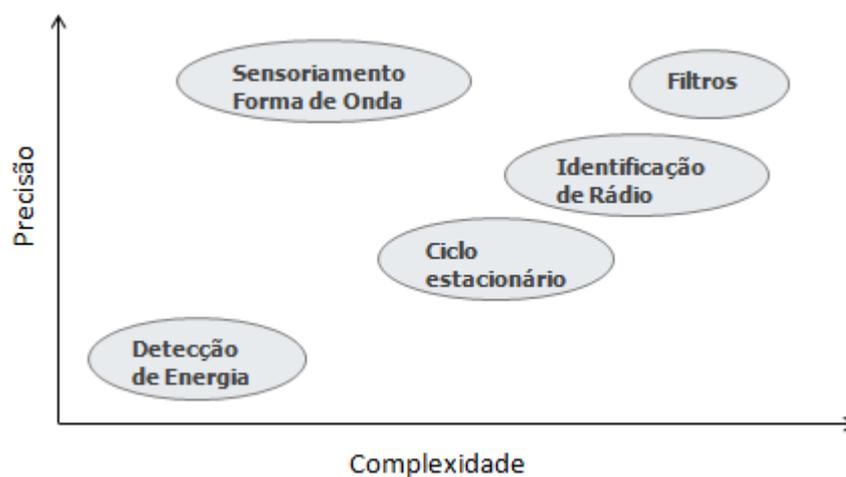
#### 2.5.2.5 Identificação por rádio

Este método extrai diferentes características do sinal recebido (frequência de transmissão, alcance, técnica de modulação, etc.), e o classifica em relação à tecnologia

utilizada. O objetivo é identificar a presença de alguma tecnologia de transmissão conhecida e realizar comunicação por meio dela. Este processo é baseado no uso de diferentes métodos, tais como, detecção de energia, redes neurais, algoritmos de classificação, etc., tornando-o um método com alta complexidade. Esta técnica de extração e classificação está sendo utilizada dentro do contexto do projeto europeu TRUST (*Transparent Ubiquitous Terminal*) (FARNHAM, 2000), com o objetivo de identificar a presença de sinais de tecnologias conhecidas e estabelecer comunicação através delas.

#### 2.5.2.6 Outros métodos

Ainda há alternativas menos comuns para sensoriamento de espectro, muitas delas são variações inspiradas nas técnicas mencionadas acima. O trabalho de (WANG, 2011) lista algumas destas técnicas. A Figura 10, ilustra uma relação entre precisão e complexidade entre os principais métodos apresentados.



**Figura 10. Principais métodos de sensoriamento de espectro, relação entre precisão e complexidade. (YUCEK, 2009).**

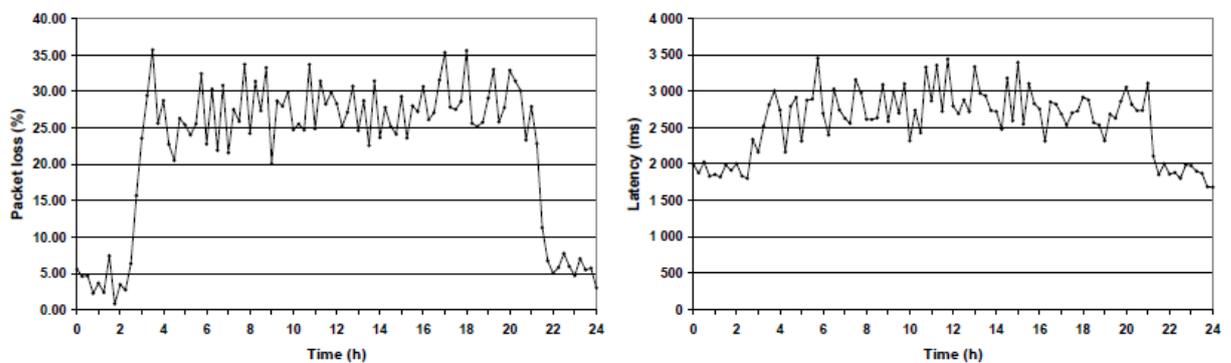
### 3 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica em relação aos trabalhos anteriormente realizados, os quais foram julgados relevantes para a realização desta pesquisa. Primeiramente são analisados trabalhos que abordam questões de coexistência no protocolo WH, pois este é o protocolo abordado neste trabalho. Na sequência são analisados trabalhos que propõem mudanças e melhorias no padrão WH, tendo como objetivo a identificação de oportunidades de pesquisa. Finalmente são abordados trabalhos relacionados a redes cognitivas de sensores sem fio para aplicações na indústria, com o objetivo de identificar métodos aplicados e estudos utilizados na teoria das redes cognitivas dentro dos requisitos de comunicação em automação de processos.

#### 3.1 *WirelessHART* e Coexistência em Redes Sem Fio

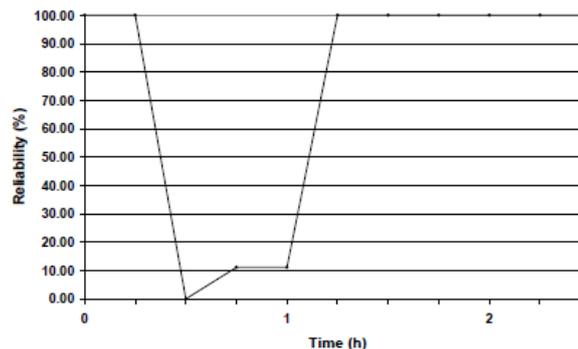
Uma das grandes desvantagens das redes de comunicação sem fio é a sua suscetibilidade a interferências a ondas eletromagnéticas causadas por equipamentos, fenômenos meteorológicos ou por outros padrões de comunicação sem fio que possam coexistir em uma mesma área de cobertura. O uso redes de comunicação sem fio em aplicações críticas tais como as da indústria, exigem tecnologias que sejam robustas dentro de diferentes condições de operação. O entendimento dos limites e níveis de confiabilidades é parte importante do processo de utilização de tais tecnologias. Para avaliar coexistência entre redes sem fio, diferentes cenários são propostos na literatura podendo, segundo (GOLMIE, 2006), ser classificados em pelo menos três categorias: análise, simulação ou métodos experimentais. Usualmente estes têm como objetivo quantificar medidas de desempenho de comunicação. São destacados nesta seção os trabalhos que tratam diretamente de análise de desempenho com o WH.

É usual o ambiente físico industrial apresentar muitos desafios em relação à propagação de RF. Instalações típicas apresentam grandes estruturas, muitas vezes com diversos níveis para as diferentes etapas do processo, construções com aço e concreto, tanques, vasos, equipamentos geradores de campos eletromagnéticos como, motores e compressores, além de malhas de cabos conduzindo energia elétrica para alimentação dos diversos dispositivos de campo. Buscando avaliar o desempenho de uma rede WH em um cenário semelhante, o trabalho de (PETERSEN, 2009) monitorou o desempenho de uma rede WH sob condições de coexistência com o protocolo IEEE 802.11b. As métricas utilizadas foram: Latência, o tempo médio em que uma mensagem leva até alcançar o gerenciador de rede; Estabilidade, o percentual de pacotes transmitidos com sucesso na rede e; Confiabilidade, representando o percentual de pacotes esperados pelo gerenciador de rede que são recebidos com sucesso. Os resultados demonstram que durante a inserção do padrão interferente, no intervalo de 2h45min até 21 horas do período de teste, ocorre redução de estabilidade, e aumento de latência na rede, entretanto a confiabilidade da rede não é afetada, ou seja, todos os pacotes esperados foram entregues com sucesso. Após a interrupção da interferência, últimas três horas, percebe-se a recuperação da rede. A Figura 11 ilustra respectivamente as medidas obtidas do percentual de perda de pacotes e da variação da latência durante a análise.



**Figura 11. Perda de pacotes e latência gerada no WH por interferência IEEE802.11. (PETERSEN, 2009).**

O trabalho também monitora a confiabilidade da rede e demonstra que apesar das perdas registradas e o aumento da latência, ocasionadas pela interferência, os mecanismos de redundância do WH conseguiram garantir a entrega dos pacotes. A situação também permite concluir que se houve possibilidade de entrega de mensagens, certamente havia oportunidades de transmissão em que a interferência não afetava o sinal transmitido e, em um cenário ótimo, haveria possibilidade de conduzir todas as transmissões dentro destas oportunidades e assim minimizando as perdas. No mesmo experimento, foi trocado o padrão interferente por uma interferência causada por um *chirp jamming*. Programado para inserir interferência em períodos de 10ms com uma distância aproximada de 1m do gateway WH. A Figura 12 ilustra os resultados.



**Figura 12. Confiabilidade no WH com interferência de *jamming*. (PETERSEN, 2009).**

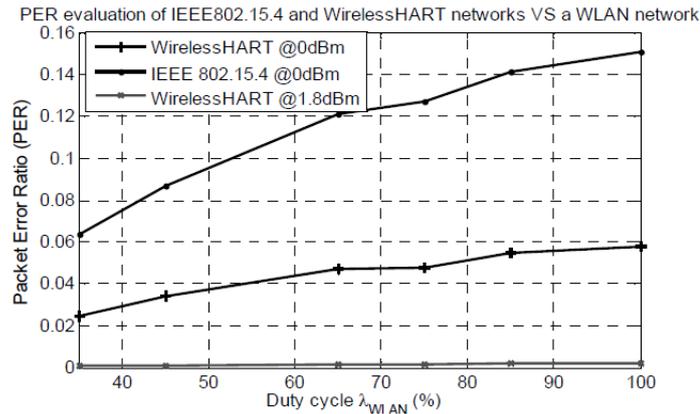
Pode-se observar que no intervalo de aplicação da interferência, ativado após 15min e desativado após 45min do teste, a comunicação da rede WH foi significativamente degradada. A interferência chegou em alguns momentos a destruir totalmente a comunicação da rede registrando uma confiabilidade de 0% (nenhum pacote entregue). Esta condição de ensaio pode ser classificada como "piores caso", termo utilizado por (POLLIN, et al., 2008) que caracteriza condições severas de coexistência por meio de quatro parâmetros: i) sobreposição de canais; ii) alta taxa de utilização da rede; iii) proximidade entre os dispositivos concorrentes e; iv) uma alta potência de transmissão interferente, sendo semelhante a situação proposta, considerando as distâncias entre os dispositivos, o período de transmissão e a

largura de banda utilizada no *jammer*. Este último cenário é pouco provável dentro de um cenário real, concorrendo com outro padrão, no entanto este resultado é importante para uso contra-ataques maliciosos.

O trabalho de (WINTER, 2013), apresenta um conjunto de ferramentas para avaliar o desempenho do protocolo WH em condições de coexistência. Diferentes ensaios foram realizados em redes reais com os padrões IEEE 802.11g, IEEE 802.15.1 e com o próprio padrão WH. Os resultados demonstram que a rede WH é prejudicada sob certas condições de coexistência variando a intensidade da degradação em função do tamanho dos pacotes e do nível de ocupação dos elementos interferentes, chegando a apresentar perdas de até 35% dos pacotes transmitidos em condição de interferência. No entanto, nos cenários propostos com aplicações mais próximas da realidade (distribuição de dispositivos, níveis de potência, taxas de transmissão e canais utilizados), apesar das perdas registradas o nível de confiabilidade do protocolo manteve-se em 100%, ou seja, garantiu a entrega de dados dentro dos requisitos temporais propostos. As análises também demonstram que, quanto menor o requisito temporal, menor o número de conexões disponível e maior as chances de não atendimento do período determinado para a entrega das mensagens, uma importante consideração que deve ser avaliada em função dos requisitos de controle de um determinado processo.

Alguns trabalhos têm avaliado a perturbação em redes de 2.4 GHz por meio de simuladores como em (DOMINICS et al., 2009) e em (NOBRE, et al., 2011). O primeiro apresentou o desenvolvimento de um simulador, (utilizando as camadas PHY e MAC) para investigar a coexistência da rede WH, mais especificamente as diferenças de desempenho entre uma rede tradicional de IEEE 802.15.4 e uma rede WH contra uma rede do padrão IEEE 802.11. Os ensaios utilizaram uma rede WH composta por três dispositivos e duas estações para a WLAN, sendo os dispositivos WH distribuídos em torno do ponto de acesso por uma distância com aproximadamente 2 metros de raio. A principal métrica utilizada foi a taxa de

erro de pacotes, sendo considerada uma colisão cada coincidência temporal durante a utilização de uma mesma faixa de frequência. Os resultados demonstram que a rede WH apresenta menor degradação em relação a uma tradicional rede de sensores sem fio IEEE 802.15.4, realçando as características introduzidas na DLL do padrão WH. A Figura 13 ilustra a relação de perda de pacotes da rede WH e da rede IEEE 802.15.4, para diferentes taxas de ocupação do padrão interferente. Este trabalho também demonstra a sensibilidade da robustez em relação aos níveis de potência utilizados, em que a rede com potência de transmissão mais alta é menos suscetível a perdas em relação a rede de menor potência. No trabalho de (NOBRE, et al., 2011) é construído um módulo da camada física do WH utilizando o Simulador de Rede NS-3. No modelo são consideradas as características do dispositivo de transmissão (potência de transmissão, detecção de sinal e mobilidade), assim como as características do acesso ao meio, tais como o uso dos 15 canais suportados pelo protocolo e o modelo de perda por propagação e erro. Para o modelo de propagação livre a taxa de perda de pacotes foi mensurada para pacotes de 6, 9, 18, 90 e 133 bytes, sendo aproximadamente de 1,3%, 1,4%, 1,6%, 2,4% e 3,2% respectivamente. O trabalho demonstra que há perdas provenientes do cenário de propagação, não necessariamente causadas por colisão com outros padrões interferentes. Os modelos de simulações apresentam grande flexibilidade e são uma alternativa de baixo custo, sendo provavelmente o método mais utilizado, porém muitas vezes negligenciam características das condições de um cenário real. Alguns efeitos são muitas vezes difíceis de modelagem e acabam sendo suprimidos como, por exemplo, os efeitos de canais adjacentes, como demonstrado em (PETROVA, 2006) que realizou uma análise entre os padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11 e demonstrou que ocorrem perdas mais significativas no IEEE 802.15.4 quando as distâncias entre as frequências centrais são menores do que 7 MHz.



**Figura 13. Taxa de erro de pacotes para o WH e o IEEE802.15.4. (DOMINICS, 2009).**

O trabalho de (WINTER, et al., 2014), trata sobre coexistência em redes industriais e propõem um modelo de probabilidade de colisões de pacotes IEEE802.15.4 e IEEE802.11, o qual é avaliado por meio de três experimentos. Principais resultados demonstram uma relação de sobreposição de interferência com os níveis de intensidade de sinal capazes de corromper pacotes IEEE 802.15.4. Na condição de sobreposição total demonstrou-se a necessidade de um sinal com pelo menos 14.1dBc em relação ao sinal interferente para não haver perdas. Também foi demonstrado que ocorrem perdas no IEEE 802.15.4 mesmo com uma distância de 10MHz entre os sinais, neste caso a partir de uma diferença de -23.9dBc. Os resultados desta análise podem auxiliar algoritmos de seleção de canais.

Alguns trabalhos como o apresentado em (LINDAU, 2013), alertam sobre a necessidade de uma pré-análise no local de instalação de sistemas baseados em comunicação por redes sem fio. Esta análise consiste na varredura do espectro para a detecção de pontos de acesso, identificação de níveis de ruído e outras possíveis interferências indesejadas. O trabalho também apresenta uma ferramenta de baixo custo para pré-análise em locais de instalação de uma rede sem fio WH. O sistema é composto por um conjunto de rádios que devem ser distribuídos no local de instalação dos dispositivos WH e, a partir do nó central, uma aplicação é executada e analisa de forma rápida a qualidade da conexão para os pontos avaliados. A principal métrica utilizada é o LQI, métrica incorporada no IEEE 802.15.4, esta métrica fornece uma medida que representa a qualidade do sinal para ser demodulado pela

acumulação do erro entre os símbolos recebidos. O uso de ferramentas de análise de instalação é sempre recomendado antes da instalação dos dispositivos de uma rede sem fio, entretanto acabam sendo ineficientes quanto às mudanças no ambiente pós-instalação, mantendo a difícil tarefa de coexistência entre redes sem fio.

### 3.1.1 COMENTÁRIOS

A literatura apresenta muitas pesquisas e resultados envolvendo a análise de alguns parâmetros relacionados ao desempenho de redes IEEE 802.15.4 em relação a outros padrões que operam na mesma faixa de frequência. Porém trabalhos específicos com o protocolo WH ainda são poucos, especialmente trabalhos que elaboram testes em cenários reais. Nesta seção estes trabalhos foram destacados considerando que, apesar do protocolo WH ser baseado no IEEE 802.15.4, existe diferenças significativas entre ambos os padrões. Os resultados de desempenho são variados, isso se deve principalmente à dificuldade de caracterizar nos modelos de testes utilizados todos os parâmetros envolvidos em um sistema de comunicação sem fio, além de cada cenário possuir características próprias que influenciam as condições de propagação RF. Baseado nos resultados dos estudos apresentados pode-se concluir que a rede WH é robusta e consegue suportar alguns tipos de coexistência, permitindo a entrega de pacotes nestas situações. Segundo o trabalho de (DOHERTY, 2006) a robustez de uma rede WH é tipicamente maior que  $3\sigma$  (99,73002%). Entretanto em condições de coexistência fica claro que a rede é afetada de uma forma desfavorável. Os resultados demonstram aumento na taxa de perda de pacotes, retransmissões e latência da rede. Este desempenho gera outras consequências indesejáveis, tais como o aumento do consumo de energia dos dispositivos e a diminuição da duração da bateria. Ainda, é importante destacar que apesar das perdas, a rede na maioria dos casos, consegue em algum instante entregar a mensagem, seja por um conjunto de canais diferentes e ou por caminhos diferentes em que, no padrão atual, são rearranjados de forma aleatória e sem métricas concisas.

### 3.2 Trabalhos com o *WirelessHART*

Desde o lançamento do protocolo WH, em 2007, diversos trabalhos foram elaborados com o objetivo de avaliar as características de robustez, identificar pontos fracos e testar novas soluções para o protocolo. Nesta revisão são avaliados os principais trabalhos encontrados, durante esta pesquisa, relacionados com ferramentas e análise de recursos do protocolo WH.

Contrário à tendência de descentralização de redes *ad-hoc*, como a arquitetura WH proposta no trabalho de (MULLER, 2012), o WH tradicionalmente assume toda a complexidade de garantir a confiabilidade da rede a partir de uma entidade centralizada, o gerenciador de rede. A norma HART, apesar de apresentar algumas orientações e requisitos, não determina como deve ocorrer o escalonamento das comunicações, sendo este ainda um grande desafio para gerenciar o melhor aproveitamento dos recursos. No trabalho de (DANG, 2012), é discutido o agendamento de mensagens baseado no uso simultâneo de múltiplos canais. É verificado que por meio do uso de conexões redundantes baseadas em canais livres, a latência de comunicação é reduzida em relação às conexões redundantes tradicionais, em que é utilizado apenas um canal por vez. O uso de múltiplos canais pode ser simplificado em um aumento de recursos na rede, o que amplia a capacidade de comunicação além da possível redução da latência da rede. Apesar deste grande benefício o trabalho apenas tem uma abordagem analítica sobre esta condição, assim como não apresenta muitos detalhes para tal gerenciamento e, também, não avalia as mudanças e requisitos em nível de hardware necessários para o uso de múltiplos canais, tais como a adição de mais pontos de acesso ou de dispositivos de campo com múltiplas interfaces de RF.

Ainda, outros trabalhos apresentam estudo em técnicas de escalonamento que possam trazer mais eficiência no uso dos recursos disponíveis pelo WH, como no trabalho de (DICKOW, 2013), em que são avaliados diferentes algoritmos de escalonamento e

comparados com os principais critérios do WH. Nos algoritmos avaliados, *Convergecast Line One Buffer*, *Convergecast Line Multiple Buffer* e no *Conflict-aware Least Laxity First*, embora demonstrado que apresentam algumas vantagens pontuais, nenhum atendeu inteiramente os requisitos da norma especialmente requisitos como de retransmissão em caminhos redundantes. A ferramenta de análise de escalonamento proposta em (KUNZEL, 2012), utiliza o analisador WH desenvolvido em (HAN, et al., 2009), e permite avaliar diferentes aspectos da rede, tais como, o uso de recursos e estratégias de roteamento. A ferramenta é passiva, não interferindo na rede, e pode ser utilizada para posterior análise de desempenho de novas características eventualmente adicionadas no padrão como, por exemplo, desempenho de novos algoritmos de escalonamento e identificação de falhas na rede.

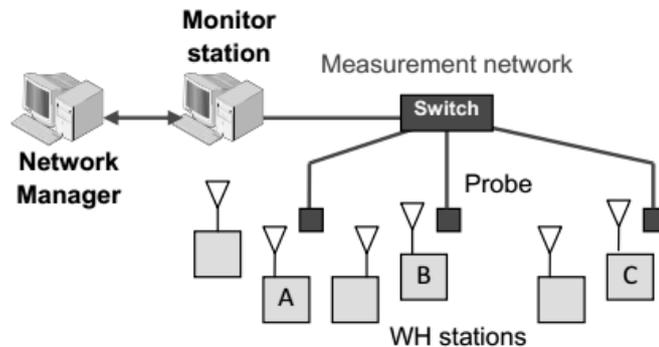
O Wi-Analys, ferramenta desenvolvida em (HAN et al., 2009), é um analisador de protocolo desenvolvido para capturar as mensagens, registrar os dados e medir as temporizações durante a comunicação entre os dispositivos de uma rede WH. O hardware é composto por 15 transceptores, compatíveis com o IEEE 802.15.4, conectados em uma única antena por intermédio de divisores de sinal RF. A unidade coletora deve ser conectada a um servidor, onde são armazenadas as informações obtidas para posterior análise. Esta ferramenta deve ficar dentro da área de cobertura dos dispositivos da rede para poder obter todos os dados e tem como principal aplicação auxiliar projetistas no desenvolvimento e validação do protocolo WH, não apresentando nenhuma relação de compartilhamento de dados com o gerenciador da rede WH, a área de cobertura limitada aos dispositivos próximos da ferramenta também é um fator limitante da ferramenta.

Em (LORENÇATO, et al., 2013) foi desenvolvida uma ferramenta de análise de redes WH, com o propósito de realizar o monitoramento dos dados da rede. A ferramenta possui uma unidade coletora integrada em um dispositivo de campo WH, que desenvolve as funções

de sintonização de canal, registro das mensagens WH e armazenamento dos dados coletados. Uma característica diferenciada nesta ferramenta é a capacidade de enviar os dados coletados através da própria rede WH até a administração remota da unidade. A unidade de gerenciamento desta ferramenta possui conexão com o gerenciador de rede e é responsável por obter e prover à unidade coletora informações de todas as conexões existentes entre os dispositivos da rede. Por meio das informações obtidas o dispositivo coletor é capaz de saltar sempre para o canal em que está ocorrendo uma transação WH. O autor alerta para a redução da banda da rede em função do grande acréscimo de tráfego para obtenção de dados de recursos da rede assim como para leitura dos dados obtidos pelo dispositivo de coleta. Outra abordagem para o rádio coletor avaliada pelo autor é a possibilidade de converter o hardware para um dispositivo transmissor, logo que este conhece os tempos e canais em que devem ocorrer as comunicações, pode ser um dispositivo adequado para analisar coexistência de forma mais determinística entre redes WH.

Obter dados de forma não invasiva em uma rede WH é um desafio e pode-se classificar de forma geral dois métodos: i) obter informações diretamente do gerenciamento da rede ou; ii) através de um sistema com múltiplas entradas de RF e distribuídos dentro do perímetro de cobertura da rede. O trabalho de (FERRARI et al., 2009), propõem uma solução distribuída de *sniffers* com múltiplas sondas conectadas com o uso de uma complexa estrutura de cabos *ethernet* e *switches Gigabit*, levando as informações captadas até a aplicação de monitoramento. Mecanismos severos de sincronização das sondas tiveram que ser implementadas em razão de múltiplas leituras de uma mesma informação simultaneamente. Este trabalho sugere o uso dos dados coletados para realimentar o gerenciador de rede WH auxiliando-o no processo de manutenção e ajustes da rede. Em aplicações em campo fabril esta ferramenta, para o uso na realimentação de dados para o gerenciador de rede, deve ser de

difícil implementação, principalmente pela característica da necessidade da estrutura de cabos. A Figura 14 ilustra a arquitetura proposta.



**Figura 14. Arquitetura proposta em (FERRARI, 2009).**

No trabalho de (MACHADO, 2014), é proposto uma ferramenta que captura as mensagens de uma rede WH e ainda mede a energia presente durante as transmissões de mensagens na rede. A ferramenta utiliza dois rádios IEEE 802.15.4 fisicamente conectados. O primeiro, denominado rádio coletor, tem a função de capturar as mensagens WH da rede dentro da área de cobertura do dispositivo. O segundo rádio, denominado *tracker*, tem a função de gravar os dados capturados pelo rádio coletor em um cartão de memória e ainda processar a detecção de energia nos canais na ocorrência de mensagens. A ferramenta está integrada em um dispositivo WH modificado que passa as informações dos espaços de tempo (*slots*) e o canal em que ocorrem as transmissões. Os dados obtidos são utilizados para uma análise posterior na ferramenta desenvolvida em (KUNZEL, 2012), permitindo realizar uma análise do desempenho da rede e condições de operação. Algumas limitações do sistema estão na necessidade de o dispositivo ser o primeiro a se conectar à rede WH, com o objetivo de poder capturar as chaves de rede atribuída aos outros dispositivos para posterior decifração dos dados. Outra dificuldade está em tratar as informações de energia obtidas do sistema, uma vez que estas são obtidas sempre na ocorrência de mensagens WH e proveniente de dispositivos com diferentes distâncias do rádio *tracker*.

Já o trabalho de (DE DOMINICS, et al., 2010) propõe o desenvolvimento de um ponto de acesso WH por meio de uma plataforma de software definido por rádio SDR (*Software Defined Radio*). O objetivo é desempenhar as etapas de modulação/demodulação inteiramente em software e propiciar diagnósticos do uso do espectro da rede. Há duas partes que compõem o ponto de acesso: o transceptor dedicado ao WH e a parte responsável pela varredura do espectro. Utilizando a plataforma GNU Radio, software aberto com bibliotecas desenvolvidas em C++, o autor desenvolveu um modelo e simulou um ponto de acesso WH. Os resultados demonstram um espectrograma apresentando a captação de outros sinais inseridos como interferência durante a simulação. O conceito demonstrado tem grande potencial, considerando que por intermédio de uso de um SDR pode-se alterar as características do *front-end* de RF ampliando as possibilidades de adaptação da rede. Entretanto, para a efetividade de tal mecanismo seria necessário também ampliar as possibilidades de adaptação dos dispositivos de campo WH e, ainda, ficam em aberto as considerações para incluir dinamicidade em tais características da rede sem afetar as comunicações correntes. O trabalho não apresenta meios para integrar as informações de diagnóstico da rede na arquitetura do WH, o diagnóstico da rede fica limitado à área de cobertura do ponto de acesso. Outra consideração que deve ser feita é o alto custo de uma plataforma SDR.

O trabalho de (MULLER, 2012) propõe uma mudança na arquitetura do WH. Por meio do uso de coprocessadores gerenciadores baseados em hardware, é viabilizado uma arquitetura descentralizada. O sistema proposto permite diferentes configurações descentralizadas, parciais ou totais, e com mínimas modificações no protocolo original. Os principais ganhos desta arquitetura estão nas reduções dos tempos de associação dos dispositivos, manutenção e comunicações fim-a-fim. A característica de descentralização permite maior dinamicidade na rede, possibilitando a mudança dos agendamentos em tempos

inferiores à arquitetura tradicional. Apesar das vantagens, o trabalho não avalia possibilidades de interferência na rede, o que deve ser levado em consideração, especialmente quando a distribuição dos recursos deixa de ser centralizada. Outro ponto, talvez desfavorável, é a inserção de dispositivos de campo diferenciados, necessários para a execução de funções do gerenciador de rede. Entretanto, através da descentralização que permitiu maior dinamicidade na distribuição de alguns dos recursos da rede, demonstrou que existem possibilidades de otimização na rede WH e, que com o melhor gerenciamento destes, pode-se ter ganhos significativos.

Alguns trabalhos como o (SANGREGORIO, 2014) e (HAN, et al., 2010), analisam implementações de controle através de uma rede WH e apontam para as restrições temporais em redes de sistemas de controle como, por exemplo, a relação entre o atraso máximo permitido em relação à taxa de amostragem da planta. Outro ponto é o fato dos dados, mesmo sendo publicados periodicamente, chegarem ao destino com diferentes atrasos e inclusive fora de ordem. Uma alternativa para mitigar estas características é um gerenciamento de recursos capaz de prover mais oportunidades de comunicação. Para o dispositivo publicar dados periodicamente e de forma determinística, o dispositivo de campo deve requisitar um serviço de *burst*, desta forma o gerenciador de rede distribui uma quantidade de conexões de modo a satisfazer o período de publicação, mesmo no caso de algumas perdas. Para aplicações de controle, também é necessário o recebimento de mensagens por parte do dispositivo de forma periódica e determinística (serviço *sink*). A norma Hart permite a solicitação deste serviço, entretanto para a garantia do recebimento dos dados o gerenciador de rede deve prover novamente uma quantidade de conexões, com redundâncias, para possibilitar a entrega da mensagem. Esta condição acarreta em maior uso dos recursos da rede e por consequência limitação da banda. Os gerenciadores de rede WH disponibilizados no mercado, até o presente momento, não fornecem o serviço de publicação *sink*, tal configuração deve afetar a

capacidade de dispositivos na rede. Estas condições devem atender algumas aplicações de controle, como demonstrado no trabalho de (SANGREGORIO, 2014), entretanto não se pode garantir a periodicidade constata das mensagens destinadas aos dispositivos.

No trabalho de (JIN, 2017) é proposto um framework com o objetivo de aumentar a confiabilidade da rede na ocorrência de coexistência com outra rede WH, a proposta busca manter a comunicação entre as diferentes redes WH, por meio de uma aplicação coordenadora e realizar a distribuição de diferentes grupos de canais para as redes distintas de forma a reduzir a colisão de pacotes. A implementação foi simulada e apresentou reduções na ordem de 36% quanto a perda de pacotes provenientes de colisões por interferência WH.

### 3.2.1 COMENTÁRIOS

O *WirelessHART* é uma tecnologia que vem ganhando espaço, sendo um destaque em relação as soluções de comunicação para processos industriais, especialmente com as tendências industriais para a transformação digital da atualidade, também conhecida como Indústria 4.0. Dentro deste cenário esta tecnologia ainda apresenta muitas pesquisas em andamento. A literatura apresenta trabalhos em diferentes linhas, tais como, escalonamento, ferramentas de análise, controle, localização, consumo de energia e coexistência. Muitos trabalhos referem-se a ferramentas capazes de obter dados da rede, enquanto outros apontam para propostas de melhorias na utilização dos recursos, por exemplo, por meio das estratégias de escalonamento ou por inserção e adaptação de novos dispositivos. Também fica claro em alguns trabalhos a demanda para o uso mais eficiente dos recursos da rede, como apresentado nos trabalhos relacionados a aplicações de controle de processos. Apesar dos trabalhos que apresentam ferramentas de diagnósticos e de estratégias de roteamento, ainda não há nada consolidando ambas as linhas e aplicado de forma efetiva na operação do protocolo. O protocolo impõe desafios nesse contexto, alguns intrínsecos as características de redes sem fio como, a ampla distribuição dos equipamentos o que dificulta o monitoramento uniforme das

condições da rede através de arquiteturas centralizadas e; outros desafios peculiares da arquitetura do protocolo WH, como a dinamicidade e velocidade de possíveis readaptações do uso de recursos da rede sem danos as comunicações correntes. A partir desta análise é possível concluir que ainda há bastante espaço para desenvolvimento e aplicação de melhorias no padrão WH, especialmente na área de gerenciamento ativo dos recursos utilizado para condições de coexistência de fontes interferentes.

### **3.3 Redes Cognitivas em Aplicações Industriais**

A abordagem tradicional de utilização de faixas fixas do espectro e a popularização da comunicação sem fio levou ao surgimento de dois cenários: a sobreutilização e a subutilização dos recursos do espectro. O uso ineficiente dos recursos implica em dificuldades para aplicações que requerem confiabilidade e garantias temporais na troca de mensagens dentro de um determinado processo. Estas questões têm motivado o conceito de compartilhamento dinâmico do espectro por intermédio de rádios cognitivos, o que possibilita um melhor gerenciamento destes recursos. Redes de sensores sem fio de baixo custo e baixo consumo têm sido estudadas para diferentes aplicações, tais como, monitoramento de desastres naturais, automação residencial, sobrevivência, agricultura e aplicações industriais. Dentro deste cenário o conceito de RCs foi expandido e abordado dentro do conceito de redes de sensores sem fio, resultando nas redes cognitivas de sensores sem fio. No cenário industrial, além das questões de compartilhamento do espectro outras características devem ser levadas em consideração, tais como, comunicação determinística, confiável e segura. Este capítulo aborda alguns dos trabalhos encontrados na literatura que buscam esta intersecção entre RCs e redes industriais.

O trabalho de (HUANG, 2012) avalia a relação entre o desempenho de sensoriamento em relação à taxa de transferência em redes cognitivas. O objetivo do trabalho é minimizar o

consumo de energia para o sensoriamento do espectro sem alterar as taxas de probabilidade de detecção e de probabilidade de falsa detecção, o modelo de estudo considera uma rede com dispositivos repetidores. Para os dispositivos repetidores são estudados um conjunto de parâmetros "ótimos", como o número necessário de amostras (proporcional ao tempo de monitoramento), para um desempenho mínimo. O trabalho contribui na identificação de um conjunto de parâmetros, tais como, número de amostras e ganho de amplificação, que atingem a melhor relação custo benefício entre desempenho de sensoriamento e consumo de energia, demonstrado por meio de resultados analíticos e simulados.

O desempenho do sensoriamento de espectro cooperativo com múltiplas antenas em cada RC é discutido em (SINGH, 2012). Os RCs utilizam uma combinação de seleção de decisões estatísticas obtidas por um detector de energia aperfeiçoado para a execução de decisões binárias durante a presença ou ausência de um utilizador primário (PU). O detector de energia melhorado utiliza uma potência positiva arbitrária  $p$  de amplitudes das amostras de sinais do PU. A decisão de cada RC é ortogonalmente encaminhada sobre canais imperfeitos para um centro de fusão, que toma a decisão final sobre a determinação de um espaço livre para a utilização. O trabalho demonstra que através do uso de múltiplas antenas são alcançados resultados mais confiáveis no sensoriamento do espectro. Também é avaliada a taxa de erro em função do número de dispositivos de sensoriamento na rede, no caso a rede utilizou 8 dispositivos RCs, e o número ideal encontrado foi 4. Comparações entre RCs com apenas uma antena em relação a RCs com múltiplas antenas demonstraram que o sistema com múltiplas antenas alcança menores taxas de erros, especialmente com uma relação de sinal ruído baixa, variando de -20 até 0dB.

O trabalho de (BLOCK, 2013) propõe um sistema de comunicação para aplicações industriais com capacidade de gerenciamento dos recursos da rede no domínio do tempo e da frequência. É utilizado um método de configuração automática entre sistemas, no qual cada

sistema consiste em uma rede de comunicação com diferentes dispositivos, possuindo um supervisor que é um dispositivo dedicado às negociações e processos. Um canal de comunicação é dedicado para a comunicação entre os supervisores (canal de controle), os quais trocam informações entre si para negociações de alocação e liberação de recursos da rede. O trabalho aborda a aplicação deste sistema em redes IEEE 802.11, para o canal de controle não foi especificado padrão de comunicação, entretanto é especificado que este canal não deve ser gerenciado por uma arquitetura centralizada, em razão de uma reação lenta para cenários que sofrem variações rápidas. O trabalho contribui no sentido de desenvolvimento de um esquema lógico para cooperação entre redes, apontando métodos de comunicação e negociação, porém não trata a fundo como interferências são detectadas e também não apresenta uma solução para redes com critérios de comunicação determinísticos. Muitos trabalhos na literatura apresentam resultados dentro do mesmo contexto.

Em (QANG, 2012) é proposto um algoritmo de roteamento ciente da taxa de transmissão em uma rede de rádios cognitivos para aplicações industriais. A capacidade de transmissão é um dos parâmetros usualmente afetados em ambientes com interferência o que implica também no aumento da latência da rede. A proposta visa a aplicação em redes de larga escala, em que os dados são encaminhados por diferentes clusters, e busca-se estimar o caminho com a maior taxa de dados para cada dispositivo. A arquitetura apresenta dispositivos denominados coordenadores, sendo estes utilizados em cada cluster das redes. Os coordenadores são alimentados a redes de energia e são responsáveis pelo sensoriamento do espectro, assim como a coleta de dados dos outros nodos da rede. O objetivo é evitar a interferência entre clusters. A comunicação inter clusters pelos coordenadores ocorre usando o esquema CSMA, enquanto a comunicação dos nodos gerais para o cluster ocorre com o uso de TDMA. O trabalho demonstra resultados simulados com redução nos tempos de latência da rede. Uma das limitações da proposta é a necessidade de dispositivos coordenadores, que

são equipamentos extras na rede. Ainda, o trabalho levanta situações de congestionamento em condições de ausência de canais disponíveis. Outros aspectos não foram considerados neste trabalho como, por exemplo, como os recursos são rearranjados na rede ou como obter garantias de entrega de mensagens. Em (QANG, 2013) é utilizado o mesmo esquema proposto anteriormente, mas a abordagem tenta aproximar a aplicação do método para uma rede ISA100.11a. A proposta consiste na introdução de RC na rede de forma a propiciar o sensoriamento do espectro, também há um elemento denominado gerenciador do sistema que determina quais canais serão utilizados em cada cluster da rede. Um dos métodos utilizados estima o desvanecimento do sinal entre os clusters como uma das métricas para o cálculo de disponibilidade de canais de forma a evitar interferência entre clusters e reuso de canais. Neste contexto alguns *slots* são utilizados como canal de controle para troca de informação entre diferentes clusters e a probabilidade de ocupação de canal também é estimada. O trabalho propõe algumas simulações em nível físico e resultados demonstram um aumento na taxa de transmissão, entretanto algumas condições, como, em períodos de ocupação extensos, os resultados com o algoritmo de otimização demonstram desempenho inferior ao do método de troca randômica de canais. Questões de garantias temporais também não foram documentadas.

O trabalho de (POLLIN, 2012), aborda um cenário de coexistência entre o IEEE 802.15.4 e o IEEE 802.11. A proposta consiste no desenvolvimento de um algoritmo para a seleção de canais de forma dinâmica em resposta a interferências provenientes do IEEE 802.11. O algoritmo aplicado a redes IEEE 802.15.4 utiliza como entrada uma métrica denominada  $G$ , que representa a qualidade do canal e é baseada no mecanismo de detecção de energia do IEEE 802.15.4 e no número de *beacons* escutados durante a varredura dos canais. A proposta não contempla o uso de coordenadores, sendo que os canais são selecionados aleatoriamente para a análise de ocupação. A proposta inclui também um procedimento de

aprendizagem por meio do algoritmo *Q-learning*, uma técnica de aprendizagem por reforço, que tem como vantagem a não necessidade de conhecimento prévio de um modelo do ambiente. Os resultados experimentais demonstraram que o esquema proposto tem um desempenho muito superior aos métodos randômicos de escolha de canais, com uma redução de até 25% das perdas geradas por interferência. O método de aprendizado *Q-learning* também teve um resultado favorável, especialmente quando aplicado em cenários com interferência estacionária. O trabalho também contribui frisando os cuidados quanto às questões energéticas envolvidas quando são utilizados esquemas de sensoriamento e aprendizado na rede. Apesar deste trabalho não levantar as considerações relacionadas às redes industriais, como, por exemplo, ao gerenciamento de recursos e requisitos determinísticos da rede, apresenta resultados pertinentes a pesquisa com o IEEE 802.15.4, que é utilizado com base física em muitos protocolos.

Alguns trabalhos como o de (CAVALCANTI, 2008), abordam o modelo de acesso dinâmico do espectro em redes de sensores sem fio, com o objetivo de utilizar faixas do espectro menos congestionadas. O trabalho apresenta o estudo de desempenho de redes de sensores sem fio para aplicações de automação e controle em ambientes residenciais. Aqui, a proposta de rede possui um coordenador que é o responsável pelo gerenciamento dos recursos e definição dos canais que devem ser utilizados. A partir da detecção de interferência o coordenador programa uma transmissão de difusão indicando um novo canal, assim como o momento para a troca. Apenas o coordenador possui habilidades para monitorar o espectro, sendo que esta estratégia foi adotada com o objetivo de economizar energia nos nodos da rede. Na análise de desempenho foi utilizado o padrão ZigBee, mantendo o mecanismo de CSMA e acrescentando a proposta de acesso dinâmico do espectro. As camadas superiores foram mantidas inalteradas. A proposta visa utilizar o RC para alternar para faixa de UHF durante situações de interferência em 2.4GHz, visto que essa troca de faixa de frequência

permite um alcance maior por parte dos dispositivos o que implica também em redução de saltos até o destino. As simulações demonstraram um aumento na latência da rede quando o modo RC é utilizado, sendo relatada como principal causa o procedimento de difusão e agendamento de troca de canais, que deve ser sincronizado para cada troca. Estas características acabam tornando esta estratégia um pouco distante dos requisitos industriais.

Em (LIN, 2014) um esquema de compartilhamento do espectro é proposto para redes industriais cognitivas. São discutidas as abordagens tradicionais para compartilhamento do espectro: centralizado e distribuído. No caso do compartilhamento centralizado, o trabalho aponta para os problemas de sobrecarga na rede em função da grande quantidade de dados de informações obtidas do espectro e direciona a proposta para o compartilhamento distribuído. A partir de mecanismos autônomos, baseado no comportamento de ações locais feitas por indivíduos em diferentes sistemas biológicos, o trabalho propõe o chaveamento dos canais de frequência de forma autônoma. São utilizadas diferentes regras para facilitar a decisão de troca de canal em cada nodo. Através de simulações foram obtidos resultados que demonstram um comportamento mais equilibrado na rede em relação ao uso dos recursos. Porém, são inseridos alguns mecanismos de contenção temporal no envio de mensagens o que inviabiliza comunicações determinísticas, outros requisitos implicam na necessidade de os dispositivos possuírem a capacidade de monitorar três canais simultaneamente, o que pode implicar em dispositivos de maior custo.

Alguns trabalhos discutem a ineficiência de protocolos de comunicação sem fio industriais quanto à capacidade de utilizar canais não interferentes de forma consciente, como o trabalho de (YUNHUAN, 2012). Este trabalho explora um método anti-interferência para redes industriais utilizando algoritmos que buscam uma solução ótima para a locação dos canais dentro de uma banda de 80MHz (2.4 – 2,48GHz). É proposto o uso de RCs para o sensoriamento do espectro em redes que utilizam sequência direta de espalhamento (DSSS) e

salto de canais, como empregado no WH. A solução ótima é aplicada a uma condição de distribuição hierárquica e transversal entre os dispositivos de uma rede. Resultados simulados foram realizados comparando a abordagem tradicional, com a frequência do centro dos canais fixos, em relação ao método de locação de canais. Nos experimentos foram consideradas interferências na faixa de 10 até -60dBm, com largura de banda de 2MHz e ruído de fundo em 0.5dBm, além da utilização de diferentes valores para o fator de espalhamento de espectro, tais como, 4, 8 e 16. Quanto maior o fator de espalhamento DSSS, maior é a capacidade anti-interferência. Em redes IEEE 802.15.4 este fator é determinado com valor igual a 8. Quando o fator de espalhamento aumenta, a eficiência do canal aumenta, mas o número de canais disponíveis diminui. O trabalho demonstrou uma relação de compromisso entre o canal e o fator DSSS, com melhores resultados para um valor igual a 8. Apesar de o trabalho apresentar um método que permite determinar de forma efetiva como ajustar a localização do canal quando em circunstâncias de interferência, não apresenta solução para o gerenciamento de recursos dentro de um protocolo, como, por exemplo, o WH. De qualquer forma pode ser uma direção para o processo de seletividade de canais.

Em (KAISER, 2009) é argumentado que o paradigma de RCs e redes de comunicação têm grande potencial para resolver os problemas de coexistência entre redes heterogêneas para gerenciamento dos recursos da rede em tempo real, através da busca de mecanismos flexíveis e ágeis para alocação de recursos dos protocolos. Neste trabalho é apresentado um *framework* de análise, baseado na teoria dos jogos, e introduzido um mecanismo de simulação paralela e distribuída para o gerenciamento dos problemas de interferência. O processamento e as simulações são distribuídos em diferentes computadores e realizadas através da ferramenta Matlab. Parâmetros como, potência de transmissão e recepção, canal, fonte de ruídos, entre outros, devem ser fornecidos pelo usuário. Apesar de a ferramenta apresentar um viés para redes críticas, não considera experimentos aplicando os requisitos industriais e não

chega a contribuir com alguma solução aplicável ao cenário proposto. O trabalho frisa a necessidade de uma aquisição bem-sucedida e ampla das condições da rede, tais como, ganho nos canais, potência, informações de padrões interferentes, etc., especialmente em um cenário com dispositivos distribuídos.

O trabalho de (ZHENG, 2012) faz uma abordagem na direção de controle de potência em rádios cognitivos em redes industriais. O trabalho descreve um modelo prático que acumula as interferências de toda a rede através de RCs, com base em modelos de interferência e com o objetivo de evitá-las, é proposto um esquema de autoconfiguração de potência de forma a atender os requisitos de comunicação. É esperada a maximização da taxa de transmissão em relação a todo o sistema através de algoritmos de otimização de potência em condições de interferência. O algoritmo é baseado na soma das taxas de dados com inclusão de pesos para cada nodo da rede. Este trabalho contribui para reforçar a relação entre eficiência energética e interferência. Os RCs são capazes de ajustar sua potência de transmissão adequadamente, não somente para suportar o tráfego desejado, mas também para interferir menos em outros dispositivos. Resultados provenientes de simulações demonstram que o controle na potência pode melhorar a taxa de comunicação e o consumo de energia pode ser reduzido sem comprometimento no desempenho.

### **3.3.1 COMENTÁRIOS**

Através dos resultados encontrados na literatura demonstra-se que há grande potencial para uso de técnicas de RCs em redes de comunicação, especialmente na busca de melhorias quanto ao uso dos recursos da rede e no ganho de confiabilidade. Alguns trabalhos destacam o custo da inserção de tais mecanismos, como, por exemplo, para o consumo de energia. Análises e experimentos têm demonstrado que existem pontos de melhor benefício, o que implica em uma indicação para uma avaliação mais profunda quando inseridos em determinados padrões. Os padrões disponíveis atualmente são complexos e com

características específicas o que leva a necessidade de um estudo exclusivo em cada caso.

Outros trabalhos propõem soluções que implicam em disponibilidade de canais de comunicação entre dispositivos gerenciadores de forma a ampliar a área de cobertura para a aquisição de mais informações sobre os recursos utilizados, facilitando as tomadas de decisões. Esse tipo de estratégia trata da complexidade da capacidade de sensoriamento distribuído em ambientes heterogêneos, especialmente para sistemas com arquiteturas centralizadas. A análise deste tipo de cenário deve contribuir para a aplicação de redes sem fio em ambientes industriais, onde pode existir grande variação de interferência e perturbação em diferentes pontos de uma mesma rede.

As abordagens encontradas na literatura são muito abrangentes ou muito específicas para parte ou partes do processo de redes cognitivas (sentir, entender, decidir e agir). Poucos trabalhos relacionam as soluções da teoria dos RCs de forma mais integral com protocolos de comunicação sem fio para aplicações industriais (WH, ISA100, WIA-PA), e ainda, em muitos casos, questões de redistribuição de recursos e determinismo acabam ficando como considerações secundárias dentro das propostas. Na análise da literatura nota-se uma oportunidade para o desenvolvimento de soluções factíveis, considerando os avanços tecnológicos e a conformidade com os requisitos industriais que propiciaram a aceitação do protocolo WH, para o estudo de métodos encontrados dentro da teoria dos RCs e sua implementação dentro do padrão industrial WH. Também nota-se a ausência de tais integrações em cenários reais dentro do contexto das aplicações industriais, muitos trabalhos apresentam cenários simulados e apesar de boas aproximações, muitas condições são suprimidas ou inseridas através de suposições simplificadas.

#### **4 WIRELESSHART COM SELEÇÃO DE CANAIS**

As tecnologias de comunicação sem fio têm passado por grandes avanços nas últimas décadas. Entre os padrões mais adequados para aplicações industriais WH, ISA SP100.11a e WIA-PA, o WH é padrão com melhor aceitação do mercado (KUMAR, 2014). A razão desta boa aceitação está relacionada ao conjunto de características, tais como a confiabilidade e robustez, mas também a simplicidade da arquitetura aplicada, não envolvendo, por exemplo, hierarquia entre dispositivos de campo, necessidade de dispositivos especiais para o funcionamento da rede e possibilidade de adaptação de equipamentos HART para o padrão WH. Estas questões estão entre as que tornam a tecnologia de comunicação WH adequada ao setor industrial. Entretanto, ao longo desta pesquisa, no entendimento deste protocolo e no estudo das tecnologias existentes, identificaram-se algumas lacunas no processo de operação da rede, principalmente quanto à questão de suscetibilidade das redes sem fio as condições do meio de acesso. O assunto relacionado ao uso dos recursos de redes de comunicação sem fio, como o espaço, espectro, tempo, etc., são temas de grande interesse atualmente. Os avanços na área da microeletrônica tornaram possíveis a miniaturização de sistemas complexos de comunicação sem fio, impulsionando ainda mais a demanda concentrada por recursos de espectro, condições que permitiram o aumento da popularidade de sistemas de comunicação sem fio e tornaram inevitável a interferência entre diferentes dispositivos.

A proposta deste trabalho é tornar a rede WH “consciente” das modificações do ambiente quanto ao uso do espectro, permitindo meios para o salto adaptativo de canais da rede WH e conseqüentemente o uso mais eficiente dos recursos da rede. Busca-se inicialmente fundamentação na teoria de rádios cognitivos em que se destaca como principal característica a capacidade de sensoriamento e amplia-se a rede para o conceito de redes cognitivas onde existe uma cooperação de todos os elementos da rede para o aprendizado quanto a disponibilidade de recursos e futuro comportamento dos dispositivos.

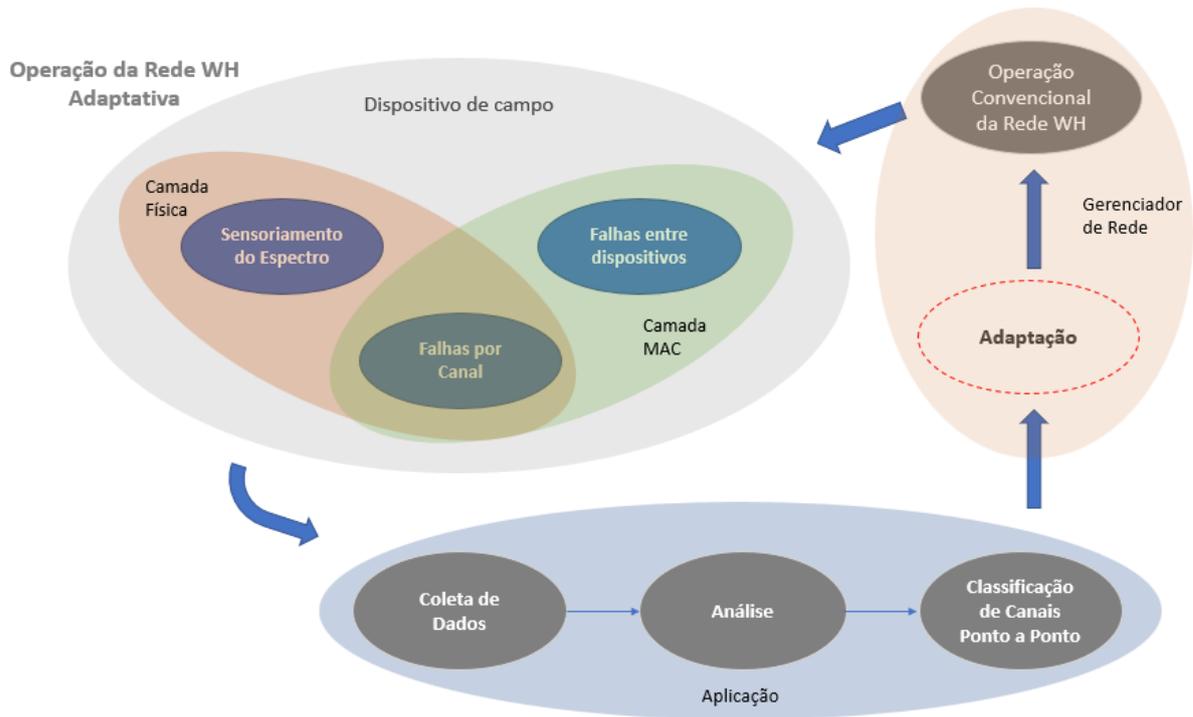
Por meio da implementação de habilidades para adquirir o conhecimento do ambiente esta proposta de trabalho visa tornar o protocolo WH mais robusto de forma a trazer mais confiabilidade nas aplicações. O uso mais consciente dos recursos da rede também pode ampliar a capacidade do número de nodos possíveis na rede, além de também contribuir para taxas de publicações em intervalos de tempo menores do que a arquitetura atual permite.

A proposta deste trabalho pode ser dividida em três etapas principais:

- i) Obtenção de métricas: Múltiplas dimensões. Identificação das métricas necessárias;
- ii) Desenvolvimento de métodos para obtenção de métricas do uso do espectro de forma dinâmica sem comprometimento à operação da rede;
- iii) Classificação de canais. Avaliação e identificação de canais para comunicação ponto a ponto, permitindo o padrão *WirelessHART* com salto adaptativo de canais.

A Figura 15 apresenta de forma simplificada a proposta deste trabalho e ilustra o ciclo com suas respectivas etapas e os seus elementos envolvidos.

O ciclo de operação inicia-se a partir do funcionamento convencional da rede, com a distribuição de recursos para os dispositivos de acordo com as condições de provisionamento especificadas pelo gerenciador de rede. A partir deste estágio a rede WH pode percorrer os outros estágios, os quais são: i) Sensoriamento Espectral; ii) Sensoriamento de falhas por canal; iii) Sensoriamento de falhas de comunicação entre dispositivos; iv) Coleta de dados; v) Análise e vi) Classificação de canais. O estágio de Adaptação da rede consiste na distribuição dos novos recursos determinados após os processos anteriores. Entretanto, para alterar mudanças de parâmetros relacionados aos recursos da rede é necessário alterar os algoritmos relacionados ao gerenciador de rede. Neste trabalho, conforme será detalhado nas seções posteriores, o gerenciador de rede utilizado é um produto comercial com restrição em tais níveis de configuração, sendo esta uma das etapas não abordada neste trabalho.



**Figura 15. Ciclo do método adaptativo de canais para redes *WirelessHART*.**

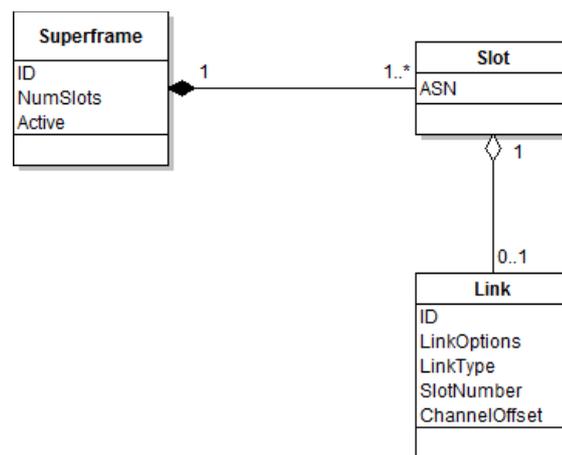
#### **4.1 Sensoriamento Espectral no *WirelessHART***

Com o objetivo de desenvolver um ciclo analítico e com maior conhecimento das alterações do meio dentro de uma rede WH, esta seção aborda o desenvolvimento das métricas necessárias, seus requisitos, assim como a proposta de arquitetura para plena operação da rede.

##### **4.1.1 RECURSOS UTILIZADOS NO *WIRELESSHART***

Conforme apresentado no Capítulo 2, o protocolo de comunicação sem fio WH apresenta diferentes métodos para auxiliar na condição de coexistência com fontes interferentes, assim como, por interferências causadas por outros padrões de comunicação. Aqui é detalhado o estudo realizado para identificar com maior precisão algumas das limitações do padrão WH quanto a uma melhor utilização dos recursos da rede. O padrão WH utiliza uma arquitetura centralizada e a distribuição dos recursos da rede é administrada pelo

gerenciador de rede. O WH utiliza o conceito de *superframe* para a determinação do momento de transmissão e recepção de mensagens. Um *superframe* consiste em um conjunto fixo de espaços de tempo (*slots*). O espaço de tempo quando alocado dentro de um *superframe* recebe uma conexão (*link*). Diferentes *superframes* podem ser criados pelo gerenciador de rede que adiciona, apaga ou modifica as conexões dentro dos espaços de tempo. As conexões são laços em nível MAC entre dispositivos e carregam diferentes atributos. A conexão inclui uma referência para um vizinho e define uma oportunidade de comunicação. O tipo de conexão determina se este é utilizado para comunicação entre pares de dispositivos ou para uma comunicação de difusão (*broadcast*). A Figura 16, ilustra a relação entre *superframe*, espaço de tempo e conexão.



**Figura 16. Relação entre *superframe* e as conexões.**

Os atributos contidos na conexão, associados ao número absoluto da rede (ASN) e ao *superframe*, definem quando, para quem e em qual canal deve ocorrer a próxima comunicação. A opção de conexão determina se é uma ocorrência de transmissão, recepção ou compartilhado para dado dispositivo. O tipo de comunicação em um espaço de tempo é determinado pelo tipo de conexão. Há quatro tipos de conexões: normal, difusão, associação e descoberta (*normal, broadcast, join and discovery*).

- Conexão normal: A conexão mais comum. Determina endereço de origem e destino. O destino de origem envia a informação para o endereço destino.

- Conexão de difusão: Esta conexão utiliza um espaço de tempo compartilhado entre diversos dispositivos. Mensagens propagadas nessa conexão não utilizam a resposta de confirmação do recebimento (ACK).
- Conexão de associação: Conexões utilizadas para integrar novos dispositivos à rede. Nestas conexões são propagadas as informações necessárias para associação à rede de novos dispositivos.
- Conexão de descoberta: Conexão destinada para manter a conexão entre dispositivos. A função inicial desta conexão é a descoberta de novos vizinhos. Ao longo do tempo é utilizado para gerar comunicação entre vizinhos com comunicação ociosa.

Os atributos das conexões estão associados com o modo de uso dos recursos da rede sem fio. O trabalho apresentado em (WINTER, 2013), apresenta as conexões estabelecidas e seus respectivos tipos a partir da análise de uma rede WH. A Tabela 2 ilustra as conexões para um dispositivo em uma rede WH. Pode-se verificar os diferentes atributos que a conexão carrega, tais como, identificação de *superframe*, número de slot e outros. Por exemplo, o índice "0" representa uma conexão pertencente ao *superframe* com ID igual a "1", e corresponde a um espaço de tempo na posição "212", com um deslocamento de canal igual a "2". O apelido do vizinho para esta conexão corresponde a "65535" ou 0xFFFF, conexão de difusão, e está designado para a recepção de mensagens de difusão. Observa-se também que há uma concentração maior de conexões do tipo Normal.

**Tabela 2. Tabela de conexões a para um dispositivo em uma rede *WirelessHART***

Link Index	Superframe ID	Time Slot	CH Offset	Nickname	Option	Type
0	1	212	2	65535	RX	Broad
1	0	986	1	1	TX	Normal
2	0	1	0	1	TX/RX	Discovery
3	4	115	7	65535	TX	Broad
4	0	218	5	1	TX	Normal
5	1	230	1	63872	TX	Join
6	1	242	3	65535	RX	Broad
7	0	367	3	63872	RX	Join
8	0	474	5	1	TX	Normal
9	0	730	3	1	TX	Normal
10	0	346	2	1	TX	Normal

#### 4.1.1.1 Uso do espectro de frequência

A norma HART discute o uso de múltiplos pontos de acesso na rede WH, o que possibilita o aumento de recursos na rede, podendo no caso extremo haver comunicação simultânea nos 15 canais utilizados. Entretanto, nenhuma estratégia de gerenciamento é apresentada para tal abordagem. A diversidade de canais é abordada apenas como estratégia de minimizar interferências e ocorre por meio de saltos cegos. Recursos espaciais, considerando o posicionamento dos nodos, não são referenciados na norma HART, sendo provavelmente uma herança do padrão IEEE 802.15.4, que é primordialmente uma rede do tipo LR-WPAN (*Low Rate Wireless Personal Area Networks*) e não prevê considerações de posicionamento de dispositivos na direção de possibilitar a banda de comunicação.

#### 4.1.1.2 Uso de espaços no tempo

A rede WH é formada através do processo de associação dos dispositivos de campo na rede. A partir do momento de ingresso à rede, o dispositivo recebe um determinado número de espaços no tempo e tipos de conexões para a troca de mensagens. O tipo de conexão mais variável em número entre os dispositivos é a conexão Normal, onde efetivamente ocorrem as trocas de mensagens do processo monitorado em regime permanente da rede. O número de conexões do tipo Normal está relacionado com as configurações de publicação para o dispositivo de campo e os requisitos temporais exigidos pelo processo para as variáveis monitoradas. O modo de publicação denominado na norma *burst mode*, estabelece um

intervalo regular para envio de dados de medida ou outras informações sem ser especificamente requisitado. Considerando, por exemplo, um período de publicação de 60s, espera-se pelo menos uma conexão Normal disponível dentro deste período, enquanto para um período de 10s, pelo menos 6 conexões do tipo normal disponíveis para um dado dispositivo dentro de 60s. Adicionalmente a estas conexões, o gerenciador de rede ainda deve prover rotas alternativas para uso, por exemplo, em caso de retransmissão. Porém, retransmissões para manter o determinismo da rede WH, devem ser agendadas com antecedência, não sendo suficiente apenas a atribuição de uma conexão.

A revisão atual da norma HART tem como principal recurso a distribuição de espaços de tempo para a comunicação entre os dispositivos o que implica em limitações nos requisitos temporais mínimos oferecidos, assim como na quantidade de dispositivos suportado em uma rede WH. Por exemplo, a política de gerenciamento aplicada no gerenciador de rede do fabricante Emerson (SMART WIRELESS GATEWAY, 2015), tem capacidade de suportar até 50 dispositivos para um tempo de publicação de 4s e apenas 12 dispositivos para um tempo de publicação de 1s.

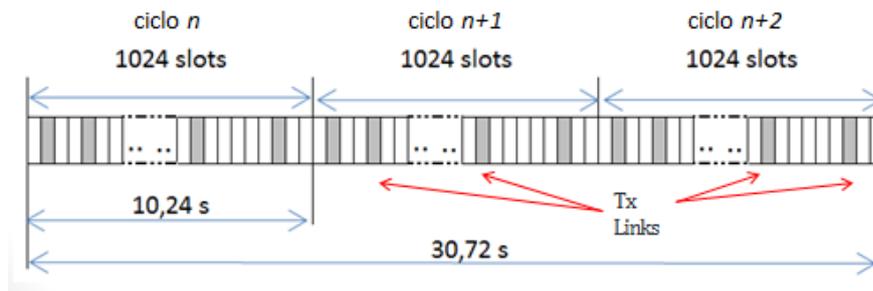
#### **4.1.1.3 Análise de distribuição de recursos**

Para o entendimento da dinâmica de distribuição de recursos de espaços de tempo em uma rede WH típica foi proposto um estudo de caso que analisa diferentes períodos de publicação (WINTER, 2014). Neste experimento, utilizando uma rede WH real, o mapa de conexões do dispositivo alvo é coletado a cada alteração do período de publicação. Observam-se, as seguintes características:

- O número de *superframes*: Há 3 *superframes* na rede com tamanhos distintos 1024, 256 e 128 espaços de tempo e correspondem a um período de 10.24s, 2.56s e 1.28s respectivamente;

- As conexões em que ocorrem as transmissões do modo de publicação são do tipo Normal, opção TX (transmissão) e estão localizadas no *superframe* de 1024 espaços de tempo.

A Figura 17 ilustra o ciclo do *superframe* de 1024 espaços de tempo com algumas conexões designadas para transmissão.



**Figura 17 . Ciclo do *superframe* de 1024 espaços de tempo.**

Os requisitos temporais de publicação são alterados para 32s, 16s, 8s, 4s, 2s e 1s, sendo observado o número de conexões atribuídas para o dispositivo pelo gerenciador de rede. A Tabela 3 apresenta a relação de conexões do tipo normal alocadas para o dispositivo em função do período de publicação. Nota-se que em função dos critérios de confiabilidade, há uma grande quantidade de conexões agendadas que são subutilizadas, quando a transmissão de dados ocorre com sucesso.

**Tabela 3. Relação de conexões por ajuste de período de publicação de dados.**

Tempo de publicação (s)	Número de conexões por <i>superframe</i> (1024 slots)	Oportunidades de envio dentro do período de publicação	Não utilizados (60s)
32	4	12	22
16	4	6	20
8	5	5	24
4	5	3	15
2	16	4	66
1	30	3	120

Na condição de publicação em um período de 32s, nota-se que o gerenciador de rede atribui, para o dispositivo de teste, 4 conexões do tipo Normal no *superframe* de 1024 espaços de tempo. Acumulando no período de 32s, 12 oportunidades de envio e no caso de sucesso do envio dos dados, um resultado de 22 conexões não utilizadas dentro de um período 60s. Na situação de um período de publicação de 1s, ao final do período de 60s há uma quantidade acumulada de 120 conexões não utilizadas. A redundância de *slots*, aliada ao salto de canais, mesmo sem seletividade, agrega características de diversidade no tempo e frequência. Em caso de falha em um determinado *slot*, a nova tentativa de transmissão ocorre em um canal de frequência diferente, considerando a situação de uma interferência estacionária, por exemplo, este método consegue aumentar as possibilidades de transmissão.

Conclui-se a partir desta análise que a forma adotada para manter as garantias de determinismo na comunicação contra possíveis perdas e falhas implica em mecanismos de redundância de transmissão, o que acarreta em um alto custo de uso de recursos da rede.

#### **4.1.2 REQUISITOS DE HARDWARE**

A capacidade de sensoriamento de espectro implica em diversos desafios, desde os algoritmos de detecção até as necessidades de hardware para coleta apropriada de informações. Alta taxa de amostragem, alta resolução de conversores analógicos digitais, capacidade de processamento rápido entre outros, são critérios desejados em plataformas de sensoriamento. O dispositivo de sensoriamento deve ser capaz de capturar e analisar dentro das faixas desejadas as oportunidades do espectro.

No trabalho apresentado em (SHANKAR, 2005), são detalhadas duas possíveis arquiteturas para o sensoriamento: rádio único e múltiplos rádios. A arquitetura de um único rádio tem capacidade de sensoriamento limitada para apenas uma porção do espectro e específicos espaços de tempo. Esta característica diminui a capacidade de transmissão e recepção do dispositivo, considerando que parte dos recursos (tempo e frequência) estão

sendo utilizados para sensoriamento ao invés do seu uso para possíveis transmissões. Em abordagens com mais de um rádio, tem-se a característica de um dos rádios estar dedicado à aplicação de sensoriamento e um outro para transmissão e recepção das mensagens, porém acaba sendo um hardware de maior custo e com maior consumo de energia.

Ainda é necessário considerar que soluções para redes de comunicação sem fio do tipo malha para aplicações industriais são muito mais desafiadoras e complicadas do que simplesmente redes em malha. O trabalho de (ZHU, 2011) aborda este tópico e destaca os requisitos dos circuitos integrados para implementação da pilha WH (software embarcado com a implementação do protocolo WH), assim como compara com as possibilidades disponíveis no mercado. Tais sistemas suportam características como, baixo consumo de energia, baixa taxa de dados e possibilidade de longo alcance de comunicação sem fio, mas também apresentam capacidade de memória limitada, especialmente quando comparado aos recursos necessários para a implementação da pilha WH. A inserção de novos algoritmos na pilha do WH deve ser cuidadosamente analisada, especialmente para não exceder a capacidade de armazenamento de dados. Outra característica relevante na pilha do WH são os requisitos temporais que devem ser severamente atendidos, sendo também um dos desafios à inclusão de novas tarefas sem interferência às prioridades de comunicação e sincronismo da rede.

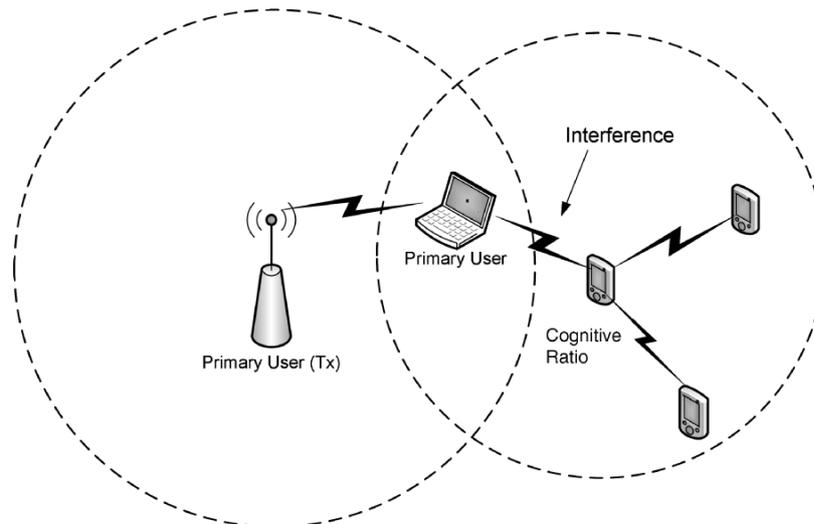
#### **4.1.3 SENSORIAMENTO DE ESPECTRO NO *WIRELESSHART***

Usualmente a teoria do RC aborda o sensoriamento de espectro em uma faixa larga do espectro procurando identificar oportunidades no espectro. Nesta abordagem pode-se dizer que é procurado o negado das oportunidades no espectro, uma vez que não há determinação de usuários primários para a faixa de operação do 2.4GHz, procura-se identificar os espaços com outros sinais. O objetivo é identificar segmentos da banda que estejam sendo utilizadas,

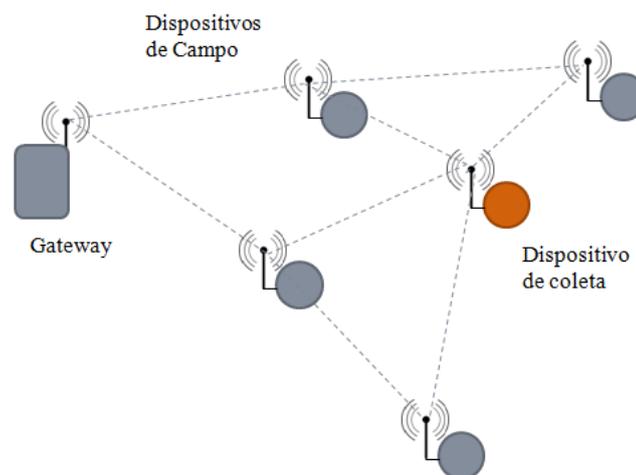
assim evitando-os para reduzir as perdas na comunicação desta rede e também da rede interferente.

Baseado nas considerações apresentadas no subcapítulo Requisitos de Hardware, neste trabalho para a inserção de métodos de sensoriamento foram considerados três possíveis arquiteturas denominadas aqui como: i) dispositivo de análise dedicado; ii) dispositivo de análise com múltiplos rádios e, iii) dispositivo com sensoriamento integrado. Entende-se que a partir destas arquiteturas outras combinações podem ser feitas.

A arquitetura com o dispositivo de análise dedicado é uma proposta que inclui na rede um dispositivo exclusivo para sensoriamento do espectro. Este dispositivo não tem outra função além de monitorar o espectro. Uma das grandes vantagens do uso de um dispositivo exclusivo é a possibilidade de utilizar um hardware que permite o uso de um método de sensoriamento mais complexo, possibilitando uma análise mais precisa das fontes interferentes. Este tipo de arquitetura pode utilizar a infraestrutura de comunicação da rede para transferir os dados coletados ou pode estar conectado diretamente no gerenciador de rede. Uma das desvantagens é a varredura limitada pelo alcance do dispositivo. A capacidade limitada de varredura do espectro pode implicar no problema da impossibilidade de detecção de interferências fora da área de cobertura do nodo o qual executa a leitura do espectro, mas suscetível ao outro par do respectivo dispositivo. Problema similar ao problema do nodo escondido em redes com CSMA, este problema pode ter como causa diferentes condições tais como, atenuação de sinal, multi-caminhos, regiões de sombra para usuários secundários, entre outros. A Figura 18 ilustra o problema do usuário escondido, que está entre um dos desafios dos rádios cognitivos. O RC nesta condição causa interferência para a rede do usuário primário, uma vez que não consegue detectar o uso da banda de frequência. A Figura 19 ilustra a arquitetura de análise com um dispositivo com aplicação exclusiva de sensoriamento de espectro.



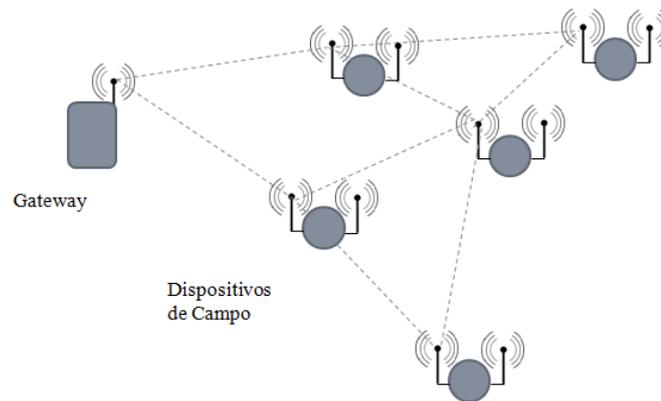
**Figura 18. Ilustração do problema do usuário escondido, relacionado a sensoriamento de espectro limitado por região. (ARSLAN, 2007).**



**Figura 19. Exemplo de arquitetura que considera a inserção de um dispositivo exclusivo para sensoriamento da rede.**

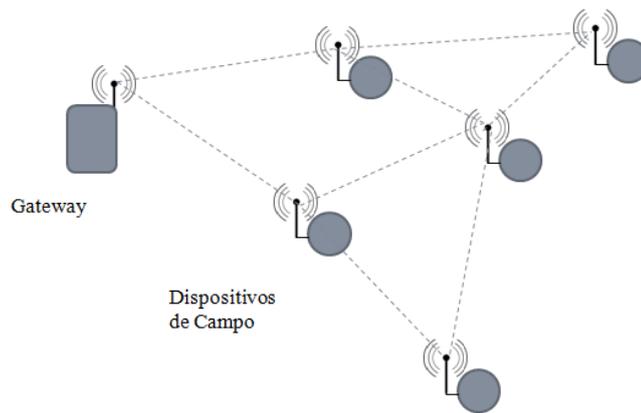
Outra possibilidade de arquitetura é seguindo o modelo com múltiplos rádios. Esta alternativa aumenta a área de sensoriamento, não influenciando necessariamente o uso de recursos da rede. Um dispositivo com múltiplos rádios aumenta a capacidade de sensoriamento do espectro, desde que cada dispositivo possa monitorar a intensidade de interferência no próprio local do nodo da rede, assim como realizar um monitoramento contínuo. Por outro lado, estas características necessitam de um hardware com maior poder

computacional, uma arquitetura adequada pode incluir dois processadores: um dedicado a comunicação na rede e outro para tratar do sensoriamento do espectro. A Figura 20 ilustra esta arquitetura de sensoriamento.



**Figura 20. Exemplo de arquitetura com o uso de múltiplos rádios embarcados nos dispositivos de campo da rede.**

A terceira alternativa vislumbra um método de realizar o sensoriamento do espectro de forma menos invasiva, não alterando nenhuma condição estabelecida pela norma HART. Também, visa não alterar as características mínimas requeridas para os dispositivos WH. Entretanto, a utilização do mesmo dispositivo em diferentes tarefas (comunicação na rede, sensor/atuador e monitoramento do espectro), deve considerar os seguintes pontos: o método de sensoriamento suportado pelo dispositivo; a disponibilidade de recursos para execução do sensoriamento; o quanto a execução de uma tarefa de sensoriamento pode alterar o desempenho do nodo em suas funções primárias, tais como, receber e transmitir dados; o momento de execução do sensoriamento; o armazenamento ou transferência dos dados obtidos. Esta arquitetura tem um aspecto mais econômico e prático, porém carrega diversos desafios para a integração de diferentes funções em dispositivos que devem atender rigorosamente requisitos temporais. A Figura 21 ilustra esta arquitetura.



**Figura 21. Arquitetura que não altera os dispositivos utilizados tradicionalmente em uma rede WH**

A Tabela 3 destaca as principais características das três propostas de arquiteturas apresentadas.

**Tabela 3. Principais características de propostas de sensoriamento de espectro.**

Arquitetura	Vantagens	Desvantagens
Dispositivo de sensoriamento dedicado	Hardware exclusivo Método de sensoriamento mais eficiente Análise pode ser local	Utiliza recursos da rede Reduz capacidade de dispositivos da rede Sensoriamento limitado localmente (problema do nodo escondido) Hardware de alto custo O dispositivo proposto não atende os dispositivos da norma WH.
Dispositivo de sensoriamento com múltiplos rádios	Sensoriamento distribuído Não utiliza recursos da rede	Hardware de alto custo Hardware diferenciado (múltiplos processadores) Consumo de energia
Dispositivo com sensoriamento integrado	Sensoriamento distribuído Hardware de baixo custo Não altera o hardware original, já utilizado na rede Utiliza recursos já distribuídos na rede Não altera critérios da Norma WH	Método de sensoriamento de baixa complexidade Consumo de energia

#### 4.1.4 ARQUITETURA PROPOSTA

A camada física do IEEE 802.15.4 tem duas funções principais para medir e indicar o nível de interferência dentro de um canal de frequência: LQI (*Link Quality Indication*) e a detecção de energia (ED). A medida de potência pelo receptor, LQI, é uma estimativa da intensidade do sinal em um canal para um pacote recebido. O ED é um mecanismo utilizado para mensurar a potência de um sinal durante um determinado intervalo de tempo, dentro de um canal IEEE 802.15.4. O ED não necessita de nenhuma informação adicional de outros usuários, sendo um método de detecção com necessidade de baixo poder computacional.

O ED também está incorporado no mecanismo CCA, também incluído no IEEE 802.15.4. O CCA classifica um canal como ocupado ou livre, a partir de uma análise de energia em um período de  $128\mu s$ . O CCA é utilizado antes do envio de uma mensagem, se detectado que o canal está ocupado a transmissão é adiada. Trabalhos como o de (TYTGAT, 2013) e (ZEGHDOUD, 2006), demonstram que apesar da simplicidade de detecção do CCA, este mecanismo traz muitos ganhos na redução de interferência e perdas de pacotes.

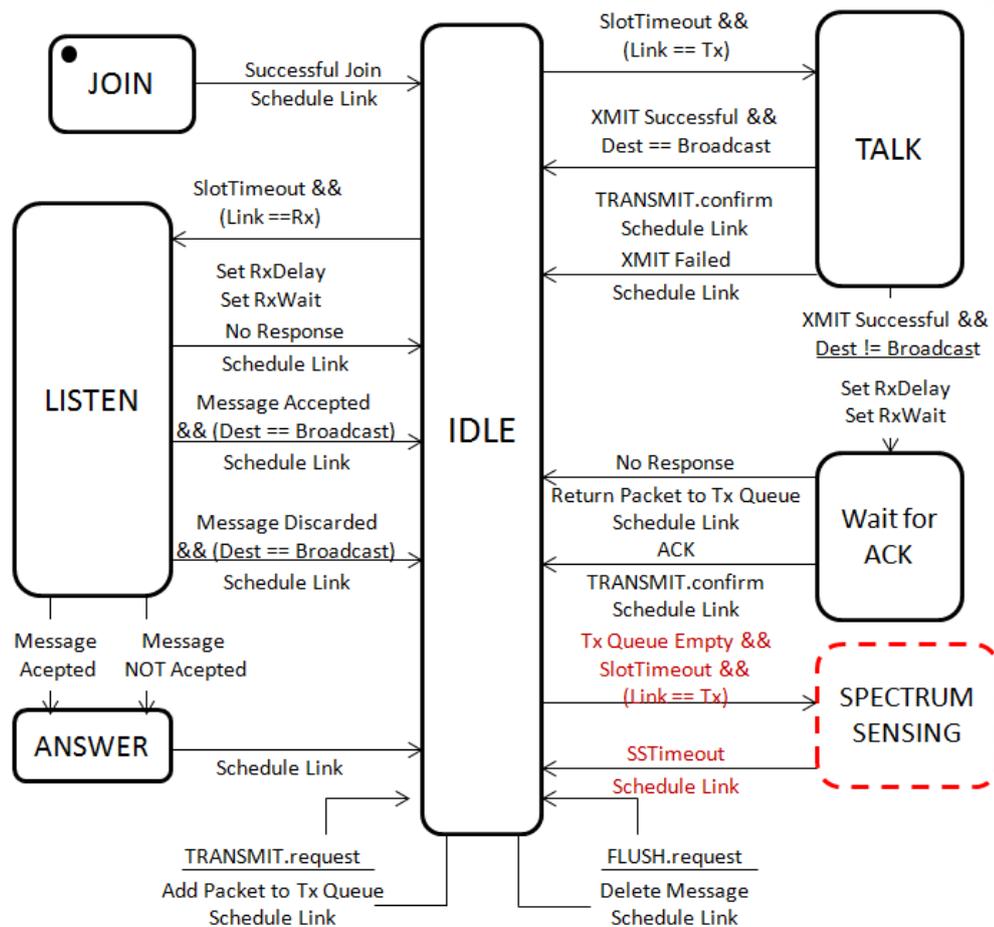
Neste trabalho é proposto o uso do mecanismo de detecção de energia para a análise do espectro, considerando que este método de análise já está integrado em rádios que suportam IEEE 802.15.4 e, ainda, com a vantagem das características de baixa complexidade. Diferentemente do CCA, é proposto um período de análise de ED com duração correspondente ao tempo do *slot* do WH, o que corresponde a um período de 10ms (78 vezes o tempo de execução do CCA). Para a detecção de energia ocorrer no tempo e canal adequados este trabalho propõem uma mudança na máquina de estados TDMA implementada no protocolo WH.

Originalmente são utilizados seis estados: *Join*, *Talk*, *Wait for Ack*, *Listen*, *Answer* e *Idle*.

- *Join*: quando um novo dispositivo está em processo de entrada na rede, o dispositivo recebe uma lista de *superframes*, grafos e conexões;
- *Talk*: este estado é introduzido quando um evento indica que um slot precisa ser utilizado (*slot time out*) com uma conexão de transmissão;
- *Wait for Ack*: este estado ocorre após a ocorrência do estado *Talk* e o dispositivo envia uma mensagem que não seja de difusão;
- *Listen*: ocorre quando um evento indica que um slot precisa ser atendido com uma conexão do tipo recepção;
- *Answer*: se um pacote é recebido este estado envia uma resposta de confirmação;
- *Idle*: quando não está em nenhum outro estado, o dispositivo permanece no modo de espera e gerencia os diferentes eventos, tais como interrupções temporais, requisição de transmissão e recepção, eventos para agendamento de novas conexões e *superframes*.

É proposto o desenvolvimento de um sétimo estado, estado de sensoriamento de espectro, o qual tem a funcionalidade de gerenciar e executar a detecção de energia durante o período de um *slot*. A Figura 22 ilustra a máquina de estados com o sensoriamento de espectro integrado no WH. O estado de sensoriamento deve proceder da seguinte forma:

- Se fila de transmissão de pacotes está vazia;
- Se o *link* é do tipo de transmissão Normal;
- Se foi alcançado o tempo limite para execução do *slot*;
- Então executa o sensoriamento espectral durante o tempo do *slot*;
- Armazena as informações e retorna para o estado de *idle* e realiza o próximo agendamento de *link*.



**Figura 22. Máquina de estado TDMA proposta. Inclui a característica do sensoriamento de espectro integrado no WH. (WINTER, 2014).**

A partir da análise apresentada anteriormente sobre o uso dos recursos no WH, foi possível estabelecer os instantes nos quais o estado de sensoriamento de espectro deve ser executado. Para evitar o uso de recursos da rede e problemas de execução de tarefas prioritárias, o sétimo estado foi designado a atuar dentro do tempo reservado para os *slots* de transmissão do tipo normal. O estado de sensoriamento de espectro entra em operação somente quando:

- i) o *slot* é de transmissão e do tipo Normal;
- ii) a fila de transmissão de pacotes do dispositivo está vazia. Nestas condições o estado de sensoriamento atua obtendo a energia do espectro.

#### 4.1.5 DETECÇÃO DE ENERGIA NO WH

A medida de energia é obtida a partir do sinal recebido dentro de uma banda pré-definida (5MHz) e do período determinado. Considera-se  $y(n)$  o sinal detectado (exemplo, Wi-Fi), pelo dispositivo de acordo com o *slot* determinado, e  $n$  o instante da coleta da amostra. Dentro do período reservado ocorrem  $n$  amostras sequencialmente, durante uma janela de tempo de aproximadamente 5 ms. Ao fim da execução do sensoriamento espectral um vetor com  $n$  medidas de energia é coletado. Para cada slot observado, tem-se:

$$Y(\text{ch}, n) = [y(1) \dots y(n)] \quad (8)$$

A amostra de energia coletada é o valor máximo observado dentro do período de tempo das  $n$  amostras:

$$ED(\text{ch}, \text{vizinho}, \text{tempo}) = \max(Y) \quad (9)$$

O valor de energia de espectro obtida é associado a outras informações da camada de enlace, como, vizinho associado à comunicação, tempo de ocorrência e em nível físico, o registro do próprio canal.

A estratégia proposta permite que os dispositivos da rede obtenham medidas de energia para cada canal requisitado, como esta função é programada para ocorrer em *slots* reservados, é possível garantir que não existam transmissões provenientes de outros dispositivos da mesma rede. Esta abordagem caracteriza a arquitetura de sensoriamento integrado, discutida anteriormente, e simplifica o processo de classificação de canais para o posterior algoritmo de seletividade, além de não perturbar a operação de funções de maior prioridade dos dispositivos. Outra característica incorporada neste método é a capacidade de sensoriamento distribuído, que diminui a probabilidade de detecções falhas e de alarmes falsos, redução do tempo de sensoriamento, além de resolver o problema de interferências fora da área de cobertura de certos nodos pares na rede, multi-caminhos e sombreamento.

#### 4.1.6 MÉTRICAS DA CAMADA FÍSICA E MAC

Uma rede do tipo malha, como a rede WH, necessita e utiliza diversas métricas para buscar eficiência no roteamento das mensagens na rede. Entre estas métricas, há indicadores de desempenho, tais como, taxa de pacotes enviados com sucesso, ocorrência de falhas e taxa de pacotes recebidos de um determinado dispositivo na rede. A camada de enlace mantém uma lista de mensagens (DLPDUs) aguardando para serem transmitidas. Os links previamente definidos associam um receptor para cada transmissão. Quando a transmissão ocorre com sucesso uma resposta de confirmação (ACK) é transmitida pelo dispositivo receptor da mensagem. O dispositivo fonte recebe o ACK e confirma o envio do pacote com sucesso. Em situações onde a mensagem enviada passa por uma experiência de colisão, o ACK não é enviado ou recebido. A falta de ACK, ou mensagem transmitida com falha, é registrada na tabela de vizinhos contida em cada dispositivo, contabilizando uma falha de comunicação para o respectivo vizinho e uma nova tentativa de envio é agendada dentro do próximo *slot* disponível. Este é um indicador importante que permite avaliar a saúde da rede WH.

Neste trabalho propõem-se uma expansão da métrica de faltas de ACK na camada de enlace, para uma medida mais completa que envolve também a condição da camada física. A proposta visa associar e identificar, quando na ocorrência de falha, o canal utilizado no espectro de frequência para tal transação e assim quantificar o desempenho do protocolo de controle de acesso às condições do meio físico. A Figura 23 ilustra quatro situações de operações na camada de enlace durante uma operação de envio de mensagens. Na parte superior é demonstrado o procedimento já existente no padrão WH com duas situações distintas: a transmissão de uma mensagem com sucesso e a transmissão com falha, com seu respectivo registro. Na parte inferior está ilustrado a proposta deste trabalho, identificando uma falha em nível MAC e a associando-a condição do meio físico.

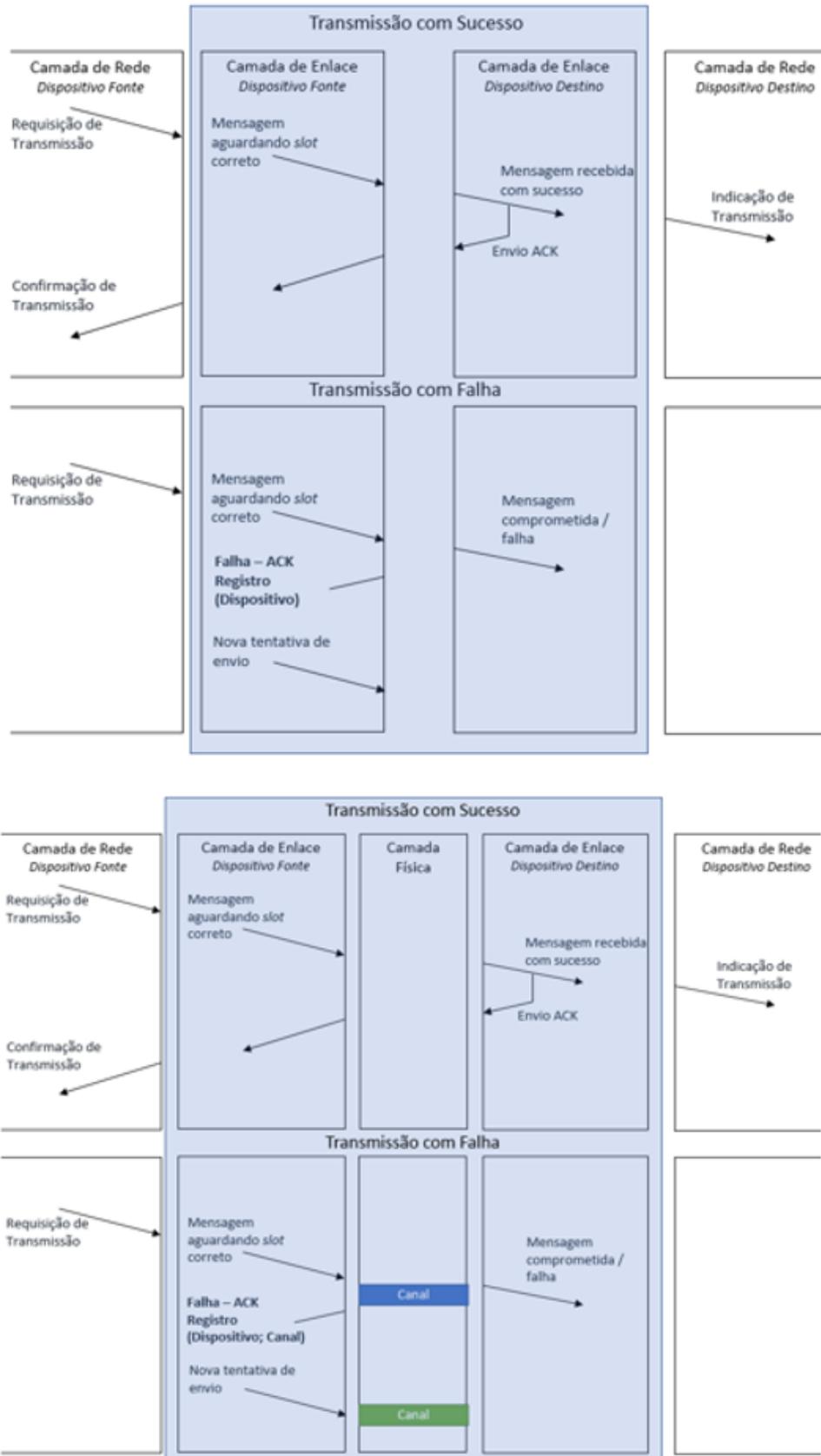


Figura 23. Indicadores de desempenho da comunicação. Imagem superior ilustra situação atual, imagem inferior ilustra proposta neste trabalho.

#### 4.1.7 APLICAÇÃO E MÉTRICAS NO WH

A camada de aplicação do padrão HART é baseada em comandos e define seis grupos de comandos para realizar todas as operações de controle e configuração da rede, cada grupo de comandos é atribuído para funcionalidades específicas da operação e configuração da rede. O padrão suporta comandos de byte único(0-255) e até dois bytes estendidos (256-65535). A Tabela 4 ilustra os respectivos grupos de comandos e suas devidas faixas numéricas.

**Tabela 4 . Faixa de comandos e seus respectivos tipos dentro do padrão WH.**

Número do comando	Tipo
0-30, 38, 48	Universal
31	Flag de expansão
32-121 exceto 38 e 48	Comandos práticos
122-126	Não públicos
127	Reservado
128-253	Dispositivo específico
254-511	Reservado
512-767	Comandos práticos adicionais
768-1023	<i>WirelessHART</i>
1024-33,791	Família de dispositivos
33,792-64,511	Reservado
64,512-64,765	Dispositivo específico <i>WirelessHART</i>
64,766-64,767	Reservado
64,768-65,021	Adicional de dispositivo específico
65,022-65,535	Reservado

Com o objetivo de atender os requisitos do padrão WH, garantindo autonomia e interoperabilidade entre os dispositivos da rede, este trabalho propõem a implementação de novos comandos que buscam extrair as novas informações implementadas na camada de enlace e física dos dispositivos WH.

Para permitir o acesso as novas métricas na camada de aplicação do dispositivo de campo foram desenvolvidos os seguintes comandos:

- Comando 132: sensoriamento espectral dos dispositivos de campo WH;
- Comando 133: estatística de falhas de comunicação por canal.

Os comandos propostos foram inseridos no tipo Dispositivo Específico, essa faixa permite a inclusão de comandos definidos pelo fabricante para diferentes necessidades dos dispositivos de campo. O comando 132 foi implementado conforme descrito na Tabela 5 e 6.

**Tabela 5. Requisição de Dados**

Byte	Formato	Descrição
Nenhum		

**Tabela 6. Resposta de Dados**

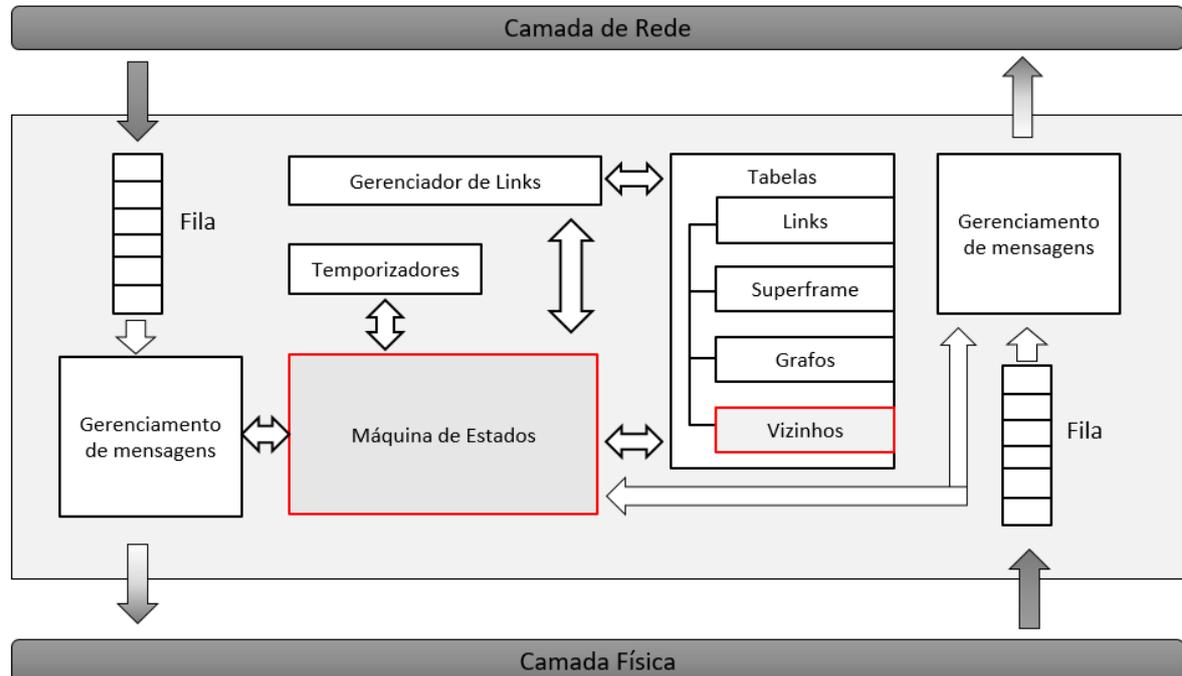
Byte	Formato	Descrição
0-2	Unsigned-24	ASN, 24 bits
3	Unsigned-8	Canal e <i>SuperframeID</i>
4	Unsigned-8	Apelido do dispositivo vizinho
5	Unsigned-8	ED
6..		Repete conforme dados no byte 0

Conforme detalhado no Capítulo 2, a camada de controle de acesso da pilha do protocolo WH desempenha as funções para o gerenciamento de pacotes recebidos e enviados, a manutenção da sincronização da rede entre outras tarefas que visam intermediar as ações da camada de rede e física.

Todos os dispositivos WH devem manter diferentes tabelas para permitir o controle das comunicações com os dispositivos na rede. Tabelas com informações de *superframes*, links associados, grafos entre outras informações estatísticas. Uma das tabelas, a tabela de vizinhos, guarda informações referentes a lista de dispositivos o qual haja possibilidade de comunicação. Entre as informações contidas na tabela de vizinhos estão o *Nickname* do dispositivo vizinho, estatísticas de pacotes transmitidos, pacotes recebidos e pacotes com falha. A informação contida nas tabelas de vizinhos é extremamente relevante para o gerenciador de rede, assim como o dispositivo de campo realizar a manutenção da malha de comunicação da rede WH.

A camada de enlace implementa o gerenciamento dos tempos de cada *slot*, agendamento de pacotes e gerenciamento e detecção de vizinhos. Este trabalho propõem a implementação de um mecanismo para geração de estatísticas relacionadas a falhas de

comunicação associados aos *links* entre os dispositivos vizinhos, realizando o registro de cada falha de comunicação de acordo com o canal de ocorrência e seu respectivo vizinho. A Figura 24 ilustra os principais blocos da camada de enlace da pilha WH, contendo as diferentes funcionalidades utilizadas para manter os *slots* sincronizados, tabelas atualizadas, fluxo dos pacotes através das subcamadas, controle de transmissão e recepção de pacotes. A camada superior, camada de rede, é a responsável pelo gerenciamento do roteamento e encaminhamento das mensagens, enquanto a camada física, inferior, realiza as funções para o ajuste correto dos parâmetros físicos do rádio para a transmissão e recepção dos pacotes. Para cada dispositivo vizinho, na ocorrência de um pacote propagado sem sucesso de confirmação, é realizado o registro da falha de comunicação associado ao canal correspondente utilizado para a transmissão da mensagem. As novas informações são registradas na tabela de vizinhos, conforme visto na Figura 24.



**Figura 24. Proposta da Camada MAC da pilha *WirelessHART*. Inclusão de mecanismos para registro de falhas de comunicação associados aos canais e vizinhos.**

Para acesso aos novos dados gerados na camada de aplicação da pilha WH foi desenvolvido o comando de falhas por canal. As instruções do comando estão descritas nas Tabelas 7 e 8.

**Tabela 7. Requisição de Dados – Comando 133**

Byte	Formato	Descrição
0	Unsigned-8	Índice da tabela
1	Unsigned-8	Número de dispositivos

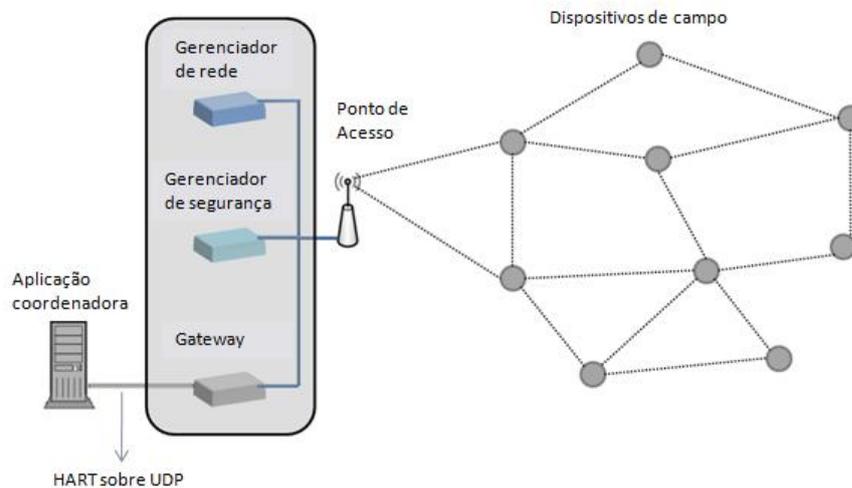
**Tabela 8. Resposta de Dados – Comando 133**

Byte	Formato	Descrição
0	Unsigned-8	Índice da tabela
1	Unsigned-8	Número de dispositivos lidos
2		
3-4	Unsigned-16	<i>Nickname</i> do vizinho
5	Unsigned-8	Falhas de comunicação canal 11
6	Unsigned-8	Falhas de comunicação canal 12
7	Unsigned-8	Falhas de comunicação canal 13
..		...
19	Unsigned-8	Falhas de comunicação canal 25
20-21	Unsigned-16	Repete conforme entrada de dados no byte 1

#### 4.2 Aplicação de Análises, Abordagens estatísticas e predição

Para minimizar as perdas e aumentar os recursos disponíveis na rede o espectro deve ser monitorado frequentemente, acompanhando as variações do ambiente. O uso do histórico das informações coletadas ao longo do tempo de vida da rede pode ser utilizado para alimentar algoritmos de aprendizado e predição do comportamento do uso do espectro. Através deste objetivo, todo o conhecimento obtido sobre cada dispositivo, aliado a algoritmos de predição baseados em dados estatísticos podem ser utilizados. Neste trabalho é proposto uma arquitetura baseado em uma aplicação coordenadora que deve desempenhar as funções de coleta de dados, conscientização do ambiente da rede e decisão do uso dos recursos. Este trabalho não irá abordar a implementação do processo de adaptação da rede,

pois, para tal, deve haver acesso aos algoritmos do gerenciador de rede WH. A Figura 25 ilustra a arquitetura proposta.



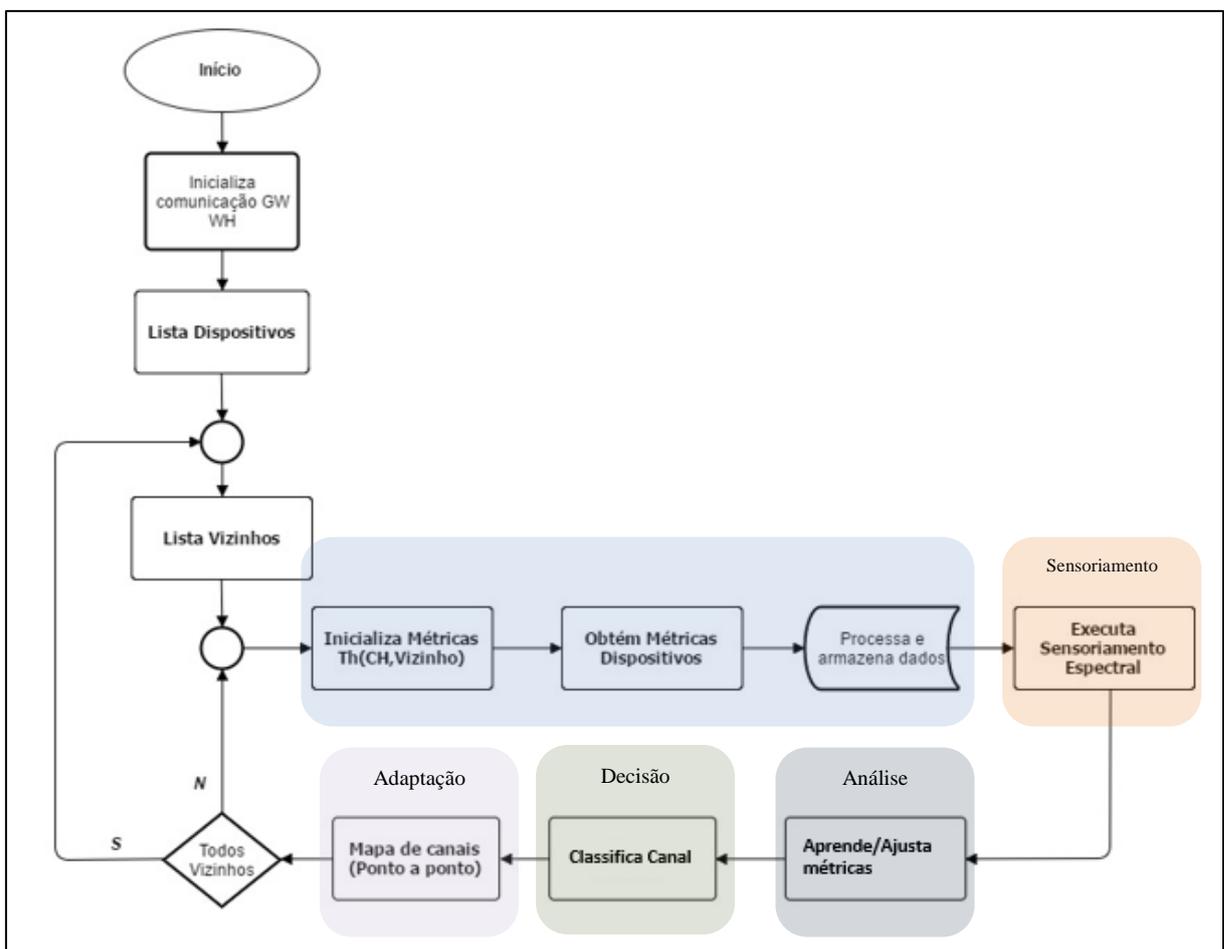
**Figura 25. Proposta de arquitetura de análise de espectro.**

A estratégia adotada visa obter um conjunto de métricas sem comprometimento com os mecanismos empregados no protocolo HART. A partir das técnicas propostas anteriormente neste trabalho são obtidas as seguintes métricas no espaço físico:

- Tempo (quando a medida foi realizada);
- Frequência (canal medido);
- Espacial (identificação do nodo);
- Energia no espectro;
- Número de falhas ocorridas por canal utilizado.

Uma perspectiva de desenvolvimento consiste na integração de algoritmos de predição junto ao gerenciador de rede o que pode trazer melhorias, como a eliminação da latência de comunicação entre aplicação e o gateway, além da inclusão de novas funcionalidades, como a adaptação da rede. Por outro lado, deve-se haver também cuidados quanto a complexidade dos algoritmos, além da carga de processamento de mais tarefas, pode exigir um hardware com maior poder computacional e, conseqüentemente, de maior custo.

Na solução proposta neste trabalho a aplicação coordenadora é responsável por gerenciar a comunicação com o gateway WH, identificar todos os dispositivos da rede e seus respectivos vizinhos. Para cada vizinho coordenar e obter o conjunto de métricas apresentados anteriormente, ajustar as métricas de ocupação dos canais, classificar estes recursos e finalmente a decisão do conjunto de canais com seus respectivos dispositivos, assim visando gerar melhor desempenho na operação da rede. A Figura 26 ilustra as principais etapas do algoritmo.



**Figura 26. Fluxograma do algoritmo proposto para implementação de salto de canais adaptativo no WH.**

#### 4.2.1 COMUNICAÇÃO GATEWAY WH

A aplicação coordenadora estabelece conexão direta com o gateway WH e foi desenvolvida utilizando o padrão de comunicação Hart sobre UDP. A Figura 27 ilustra o formato geral do frame Hart sobre UDP.

Versão	tipo	msgID	Estado	seq. H	seq. L	tam. H	tam. L	<i>pacote</i>
--------	------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	---------------

**Figura 27. Frame Hart sobre UDP**

Os campos do frame são descritos a seguir:

**Versão :** Versão do protocolo. Atualmente é a versão 0x01.

**Tipo:** Identifica a direção, se é requisição ou resposta.

Tabela 3: Tipo de Mensagem.

Tipo	Descrição
0x00	Requisição
0x01	Resposta

**MsgID:** Identificador da mensagem. Indica se é um procedimento de estabelecimento de conexão ou troca de dados com o servidor. A interpretação ou não do pacote de dados é função do identificador de mensagem.

Tabela 4: Identificador de Mensagem.

msgID	Descrição	Operação
00	Open	Abre conexão UDP
01	Close	Termina conexão UDP
02	Keepalive	Mensagem periódica para identificar conexão ativa.
03	PDU	Mensagens de HART

**Estado:** Indica o estado da comunicação. Nas requisições deve ser colocado em zero (0x00). Nas mensagens de resposta, indica o resultado da comunicação. O valor zero (0x00) indica comunicação com sucesso, sem erros.

**Sequência parte alta e baixa:** Número da sequência da mensagem, expresso em 16 bits, no caso da PDU de dados. As mensagens de resposta têm o mesmo número de sequenciamento da requisição, permitindo ao cliente da requisição realizar a associação da

resposta com a requisição realizada (protocolo UDP não possui sequenciamento de mensagens).

**Tamanho parte alta e baixa:** Comprimento total do datagrama. O comprimento da mensagem é contado a partir do byte da versão até o último byte do pacote.

**Pacote:** O campo de dados da mensagem é relativo ao campo do tipo. Para as mensagens de *open/close* e *keep alive*, possuem informações relativas ao controle da conexão, como timeouts e tempos de *keep alive*. Para as mensagens de dados, PDUs (*Protocol Data Unit*), o *payload* contém uma mensagem no formato HART.

O formato das mensagens HART são diferentes para as requisições e respostas. As respostas incluem dois bytes de código de resposta e estado, que não estão presentes nas requisições.

Tabela 5: Dados de requisição HART sobre UDP.

Requisição		
Byte	Offset	Descrição
00	0x08	Delimitador HART (0x82 – Requisição com endereços de 5 bytes (UID Hart), master to slave)
01-05	0x09	UID – Identificador único HART do destinatário da mensagem.
06	0x0E	Comando HART – Para comandos expressos em dois bytes (extended command number), este campo contém o comando 31(0x1F).
07	0x0F	Tamanho do frame HART, O tamanho é contado a partir do próximo byte excluindo o byte de verificação.
08-09	0x10	Expanded command number. Número de comando expresso em 16 bits (quando o byte 06 for diferente de 0x01F).
10	0x12--	Argumentos do comando HART. (O número de bytes varia de zero a n, em função do comando utilizado).
(08+tam)	(0x10+tam)	Checksum (Ou-exclusivo dos bytes do frame, desde o delimitador até o último byte dos argumentos do comando).

Os dois bits mais significativos do byte 01 não reproduzem o Identificador Único e sim identificam o tipo de mestre (principal ou secundário) e se a mensagem é do modo *burst* (emissão periódica da mensagem).

B1.7 = Mestre (1, primário; 0, secundário);

B1.6 = Burst mode – para mensagens HART sobre UDP este bit sempre será 0.

O endereço padrão de um gateway *WirelessHART* é 0xF981002, mas com as regras de formação do Identificador Único do dispositivo a ser enviado o endereço presente na mensagem será 0xB981002. Para o endereço de um dispositivo aplicam-se as mesmas regras, no caso de um dispositivo com identificador único de 0xE0FF00FA terá na mensagem o identificador 0xA0FF00FA.

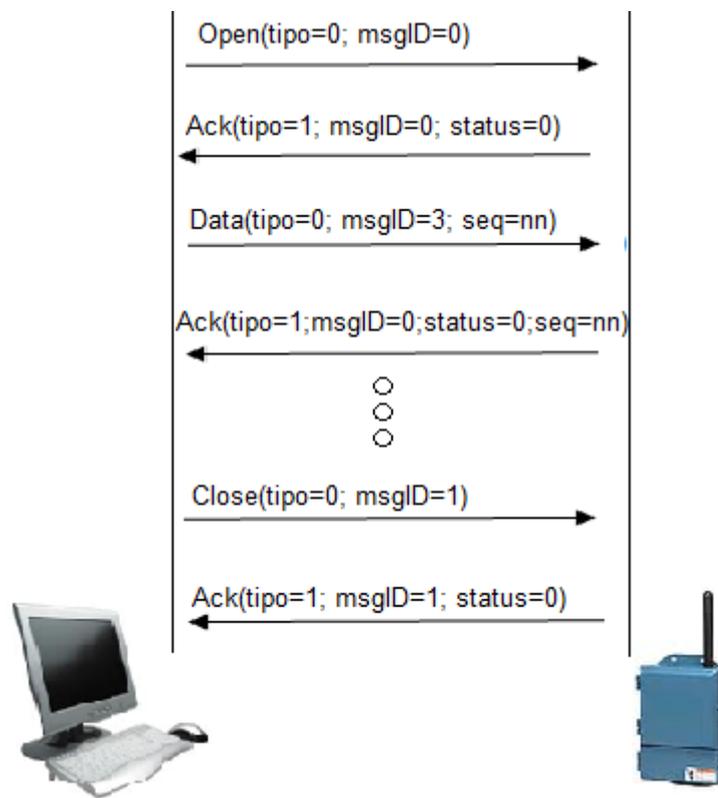
Nas respostas o dispositivo HART escravo retorna com os dados enviados pelo mestre, junto com dois bytes de estado e código de resposta do comando assim como os dados de resposta.

Tabela 6: Dados de Resposta HART sobre UDP.

Resposta		
Byte	Offset	Descrição
00	0x08	Delimitador HART (0x86 – Requisição com endereços de 5 bytes (UID Hart), slave to master).
01-05	0x09	UID – Identificador único HART do destinatário da mensagem. Para comandos direcionados ao gateway, o endereço será 0xB981000002 (UID padrão para gateways WiHart).
06	0x0E	Comando HART – Para comandos expressos em dois bytes (extended command number), este campo contém o comando 31 (0x1F).
07	0x0F	Tamanho do frame HART, O tamanho é contado a partir do próximo byte excluindo o byte de verificação.
08	0x10	Código de resposta do comando/erro de comunicação. Quanto o msb estiver em um ( $\geq 0x80$ ), indica erro de comunicação e os demais bits indicam o erro. Quando msb estiver em zero ( $< 0x80$ ), indica o código de resposta específico do comando (ver descrição de cada comando HART). Hart
09	0x12	Estado do dispositivo. Hart Technical

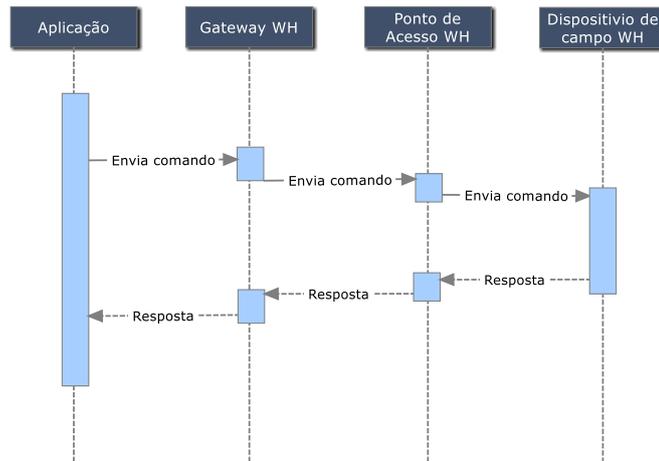
10-11	0x12	Expanded command number. Número de comando expresso em 16 bits
12--	0x13	Argumentos do comando HART. (O número de bytes varia de zero a n, em função do comando utilizado).
(08+tam)	(0x10+tam)	Checksum (Ou-exclusivo dos bytes do frame, desde o delimitador até o último byte dos argumentos do comando).

A Figura 28, ilustra a troca de mensagens entre a aplicação coordenadora (computador) e o gateway WH, utilizando o Hart sobre UDP.



**Figura 28. Exemplo de troca de mensagens entre aplicação coordenadora e gateway WH.**

A Figura 29, ilustra o diagrama de sequência de mensagens entre os elementos da rede e a aplicação. Algumas informações são extraídas diretamente do gateway WH, como, por exemplo a lista de dispositivos, não havendo necessidade de encaminhando da requisição até o dispositivo de campo.



**Figura 29. Diagrama de sequência para a comunicação da aplicação com os elementos da rede WH.**

#### 4.2.2 IDENTIFICAÇÃO DA REDE WH

Após estabelecida comunicação com o gateway WH a aplicação coordenadora inicia o levantamento das informações da rede. Inicialmente são identificados os dispositivos que compõem a rede WH (lista de dispositivos). Uma vez determinado os dispositivos, o algoritmo inicia a identificação dos vizinhos. Para cada vizinho são iniciados um conjunto de métricas (limiar de detecção e canais utilizados), os dados são armazenados para posterior análise.

#### 4.2.3 SENSORIAMENTO

O bloco de sensoriamento é o responsável pela requisição e armazenamento das informações relacionadas a energia no espectro dentro dos canais utilizados por cada dispositivo solicitado dentro da rede WH. Conforme apresentado na Seção 4.1 o dispositivo da rede é o responsável pela leitura de energia no espectro de acordo com os canais utilizados por ele.

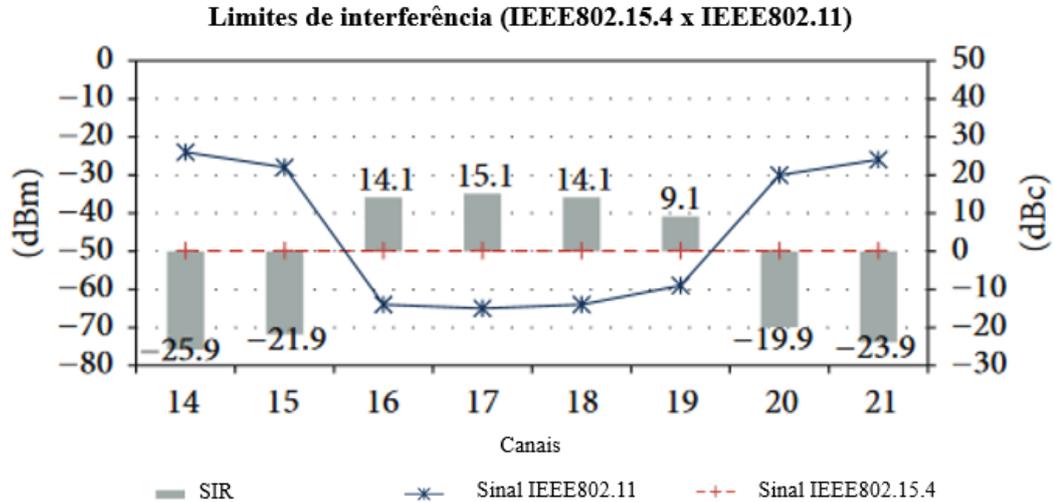
#### 4.2.4 ANÁLISE

O bloco de análise é responsável pela comparação das métricas obtidas da rede, assim como dos ajustes das novas referências para posterior classificação de canais.

No módulo de ajuste de métricas é proposto um algoritmo para adaptar e corrigir o limiar de classificação da ocupação de canais de forma distribuída entre os dispositivos da rede WH. O limiar de detecção é necessário para decidir quando o sinal interferente está presente ou ausente e é este o parâmetro que determina o resultado de outras métricas de desempenho. A escolha do limiar de detecção interfere diretamente entre a probabilidade de falso alarme e a probabilidade de uma detecção perdida. Especificamente, um limiar alto deverá resultar em uma baixa probabilidade de detecção, mas também uma probabilidade alta de falsa de detecção, e vice-versa.

Usualmente detectores convencionais utilizam um valor fixo de limiar. Este trabalho traz a proposta de um limiar dinâmico com o objetivo de maximizar o acerto dos testes das hipóteses. São considerados os diferentes nodos presentes em uma rede, localizados em locais diferentes, apresentam uma assimetria em relação ao SIR em função das diferentes distâncias para o elemento interferente e ao nodo com conexão para recebimento e envio de mensagens. A intensidade da relação do sinal desejado e a interferência, assim como o percentual de sobreposição entre os sinais desejados e interferentes condicionam a taxa de sucesso de entrega de uma mensagem entre um par de dispositivos. No trabalho de WINTER, 2015, é apresentado um modelo probabilístico de sucesso de conexão baseado na relação sinal e interferência, nível de sobreposição de canais e o RSL. A Figura 30 resume e ilustra os resultados experimentais, demonstrando a relação de potência mínima para corromper pacotes do tipo IEEE802.15.4 sob interferência do IEEE802.11. O eixo do lado esquerdo (dBm) representa o valor da potência das duas fontes transmissoras IEEE802.15.4 e o IEEE802.11. O eixo do lado direito (dBc) refere-se ao valor relativo de potência entre o sinal desejado (IEEE802.15.4) e o sinal interferente, neste caso IEEE802.11, representando o limiar limite antes da ocorrência de perda de pacotes. É possível identificar que em um contexto com

múltiplos nodos, há condições únicas em cada canal para degradação em relação as condições de interferência.



**Figura 30. Limiar de interferência tolerável (do IEEE802.11) para corromper pacotes (IEEE802.15.4).**

Esta característica presente em uma rede sem fio torna ainda mais difícil a definição de um limiar de detecção. Conforme foi apresentado no Capítulo 2, o método de detecção de energia é baseado no teste de duas hipóteses, canal livre ( $H_0$ ) ou canal ocupado ( $H_1$ ). Este resultado é decorrente da comparação da energia monitorada  $\delta$ , durante um intervalo de tempo específico contra um limiar de detecção previamente determinado  $\gamma$ . É possível que a decisão  $H_0$  seja tomada de forma errônea. Esta probabilidade  $P_p(\gamma) = \Pr\{\delta < \gamma \mid H_1\}$  é definida como probabilidade de perda de detecção. A outra situação, a probabilidade de detecção é dada por  $P_d(\gamma) = \Pr\{\delta \geq \gamma \mid H_1\}$ , e representa a probabilidade de detecção correta do canal ocupado. A probabilidade de falso alarme representado por  $P_p(\gamma) = \Pr\{\delta \geq \gamma \mid H_0\}$ , determina a situação onde é acusado a presença de interferência, quando na verdade não há perturbação no meio.

O método apresentado neste trabalho busca simplificar o problema alterando de forma dinâmica e distribuída o limiar de detecção com base no desempenho individual de

cada canal para cada dispositivo. O algoritmo é aplicado para cada canal e seu vizinho associado. A notação a seguir é utilizada no algoritmo:

$\gamma_0$  = Limiar de detecção inicial;  
 $\gamma$  = Limiar de detecção instantâneo;  
 $T$  = Limiar máximo;  
 $T_{min}$  = Limiar mínimo;  
 $M.A$  = Falhas de comunicação (absoluto);  
 $\Delta M.A$  = Delta de falhas de transmissão  
 $\Omega$  = Passo para ajuste do limiar  
 $\delta$  = Energia medida no canal;  
 $H$  = Estado atual do canal real (1, ocupado; 0, livre);  
 $H_r$  = Estado do canal classificado (1, ocupado; 0, livre);  
 $IO$  = Índice de Ocupação;  
 $\beta$  = Limiar de classificação;  
 $\mu$  = Peso;

Após obtido as métricas os seguintes passos são executados.

```

Para cada nodo vizinho nodo[i]
{
  Para cada canal ch[i]
  {
    Se (  $\delta > \gamma$  ) então {
       $H = 1$ 
      Se (  $\Delta M.A = 0 \ \&\& \ \gamma > = \gamma_0$  ) então
         $\gamma = \gamma + \Omega$ 
    }
    Senão{
       $H = 0$ 
      Se (  $\Delta M.A > 0 \ \&\& \ \gamma < T_{min}$  ) então
         $\gamma = \gamma - \Omega$ 
      Se (  $\Delta M.A > 0 \ \&\& \ \gamma > = T$  ) então
         $H = 1$ 
    }
  }
}
Fim
  
```

Aqui a proposta é avaliar o desempenho de cada canal associado a troca de informações entre cada dispositivo vizinho específico. A partir do monitoramento das falhas de sucesso de comunicação entre um par de dispositivos e na ocorrência de interferência o algoritmo se ajusta de forma a identificar o limiar máximo de energia no espectro tolerável

para impedir falhas de transmissão. Na ausência de interferência o algoritmo busca ajustar novamente o nível de sensibilidade de detecção de interferência no canal.

Nesta etapa é realizado uma classificação prévia da condição dos canais utilizados. Na etapa posterior o canal é classificado com disponível ou utilizado.

#### 4.2.5 DECISÃO

A etapa de decisão é a responsável pela classificação final do canal. Na abordagem utilizada neste trabalho o canal tem duas condições: livre ou ocupado. O algoritmo de análise verifica as condições de energia do canal medido para um determinado instante e compara com o limiar de energia pré-determinado de acordo com cada dispositivo da rede WH que compõem o universo de vizinhos do dispositivo de campo analisado.

Com o objetivo de incluir o acúmulo das informações sucessivas de forma a ponderar as amostras e atribuir maior peso para as observações mais recentes, foi utilizado no algoritmo proposto uma estimativa baseada na teoria da média móvel exponencialmente ponderada, (ROBERTS, 1959). Desta forma o peso dado as amostras decresce geometricamente da primeira até a última amostra. Especificamente, amostras mais recentes devem ser mais representativas em relação as condições atuais do canal em relação a amostras mais antigas, podendo carregar um peso maior na sua medida. Além do valor de predição, o algoritmo da média móvel, reduz o impacto de mudanças abruptas transientes que devem afetar pacotes isolados e sem valor preditivo. Abaixo é apresentada a equação do método utilizado.

$$IO_{e(n+1)} = \mathbb{I}_n \cdot \mu + (1 - \mu) \cdot IO_{e(n)} \quad (10)$$

Onde  $IO_{e(n+1)}$  é o novo estado do canal estimado,  $IO_{e(n)}$  é o último estado do canal estimado,  $\mathbb{I}_n$  é o último estado real do canal (determinado na etapa de análise), e  $\mu$  é a constante de atenuação, sendo esta condicionada a  $0 \leq \mu \leq 1$ , esta constante determina o quão remota é a memória da curva de ocupação do canal, assim como o valor inicial do

processo. O estado do canal estimado é selecionado de acordo com a variável  $\mu$ , a qual define o peso das amostras do tempo. O peso é reduzido exponencialmente para cada amostra antiga, sendo que quando  $\mu$  é próximo de 1, as amostras mais recentes têm peso maior, e as amostras antigas contribuem de forma menos significativa para a decisão atual. Para um  $\mu$  próximo à 0, amostras antigas têm maior peso para a decisão corrente. Se o índice de ocupação do canal é superior a um dado limiar de classificação  $\beta$ , este é classificado como ocupado, caso contrário permanece no estado livre. Se  $(IO > \beta)$ ,  $\mathbb{I}_r = 1$ , senão  $\mathbb{I}_r = 0$ .

#### 4.2.6 ADAPTAÇÃO

O processo de adaptação consiste no repasse dos novos mapas de canais referentes aos pares de dispositivo para o gerenciador da rede, o qual posteriormente pode reajustar os parâmetros da rede. Esta etapa não foi abordada neste trabalho em razão da falta de acesso aos algoritmos do gerenciador de rede, uma vez que foram utilizados equipamentos comerciais e com softwares restritos.

#### 4.2.7 COMENTÁRIOS

O conjunto das diferentes etapas propostas reflete como resultado a combinação de uma análise do espectro de frequência associado ao desempenho de comunicação relativo a cada canal e vizinho de um dispositivo da rede. A escalabilidade é outra importante característica presente na proposta deste trabalho, sendo adotada uma estratégia de sensoriamento distribuído e local, a qual permite uma seleção de canais baseado no ponto de instalação de cada dispositivo. Importante destacar que uma vez definido os blocos e mecanismos de apuração de dados, diferentes técnicas para classificação e aprendizado podem ser implementados a fim de encontrar outros resultados em relação a comparação entre as diferentes técnicas empregadas.

## 5 MÉTODOS E MATERIAIS

Este capítulo descreve de forma detalhada os equipamentos, ferramentas assim como os parâmetros e configurações utilizadas para a prova experimental do modelo proposto neste estudo.

### 5.1 Ferramentas de Software

A aplicação coordenadora foi desenvolvida sobre as linguagens C e C++, utilizando o ambiente de desenvolvimento Visual Studio 2010. O software embarcado para os dispositivos *WirelessHART* foi desenvolvido em linguagem C através do ambiente de desenvolvimento IAR *Embedded Workbench*.

### 5.2 Equipamentos Utilizados

Os experimentos propostos neste trabalho foram conduzidos através da utilização de equipamentos que compõem uma rede *WirelessHART*. Os dispositivos de campo, ilustrado na Figura 31, foram desenvolvidos no LASCAR (Laboratório de Automação, Sistemas de Controle e Robótica - UFRGS), detalhados no trabalho de (MULLER, 2010).



**Figura 31. Dispositivos de campo WH.**

O gateway WH utilizado é um equipamento comercial do fabricante Emerson Rosemount (modelo 1420), desenvolvido para aplicações industriais e em conformidade com o protocolo WH. A Figura 32 ilustra o gateway WH.



Figura 32. Gateway comercial WH.

Para a geração da interferência IEEE802.11g foram utilizados dois computadores portáteis e um ponto de acesso convencional. O tráfego de dados na fonte interferente, no cenário de análise, foi realizado através da ferramenta *Distributed Internet Traffic Generator* (D-ITG) (BOTTA, et al. 2012). A aplicação permite o ajuste do protocolo da camada de transporte em TCP, UDP, ICMP e também funcionalidades da camada de aplicação como, DNS, Telnet, Voz ou modo padrão. A aplicação em modo padrão permite determinar a taxa de pacotes transmitidos, tamanhos dos pacotes e a distribuição estatística do tempo entre o envio de mensagens. O monitoramento do espectro de frequência foi realizado através de um analisador de espectro, modelo NN9912A do fabricante FieldFox.

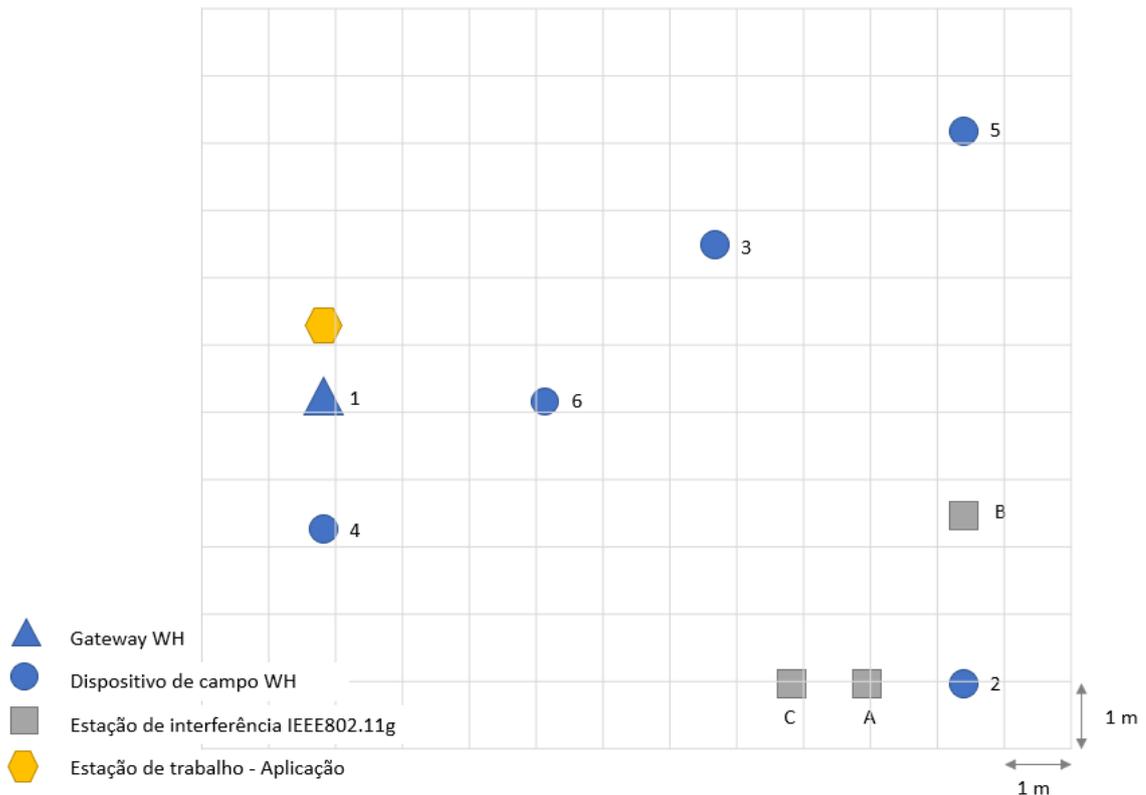
A aplicação coordenadora foi executada em um computador móvel convencional com sistema operacional Windows 10, conectado via cabo Ethernet no gateway WH. A Tabela 7 apresenta a lista dos equipamentos utilizados no ensaio.

**Tabela 7. Equipamentos utilizados.**

Dispositivo	Quantidade	Fabricante	Função
Gateway WH	1	Emerson Rosemount	Gerenciador da rede WH
Dispositivo de Campo	5	GCAR	Dispositivo sensor/atuador
Analisador de Espectro	1	FieldFox	Monitorar qualidade do espectro de frequência
Laptop convencional	3	Acer/Asus/Sony	Aplicação coordenadora/Gerador de interferência
Ponto de Acesso	1	Arcadyan Technology	Gerador de interferência

### 5.3 Estudo de Caso

No mundo real, há muitas possibilidades de cenários de coexistência, com diferentes redes, tecnologias, configurações e condições de ambientes. O propósito do experimento é validar como ocorre a leitura das condições dos canais da rede WH quando há ocorrência de interferência dentro dos canais utilizados na rede. Neste caso foi utilizado para a geração de interferência a tecnologia IEEE802.11g, entretanto o sistema proposto não é limitado a tal tecnologia, uma vez que o método de sensoriamento utilizado é o de detecção de energia. No cenário de análise foi considerado um conjunto de dispositivos WH sofrendo interferência de um grupo de dispositivos do tipo Wi-Fi (IEEE 802.11g). Para o estudo de caso foi instalado uma rede WH com 5 dispositivos de campo além do gateway WH. A Figura 33 ilustra a distribuição dos dispositivos no cenário de teste.



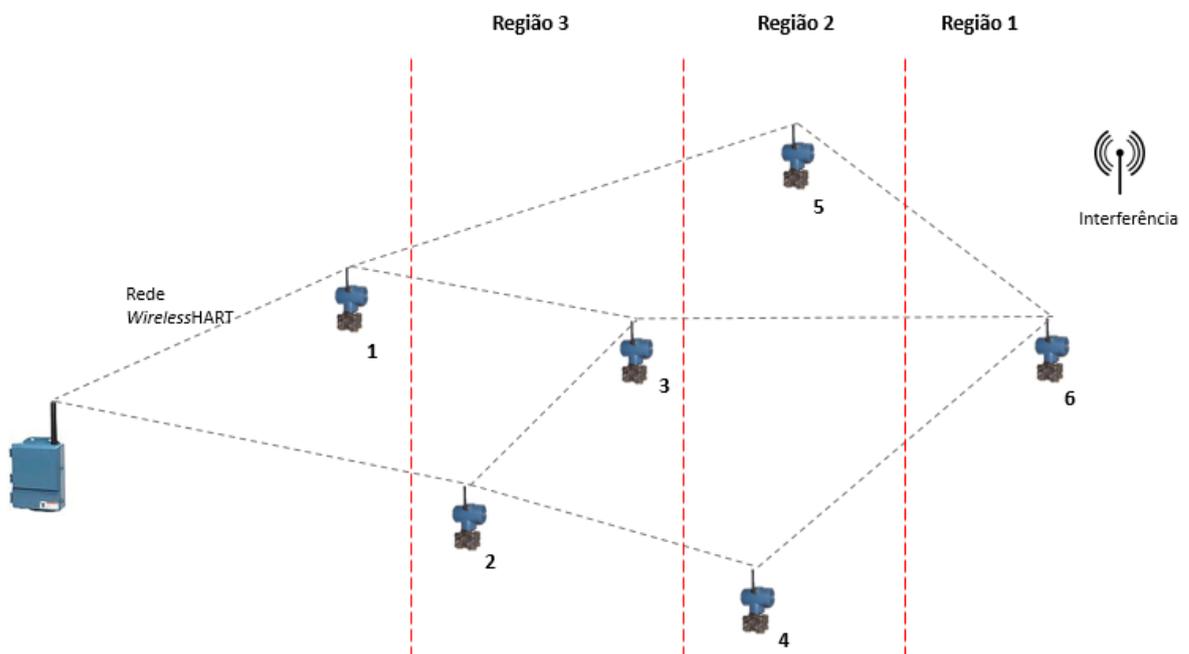
**Figura 33. Distribuição dos dispositivos WH.**

Os dispositivos de campo foram configurados com diferentes valores de potência de transmissão com o objetivo de representar maior diversidade em relação as distâncias e diferentes combinações de níveis de sinal interferente e desejado. A relação sinal ruído é um fator importante neste processo de sobreposição de sinais interferentes, podendo haver diferentes tipos de regiões com condições distintas. A Figura 34 ilustra alguns dos diferentes tipos possíveis de regiões interferentes.

Região 1: Dispositivos WH sofrem severa interferência, local onde a relação SIR encontra-se com o menor valor dentro do cenário de teste;

Região 2: Dispositivos WH dentro desta região devem ser capazes de identificar sinal interferente, entretanto a relação SIR deve ser suficientemente grande para diminuir as falhas de comunicação em relação às condições da Região 1;

Região 3: A menos afetada, comunicação dentro desta área não deve sofrer perdas, e a energia detectada deve ser muito pequena. Entretanto, comunicação destes dispositivos com dispositivos nas zonas inferiores podem ser afetadas.



**Figura 34. Ilustração das diferentes regiões quanto ao SIR.**

A situações também na qual um determinado dispositivo pode comunicar-se com outros dispositivos em diferentes regiões, tais como, os dispositivos 3 e 6, e dispositivos 5 e 1, conforme exemplo acima.

A Tabela 8 apresenta os valores dos parâmetros adotados nos dispositivos do experimento.

**Tabela 8 . Relação de parâmetros utilizados no ds dispositivos de campo.**

Dispositivo	Apelido (nickname)	Potência de Saída (dBm)	Tempo de Publicação (s)
Gateway WH	1	10	NA
1003	5	-7	60
1005	4	-7	60
1007	3	-7	60
1008	2	-7	60
1021	6	-7	60

### 5.3.1 PARÂMETROS DE INTERFERÊNCIA DO IEEE 802.11

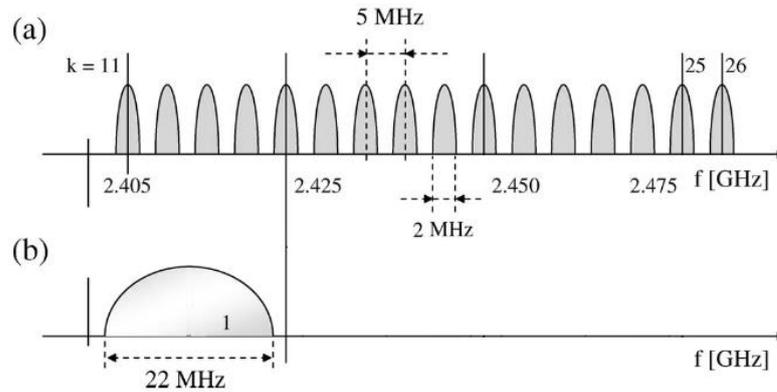
O protocolo IEEE 802.11, presente na marca Wi-Fi, muito popular e utilizado em diversas aplicações, é provavelmente a tecnologia de comunicação sem fio mais utilizada atualmente no mundo. O IEEE 802.11 apresenta uma banda larga em relação ao WH assim como uma potência de transmissão alta (até 20 dBm). Sendo uma tecnologia muito presente em diferentes soluções. O Capítulo 3 descreve em mais detalhes cenários de interferência considerando este protocolo.

No estudo de caso foram utilizados três dispositivos ajustados para realizar a comunicação com o IEEE802.11g. Os parâmetros de configuração estão descritos abaixo.

- Protocolo de transporte: UDP;
- Taxa de dados: 4480 pacotes/s;
- Variação do tamanho do pacote: sem variação, constante;
- Tamanho do pacote: 1472 Bytes;
- Largura de banda: 53760 kb/s;

- Canal: 1;

No cenário de ensaio a rede WH utiliza os 15 canais enquanto a rede IEEE 802.11 opera com o canal 1, havendo sobreposição direta de 4 dos 15 canais do WH. A Figura 35 ilustra uma comparação entre os canais WH e o canal utilizado do protocolo IEEE802.11.

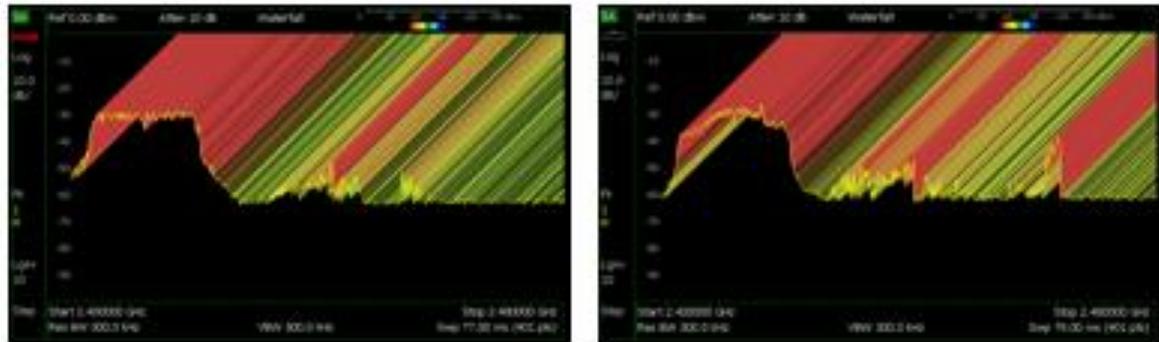


**Figura 35. Frequências utilizadas (a) WH e (b) IEEE 802.11.**

No cenário de estudo de caso os canais 11, 12, 13 e 14 ficaram sobrepostos à interferência controlada (IEEE802.11).

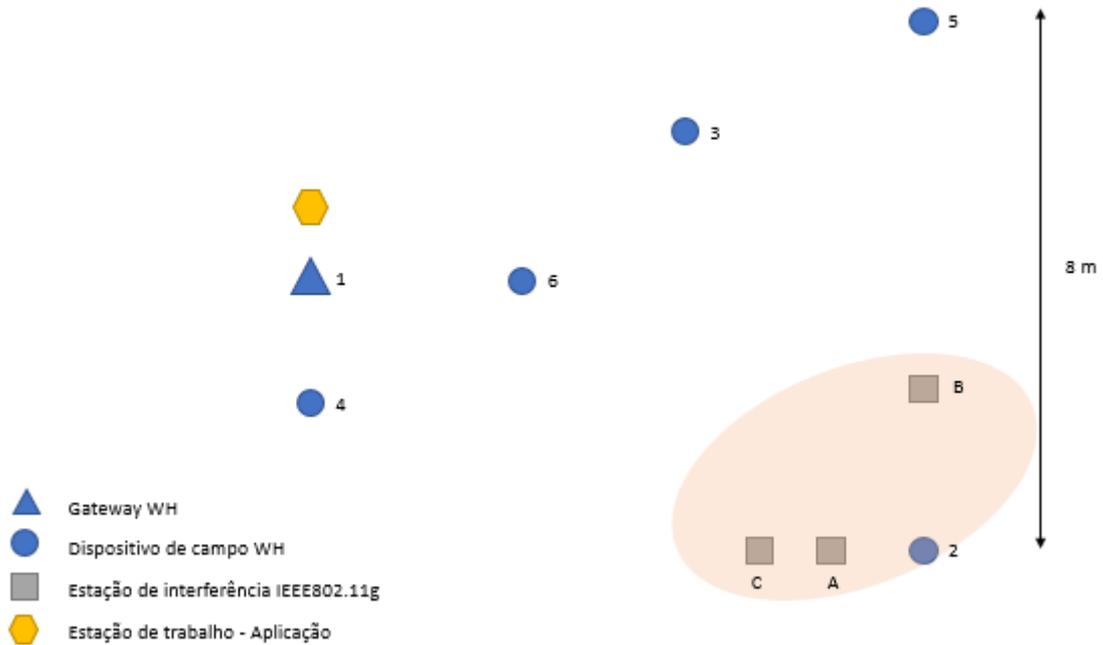
### 5.3.2 PROCEDIMENTOS DO ENSAIO - CONDIÇÕES DO AMBIENTE

O experimento foi conduzido durante um período aproximado de 3 horas, sendo os primeiros 40 minutos sem inserção de interferência, posteriormente 60 minutos com interferência controlada e o tempo restante operando com a interferência controlada desligada. A Figura 36, ilustra uma análise do espectro em dois momentos distintos durante o período de interferência.



**Figura 36. Monitoramento do espectro (FieldFox).**

É possível identificar além da interferência controlada no canal 1 (IEEE802.11), a presença de outras redes no espectro na faixa de 2.4 GHz. A Figura 37 destaca a área com maior concentração de interferência controlada no cenário de ensaio (canal 1 do IEEE802.11).



**Figura 37 . Distribuição dos dispositivos WH e zona de maior interferência.**

Parâmetros utilizados

O método proposto apresenta um conjunto de parâmetros para a dinâmica do processo de identificação e classificação dos recursos utilizados na rede. Abaixo segue os valores utilizados dos parâmetros utilizados neste cenário de estudo. Estes parâmetros podem ser alterados e devem apresentar resultados diferentes de desempenho.

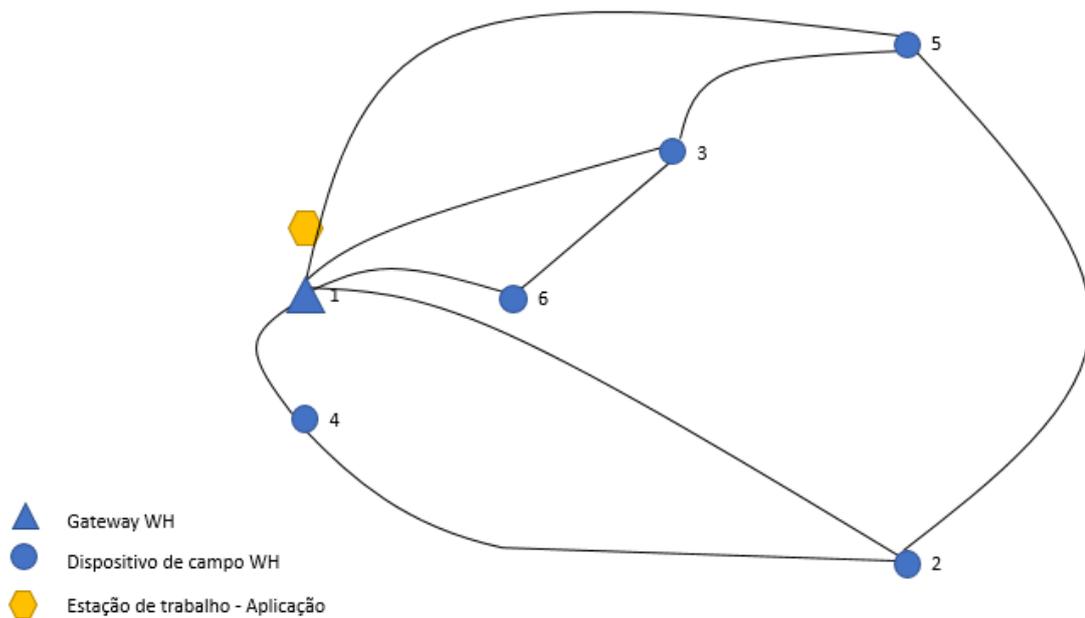
- Limiar de energia inicial: -70 dBm
- Fator de alisamento: 0,3
- Limiar de classificação de canal: 0,35
- Período de amostragem de informações dos dispositivos: 1,5 min.

## 6 RESULTADOS

Neste Capítulo são descritos os resultados da aplicação desenvolvida e o desempenho obtido no cenário de estudo de caso.

### 6.1 Topologia da Rede

Após a instalação da rede WH a seguinte topologia de rede foi estabelecida (ver Figura 38). A topologia de rede é atribuída de acordo com o tempo de entrada dos dispositivos de campo e através de variáveis de desempenho da rede, tais como, falta de atualizações.



**Figura 38 . Topologia de rede WH.**

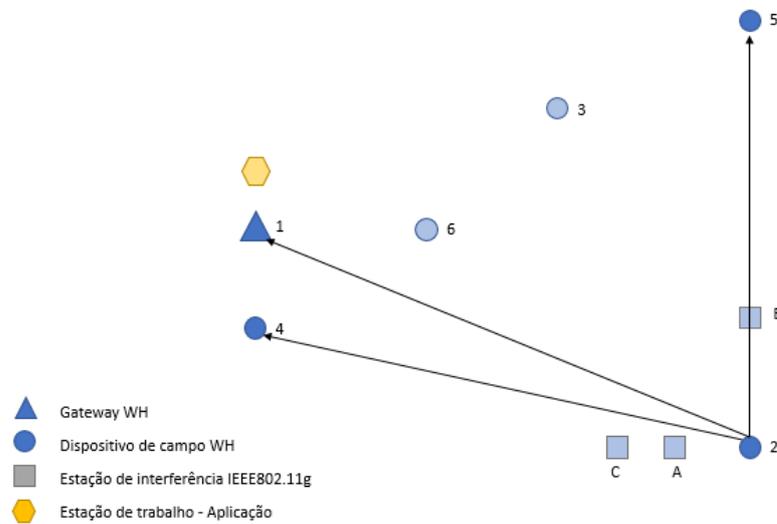
Para simplificar a análise dos resultados será destacado o desempenho dos dispositivos de campo 2 e 5 e seus respectivos vizinhos.

### 6.2 Análise de Desempenho do Dispositivo de Campo 2

O dispositivo de campo 2 após a formação da rede estabeleceu conexões com os dispositivos 1, 4 e 5. Durante o processo de inserção de interferência o dispositivo 2 ficou

localizado dentro de um raio de aproximadamente 2,5 metros em relação aos dispositivos interferentes (A, B e C), ver Figura 39.

A Figura 40 ilustra o desempenho dos canais quanto a classificação instantânea de seu estado considerando um dispositivo vizinho específico, assim como o processo de adaptação do limiar de energia de cada canal.



**Figura 39. Dispositivo de campo 2 e seus respectivos vizinhos.**

Após o início e durante o período de interferência, observa-se o ajuste do limiar de energia para cada canal da rede (Figura 40). Os canais na faixa de espectro monitorada, com a interferência controlada, logo são classificados como canais ocupados. Nesta ilustração ainda não foi considerado o algoritmo de predição e representa a classificação instantânea da condição do canal.

A Figura 40 ilustra para cada canal utilizado pelo dispositivo 2 para transmissão para o dispositivo 4, os dados de energia coletado e sua relação com o ajuste de limiar de detecção. No quadro superior da Figura 40 estão os resultados da variação de limiar de energia para os 15 canais, enquanto na parte inferior é ilustrado a ocupação momentânea dada pelo algoritmo

em relação ao nível de energia medido e o limiar de detecção ajustado, o eixo x do gráfico representa o tempo.

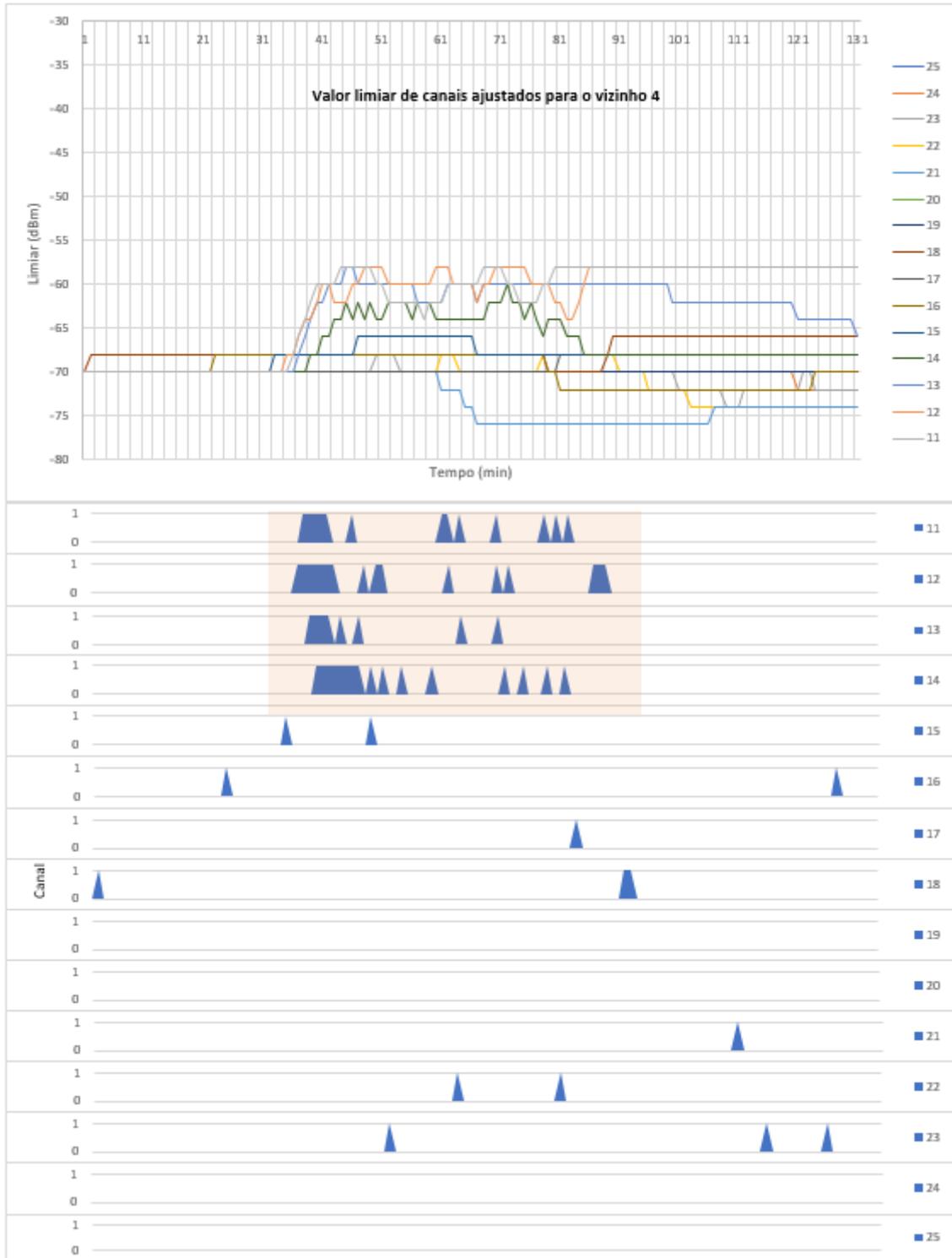
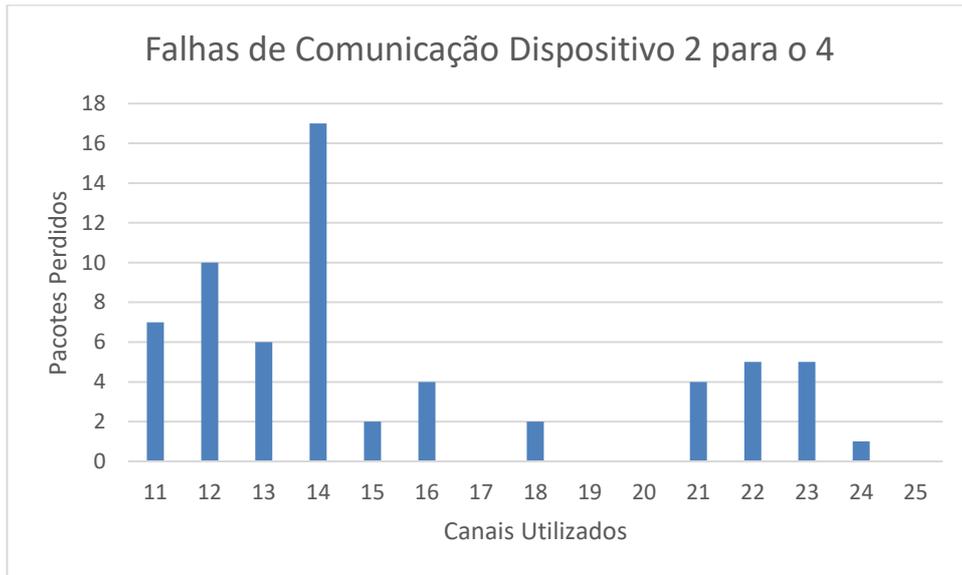


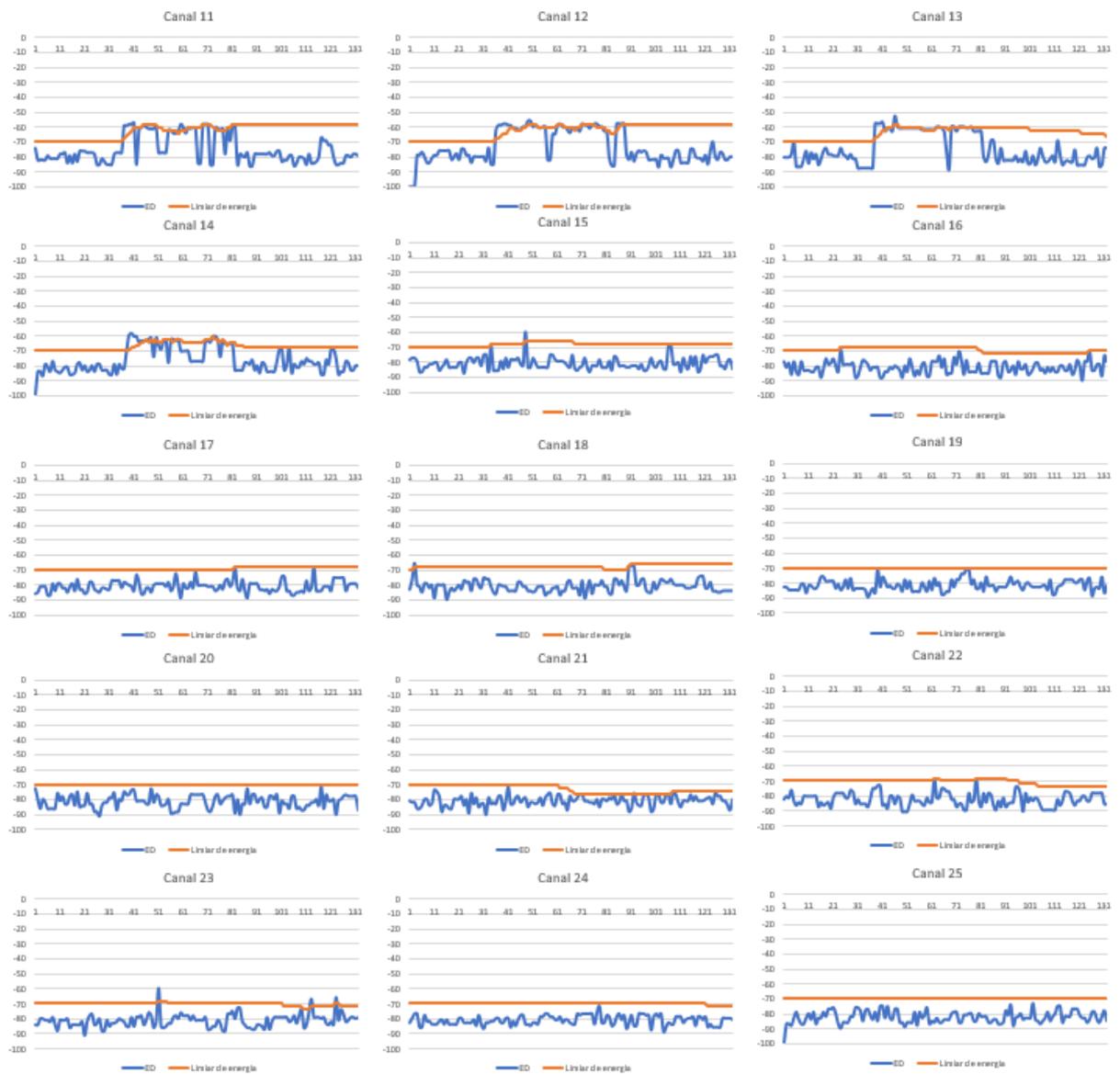
Figura 40 . Variação do limiar de energia e mapa de classificação de canais (Dispositivo 2 para 4).

O gráfico localizado na Figura 41 ilustra as perdas de comunicação do dispositivo 2 para o 4. Observa-se que a região sob interferência controlada registrou maior número de perdas. Outros canais também registraram perdas provenientes de outras fontes interferentes, conforme detalhado na Seção 5.3.1.



**Figura 41. Relação de pacotes perdidos por canal e vizinho (2 para o 4).**

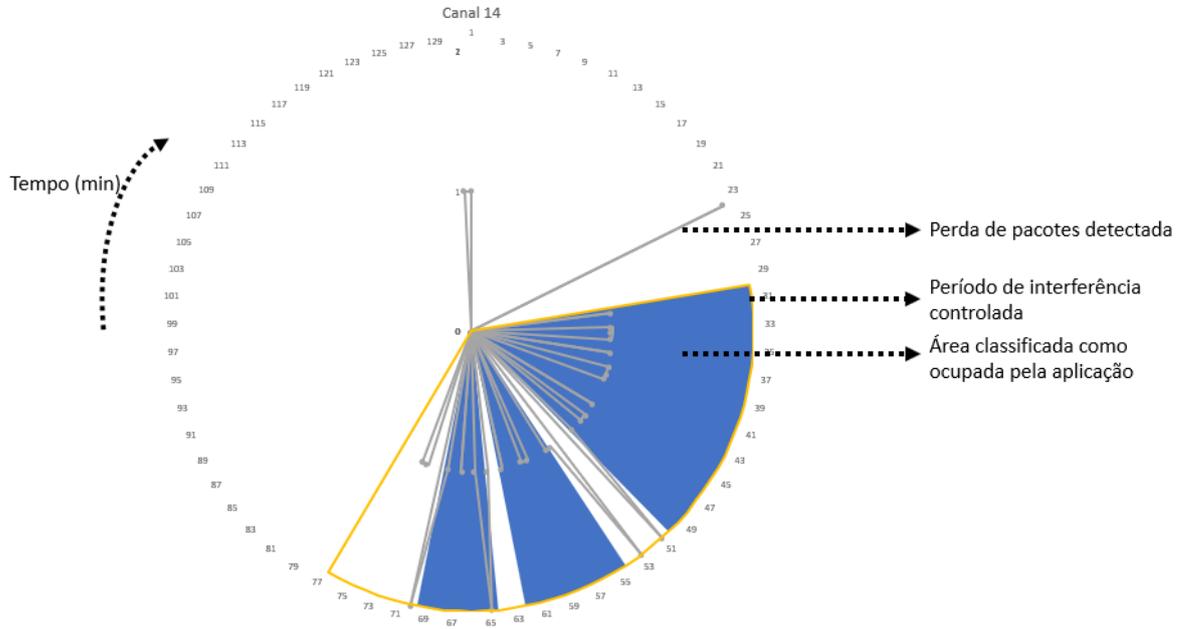
A Figura 42 ilustra o resultado do sensoriamento de espectro e o desempenho da variação do limiar de energia para cada canal utilizado na comunicação com o dispositivo 4. Observa-se que os canais sob interferência direta apresentam uma variação mais significativa no ajuste do limiar de detecção de energia no espectro.



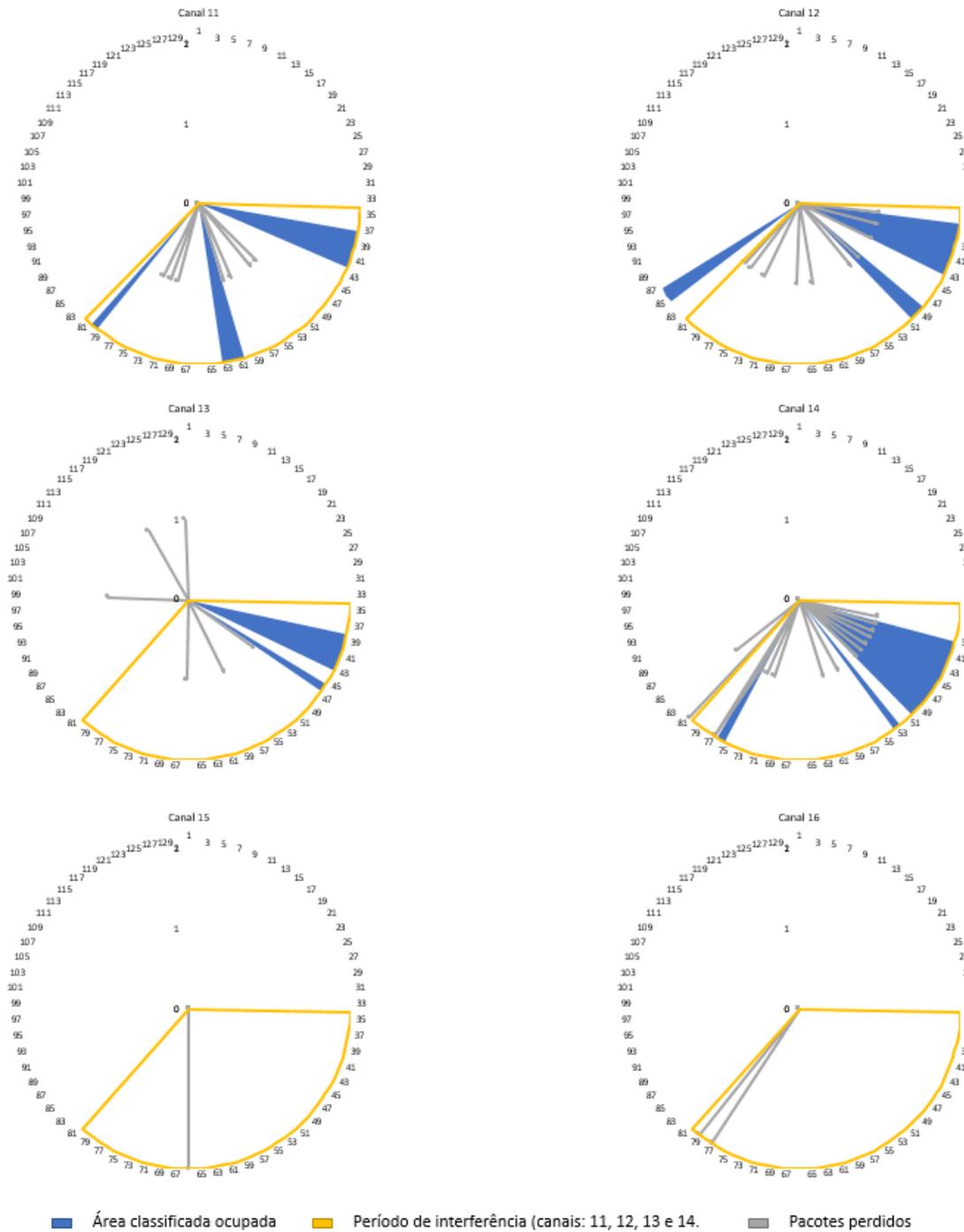
**Figura 42. Desempenho do sensoriamento de espectro dos canais utilizados do Dispositivo 2 para o 4 e resposta da variação de limiar de energia (dBm x Tempo).**

A Figura 43 ilustra como interpretar os gráficos de interferência, a área em amarelo representa o período da interferência controlada, as barras em cinza são os intervalos onde ocorreram falhas de comunicação (perdas de pacotes), e a área em azul quando o canal é classificado como ocupado. A Figura 44 apresenta a classificação do estado do canal após a etapa de decisão do algoritmo. São apresentados de forma pontual o desempenho dos canais

11, 12, 13 e 14, com sobreposição direta da interferência controlada, assim como os canal adjacente 15 e o canal alternado 16.

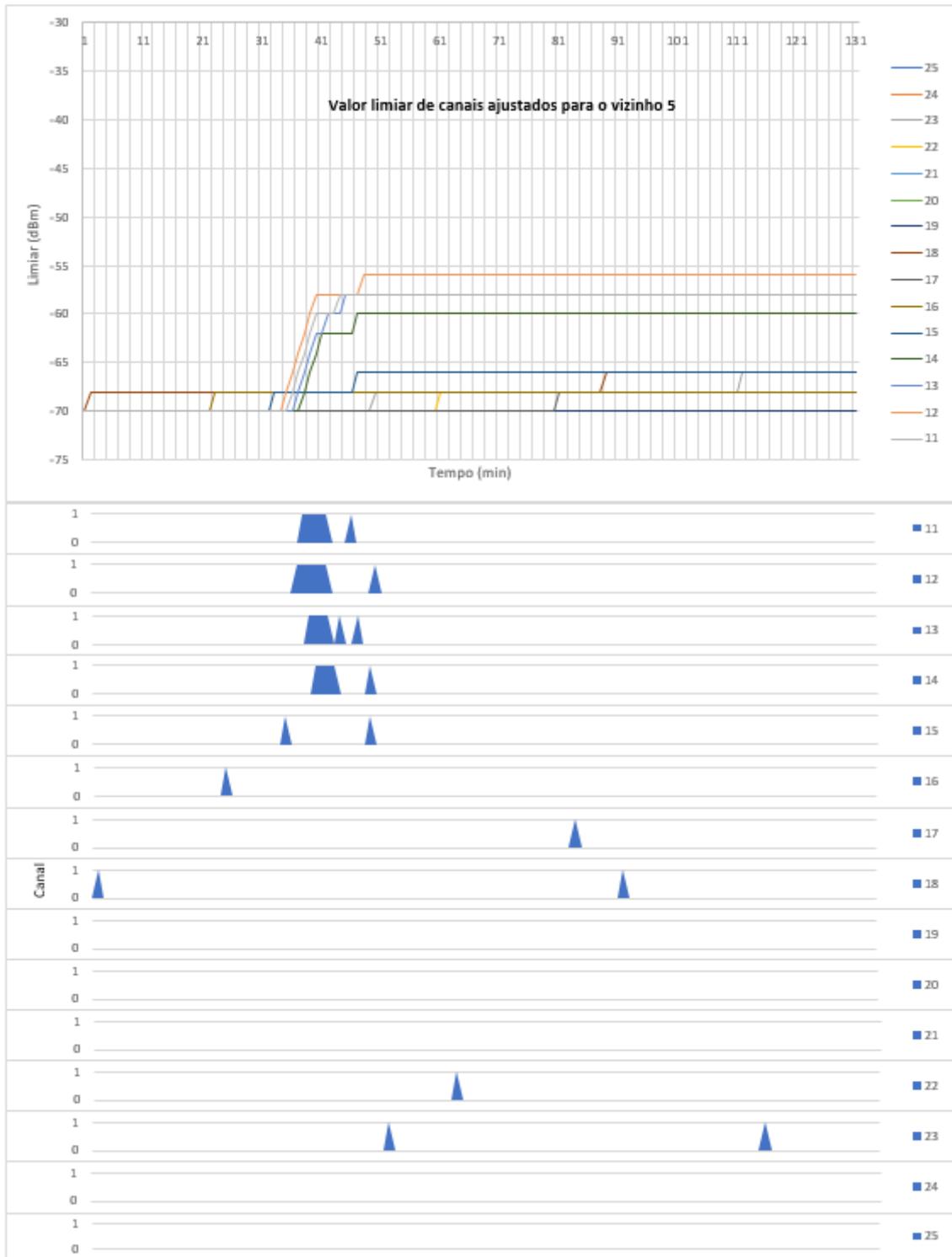


**Figura 43. Ilustração explicativa da interpretação dos gráficos de interferência.**



**Figura 44 . Desempenho do classificador de canais (dispositivo 2 para 4).**

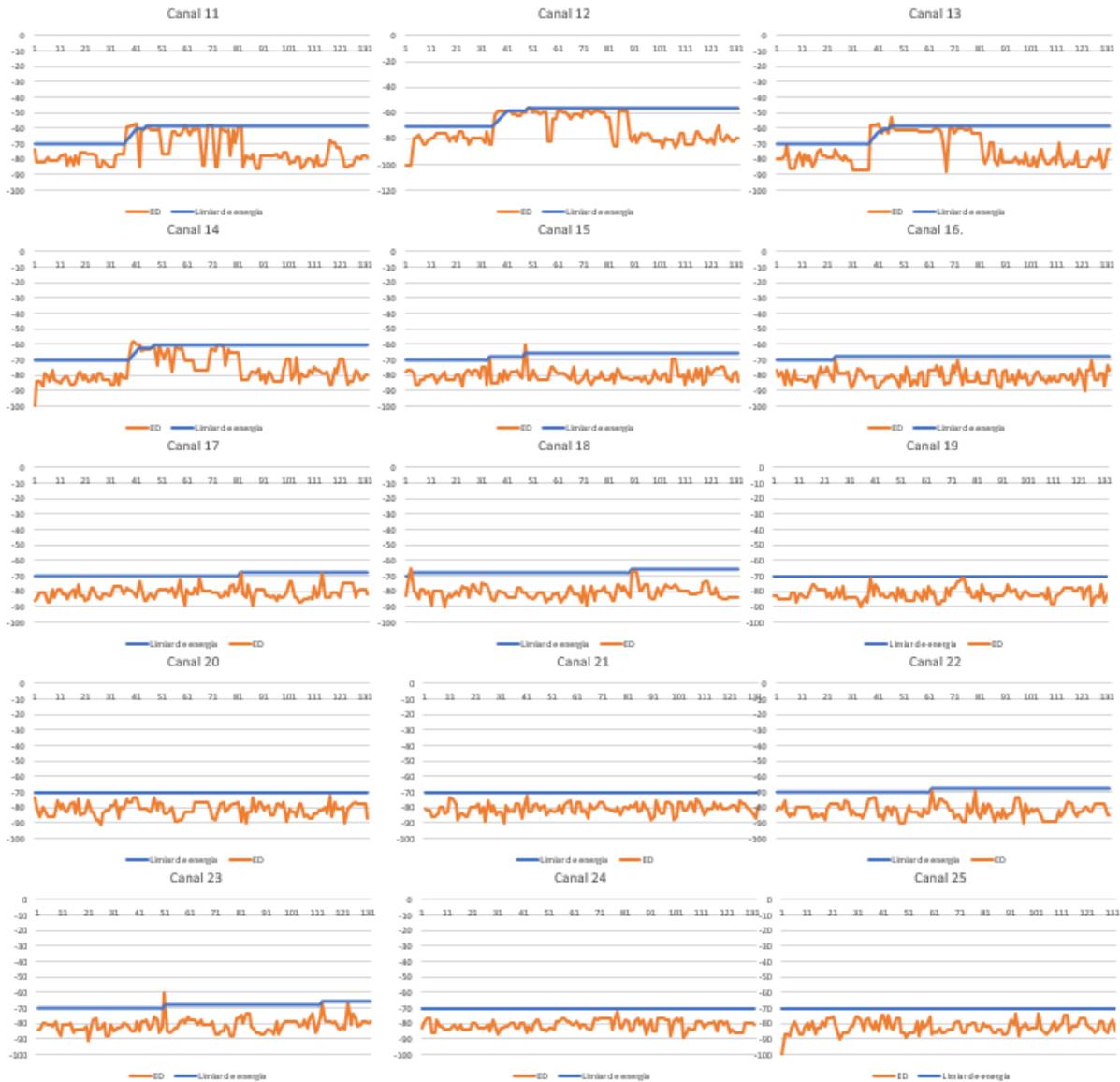
A Figura 45 ilustra o desempenho dos canais em relação ao dispositivo 5. É possível observar maior variação no ajuste do limiar de detecção para os canais na área sobreposta à interferência controlada.



**Figura 45. Variação do limiar de energia e mapa de classificação de canais (Dispositivo 2 para 5).**

O gráfico relacionado as perdas de mensagens durante a comunicação para o dispositivo 5 não é apresentado, pois durante o período de ensaio o dispositivo 2 não apresentou perda de pacotes na comunicação para o dispositivo 5. Pode-se observar na Figura

46 o desempenho do algoritmo de ajuste do limiar de detecção. Nota-se que para os canais sob interferência 11, 12, 13 e 14, o limiar de detecção alcança a ordem de -59 dBm, -57 dBm, -58dBm e -60dBm respectivamente.



**Figura 46. Desempenho do sensoriamento de espectro dos canais utilizados do Dispositivo 2 para o 5 e resposta da variação de limiar de energia (dBm x Tempo).**

A Figura 47 ilustra o desempenho do canal após a etapa de decisão. Pode-se observar durante um curto período, logo após o início do período interferente, os canais 11, 12, 13 e 14 são classificados como canais ocupados, ocorrendo em função de uma mudança abrupta de

energia no espectro, logo após o ajuste do limiar de detecção o canal volta a ficar no estado livre.

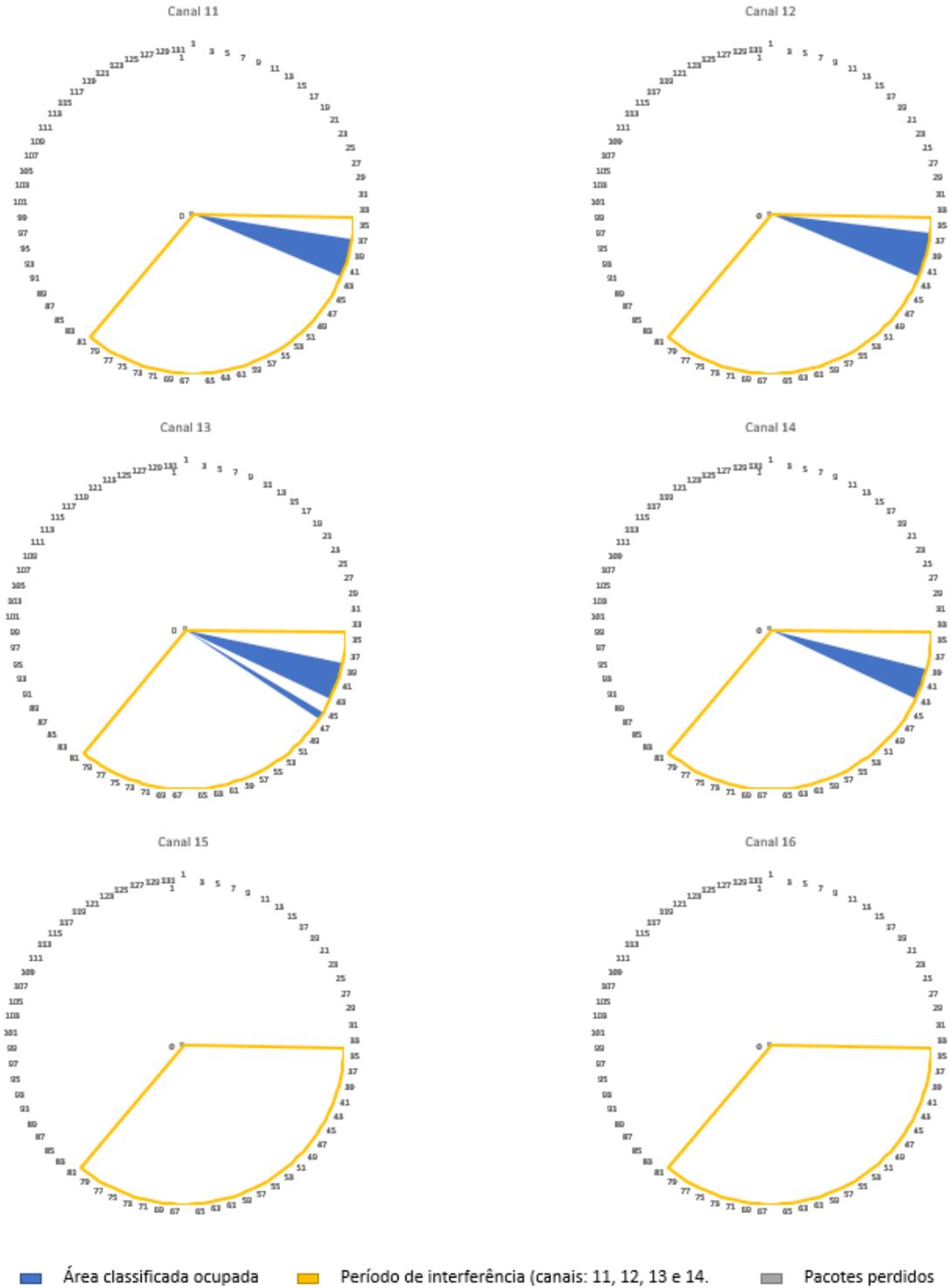


Figura 47. Desempenho do classificador de canais (dispositivo 2 para 5).

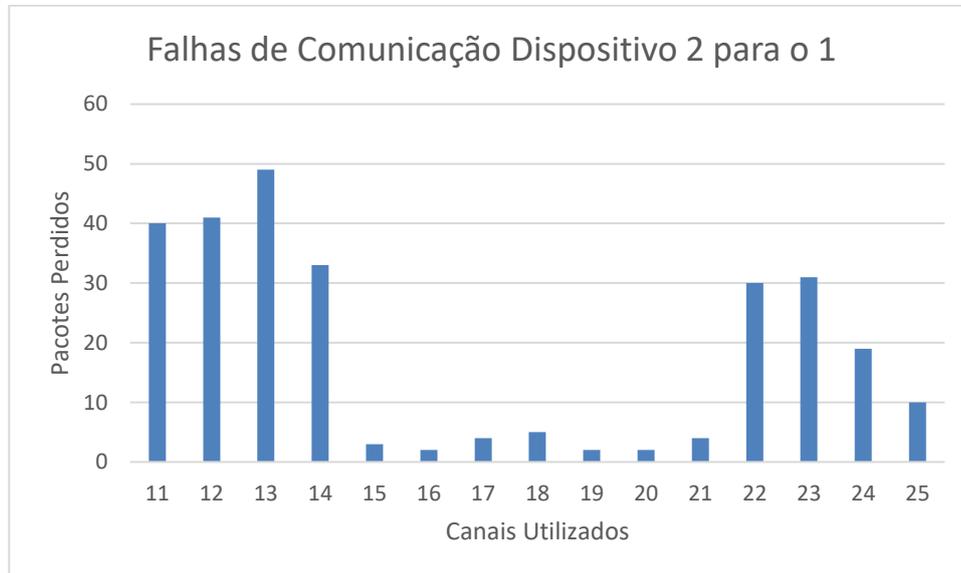
A Figura 48 ilustra o desempenho dos canais utilizados para o dispositivo 1 da perspectiva do dispositivo 2. Observa-se que em relação aos outros vizinhos a comunicação entre o dispositivo 2 e 1 estão mais suscetíveis a interferência. Há uma diversidade grande nos diferentes valores de limiar de detecção ajustados para os canais utilizados, apresentado, por exemplo, para os canais 12 e 24 os valores de -61 dBm e -80 dBm respectivamente.



**Figura 48. Variação do limiar de energia e mapa de classificação de canais (Dispositivo 2 para 1).**

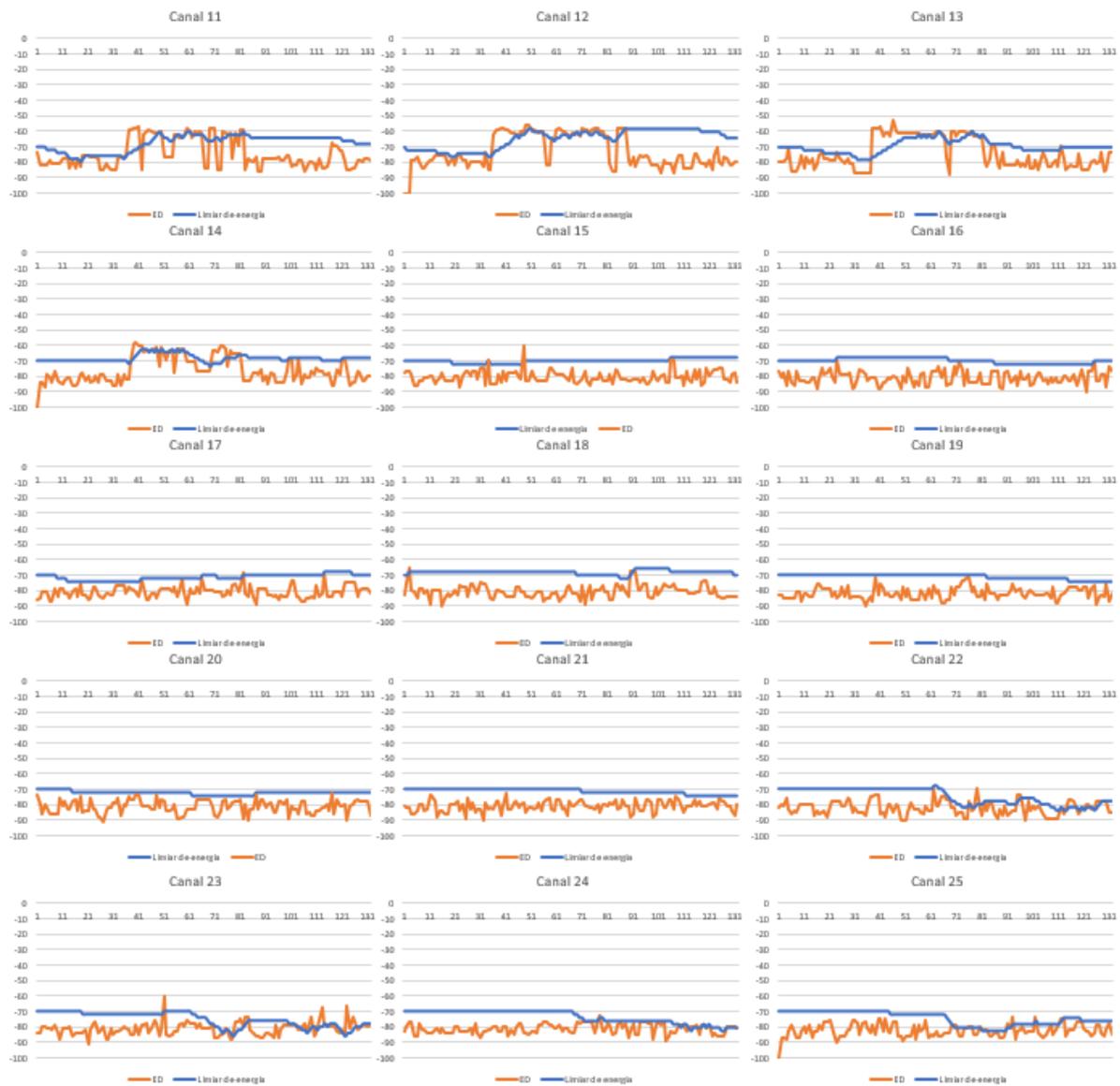
O gráfico na Figura 49 ilustra as perdas registradas nos canais monitoradas. O canal 13 apresentou aproximadamente 50 falhas de comunicação, seguido pelos canais 12 e 11 com

perdas de 42 e 39 pacotes durante todo o período. Canais no fim da faixa, 22, 23, 24 e 25 também foram afetadas por outras interferências além da controlada.



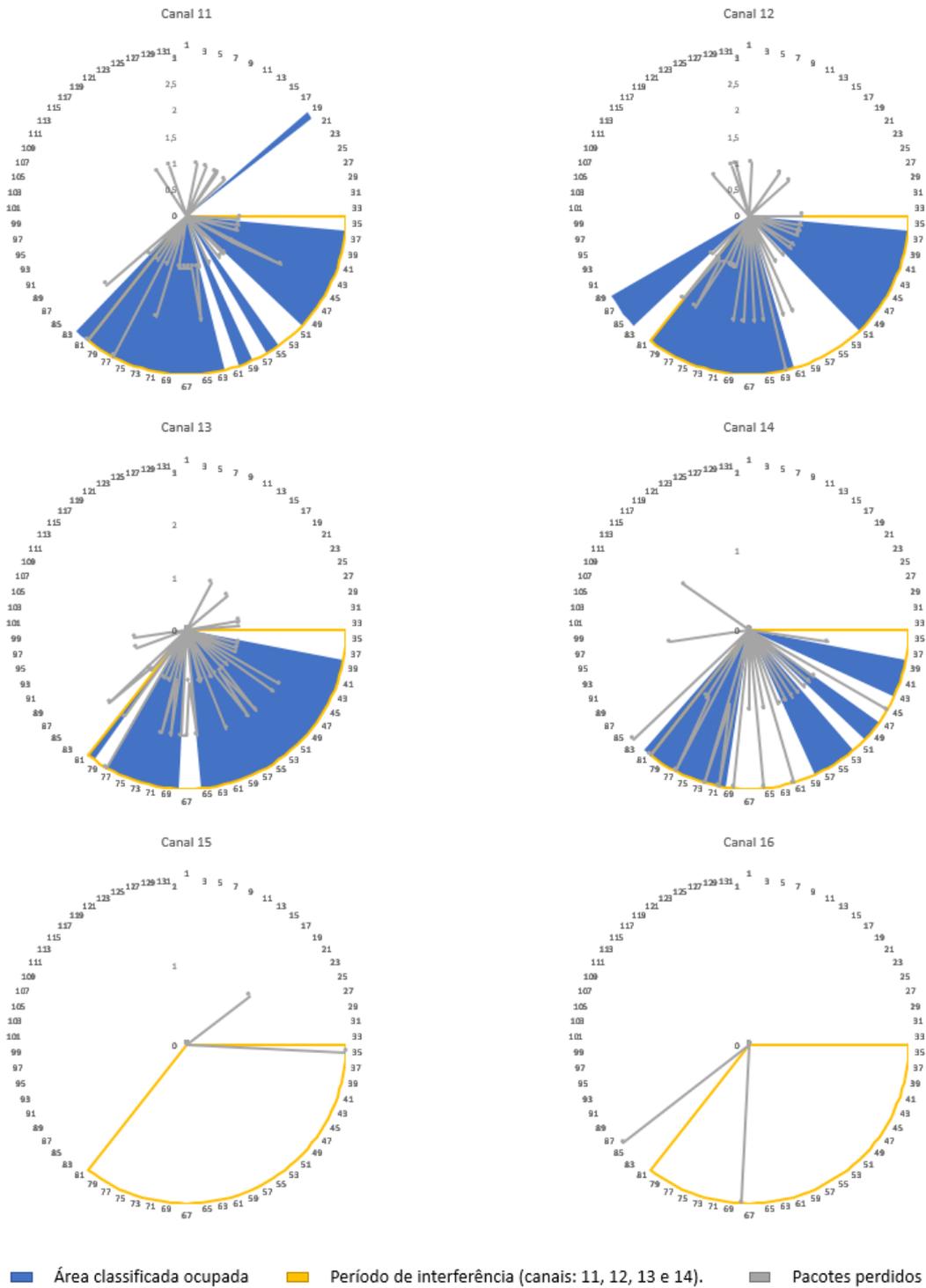
**Figura 49. Relação de pacotes perdidos por canal e vizinho (2 para o 1).**

Na Figura 50 é apresentado a variação do limiar de detecção e da energia presente no espectro para cada canal em relação ao vizinho 1.



**Figura 50. Desempenho do sensoriamento de espectro dos canais utilizados do Dispositivo 2 para o 1 e resposta da variação de limiar de energia (dBm x Tempo).**

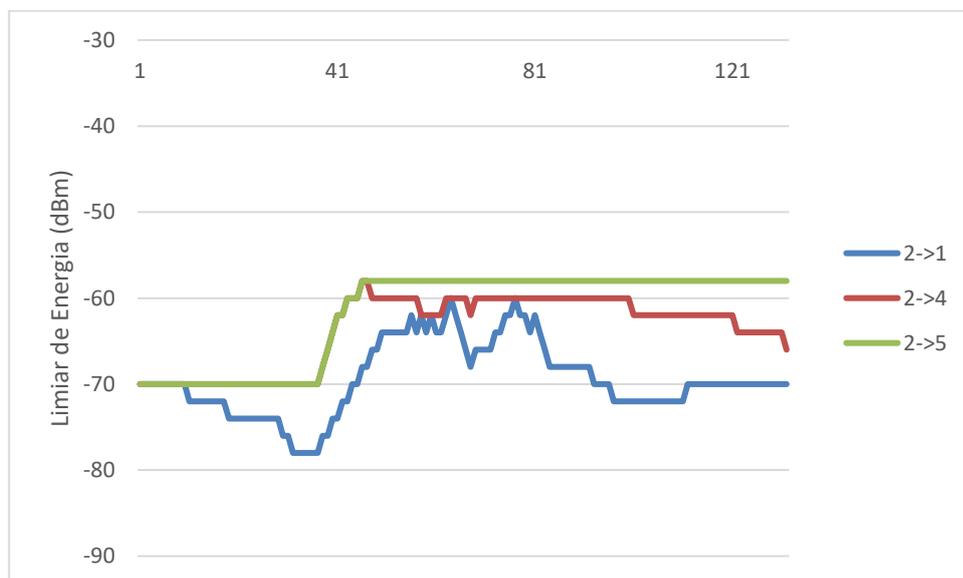
A Figura 51 ilustra o desempenho do algoritmo para os canais 11, 12, 13, 14, 15 e 16. Observa-se que os canais na área com maior interferência (11- 14), apresentam um período maior quanto a classificação do estado para ocupado. Os canais 15 e 16 não foram classificados como canais ocupados durante nenhum instante.



**Figura 51. Desempenho do classificador de canais (dispositivo 2 para 1).**

A Figura 52 ilustra e compara de forma mais detalhada os diferentes limiares de energia ajustados durante o processo de operação da rede no dispositivo 2 para os seus vizinhos (dispositivos 1, 4 e 5). Neste gráfico pode-se destacar o desempenho do canal 13 do

dispositivo 2 para o 1, onde ocorre um ajuste antecipado em relação as definições para os dispositivos 4 e 5. Também acontece uma busca inicial para um limiar menor do que o estado inicial, chegando a aproximadamente -80 dBm, após o início do processo de interferência este limiar começa a convergir para o mesmo sentido do valor ajustado para os outros dispositivos. Este evento possivelmente ocorreu em função de outra rede interferente, não controlada, a qual causou uma perturbação significativa para a conexão entre dispositivo 2 e 1, porém não relevante para os dispositivos 4 e 5. Este tipo de evidência reforça a relevância e possibilidade de otimização de diferentes recursos entre diferentes dispositivos de uma rede, pois destaca como o mesmo canal pode ter diferentes condições de desempenho para diferentes comunicações.



**Figura 52. Comparação de variação do limiar de energia do dispositivo 2 para os seus diferentes vizinhos, registrando o desempenho do canal 13.**

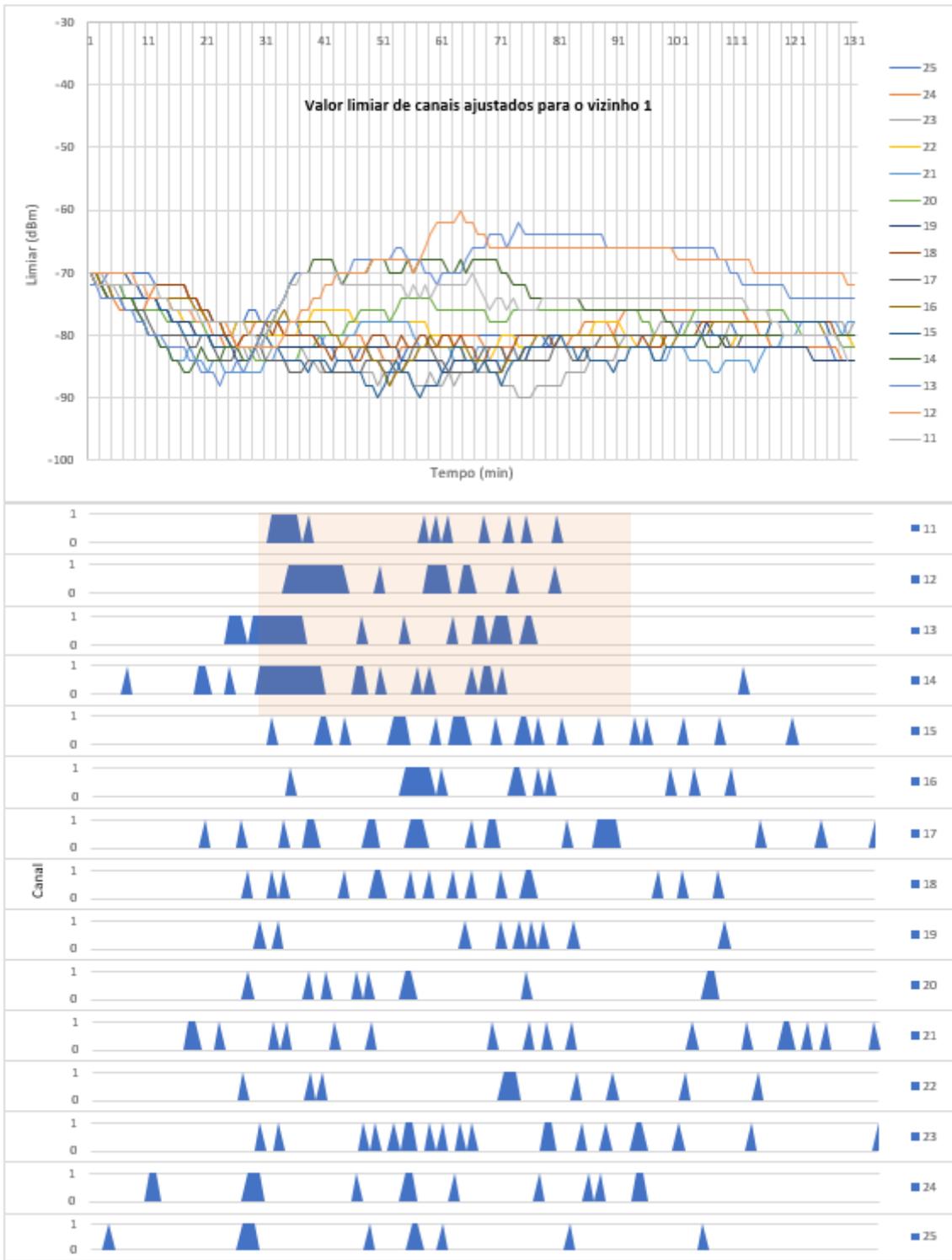
Os resultados demonstram a classificação de canal como ocupado mais severa durante o período de interferência para os dispositivos 1 e 4. É possível observar que a conexão do dispositivo 2 para o dispositivo 1 encontra-se em condições de interferência muito suscetíveis em praticamente todos os canais, mas de forma mais intensa nos canais com a interferência

controlada. O dispositivo 5 apenas durante o início da interferência registou os canais 11, 12, 13 e 14 como ocupados, mas logo durante o processo ajustou o limiar e disponibilizou os canais de forma permanente.

### **6.3 Análise de Desempenho do Dispositivo de Campo 5**

O dispositivo de campo 5 após a formação da rede estabeleceu conexões com os dispositivos 1, 2 e 3. Durante o processo de inserção de interferência o dispositivo 2 ficou localizado dentro de um raio de aproximadamente 6 metros em relação aos dispositivos interferentes.

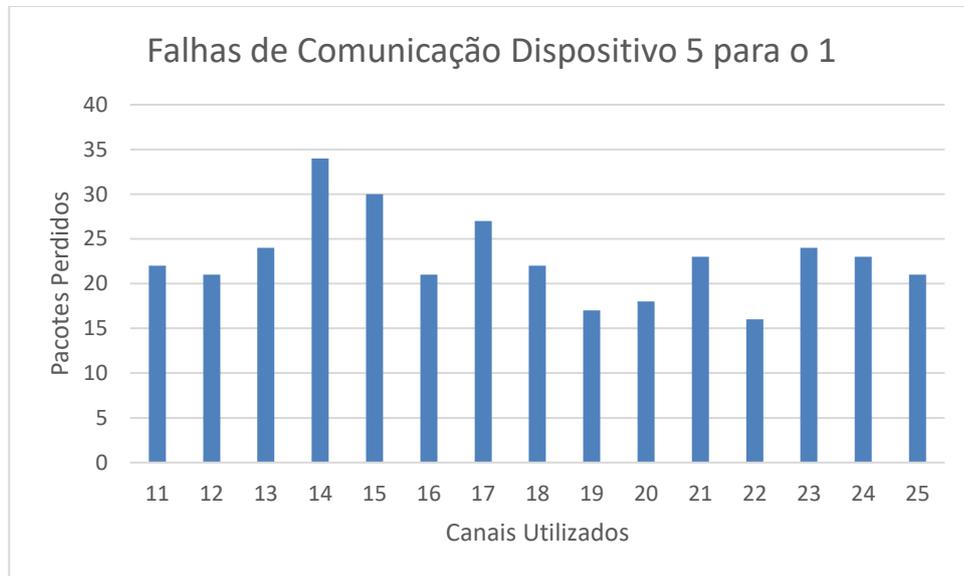
A Figura 53 apresenta o desempenho da classificação de canais do dispositivo de campo 5 para o dispositivo vizinho 1. A relação de canais para o dispositivo 5 encontra-se mais estável e fica mais claro a detecção nos canais na zona de interferência controlada. Observa-se que desde o início da rede já havia um sinal interferente afetando a qualidade do enlace, levando os limiares de detecção a ajustes de menor valor (aproximadamente -85 dBm).



**Figura 53. Variação do limiar de energia e mapa de classificação de canais (Dispositivo 5 para 1).**

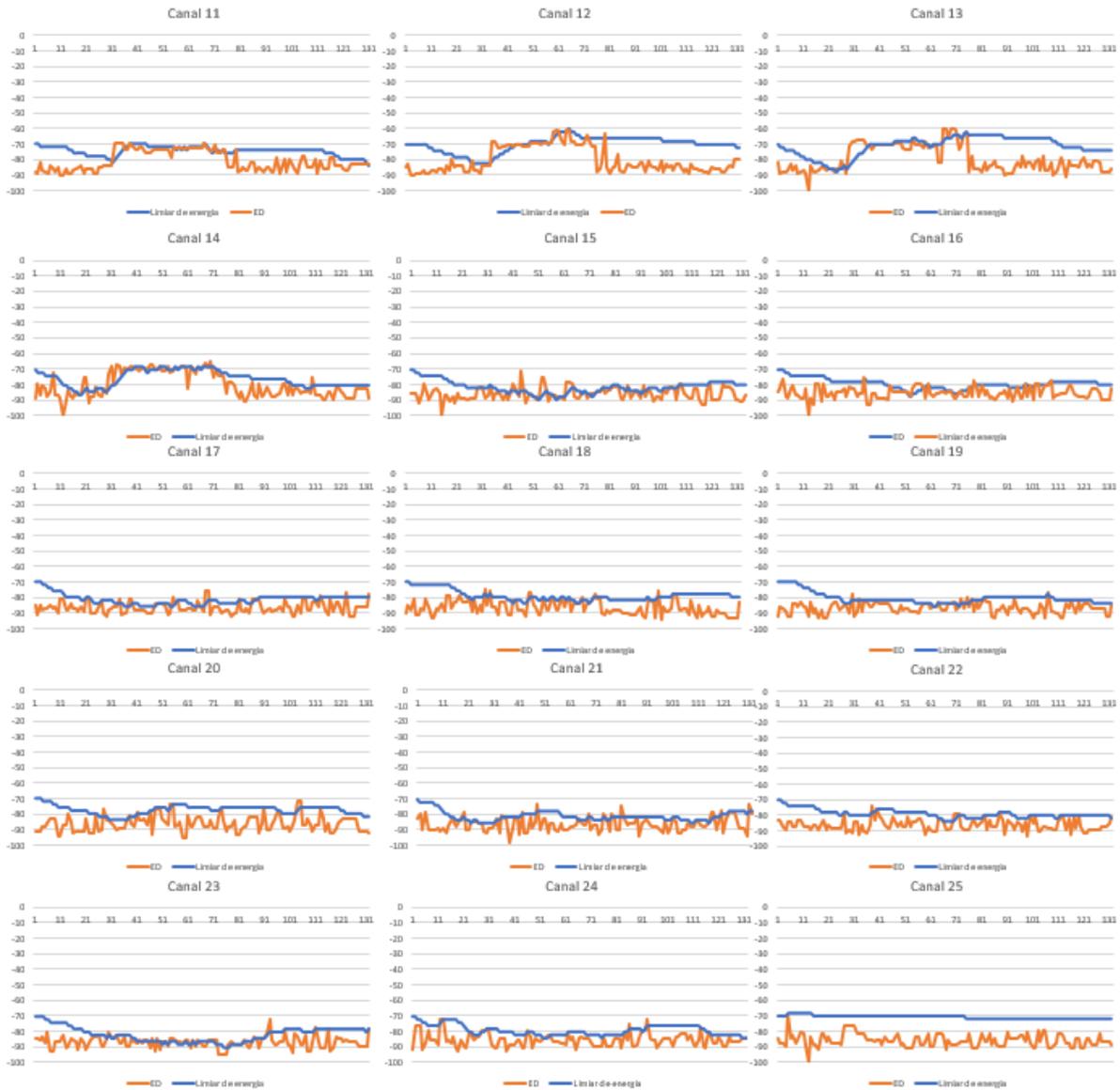
A comunicação existente entre o dispositivo 5 e 1 apresenta-se muito suscetível à interferência, registrando perdas em todos os canais utilizados. A Figura 54 apresenta a

quantidade de pacotes perdidos durante o período de execução do experimento, sendo o canal 14 com o maior número de perdas.



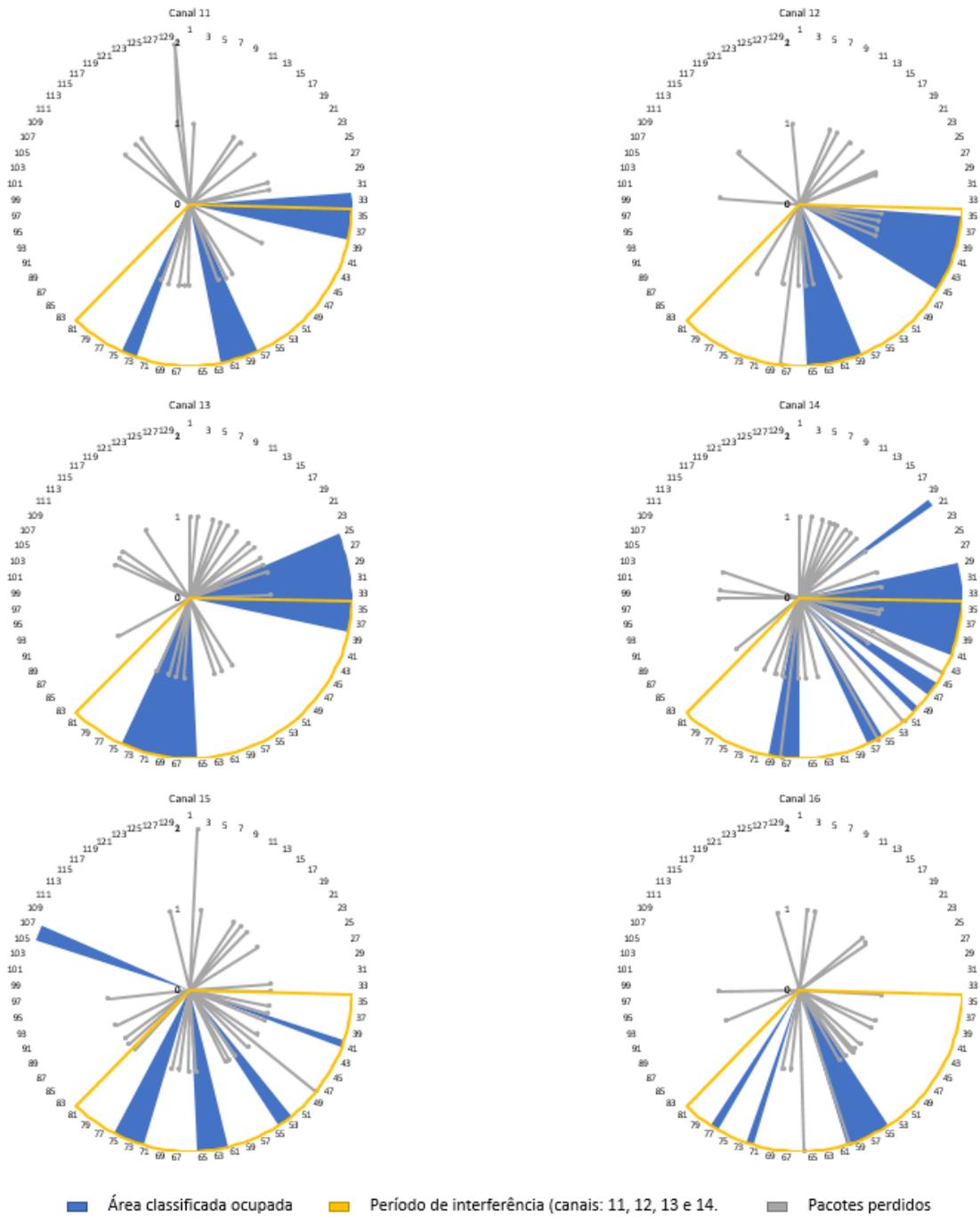
**Figura 54 . Relação de pacotes perdidos por canal e vizinho (5 para o 1).**

A Figura 55 ilustra o desempenho dos canais monitorados, havendo variação do limiar de detecção em todos os canais. Observa-se que com exceção dos canais com interferência controlada os outros canais tem seu limiar de detecção ajustado para valores inferiores ao parâmetro de inicialização.



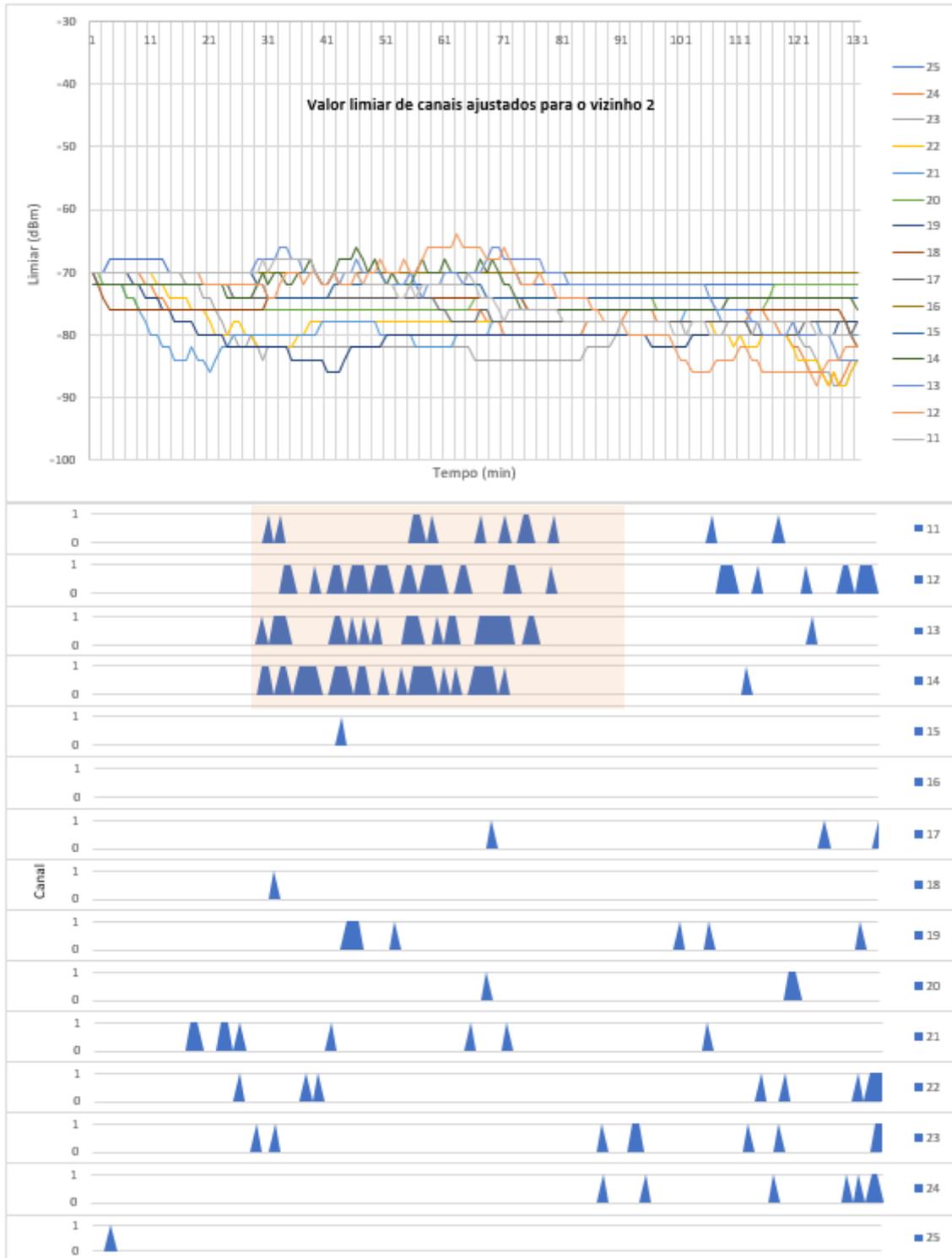
**Figura 55. Desempenho do sensoriamento de espectro dos canais utilizados do Dispositivo 5 para o 1 e resposta da variação de limiar de energia (dBm x Tempo).**

A Figura 56 apresenta os resultados do algoritmo para a classificação dos canais 11, 12, 13, 14, 15 e 16. Em todos os canais é possível observar perdas de pacotes distribuídas ao longo de todo o período monitorado, além do período com a inserção do sinal interferência controlado. Neste caso observa-se que níveis de energia inferiores ao da interferência controlada já resultavam em perda de pacotes.



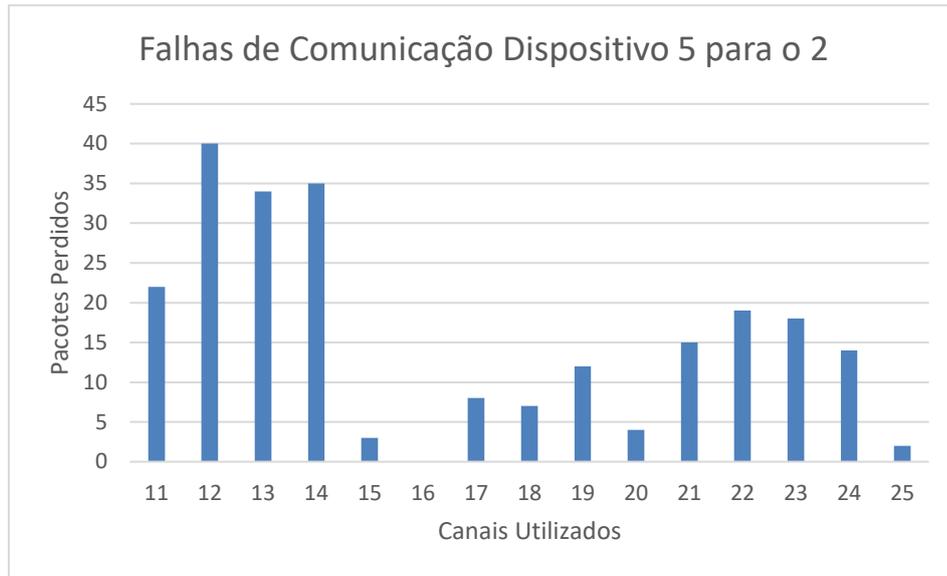
**Figura 56. Desempenho do classificador de canais (dispositivo 5 para 1).**

A Figura 57 apresenta o desempenho dos canais do dispositivo 5 para o vizinho dispositivo 2. Diferente do vizinho dispositivo 1, para este nodo a comunicação está menos suscetível a fontes interferentes além da interferência controlada.



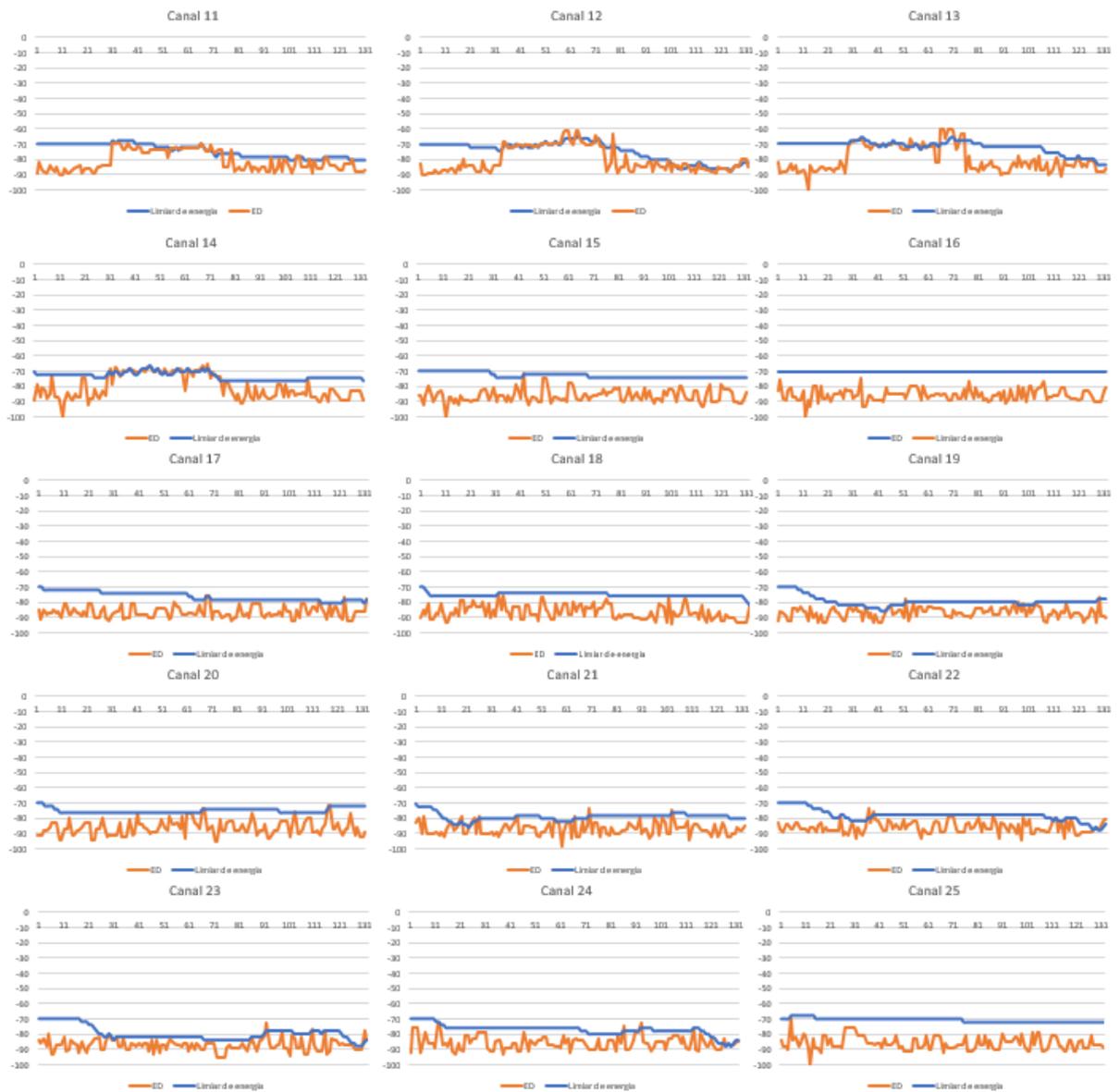
**Figura 57 . Variação do limiar de energia e mapa de classificação de canais (Dispositivo 5 para 2).**

Os gráfico apresentado na Figura 58 apresenta os pacotes perdidos em relação aos canais utilizados, verifica-se maiores perdas nos canais sobre a interferência controlada.



**Figura 58. Relação de pacotes perdidos por canal e vizinho (5 para o 2).**

A Figura 59 ilustra a variação do limiar de detecção para os canais do dispositivo 5 utilizados para comunicação com o dispositivo 2.



**Figura 59. Desempenho do sensoriamento de espectro dos canais utilizados do Dispositivo 5 para o 2 e resposta da variação de limiar de energia (dBm x Tempo).**

O canal 12 foi o canal mais suscetível aos elementos de interferência, com perdas provocadas pela interferência controlada e por outros pontos interferentes presentes no cenário de teste. Nesta condição o canal é logo classificado como ocupado, após o término da interferência controlada o limiar de detecção começa o processo para convergir para um valor

inferior ao do estado inicial (proveniente de outro ponto de interferência). Os canais 15 e 16 não apresentam interferência severa para entrar na zona de classificação ocupada.

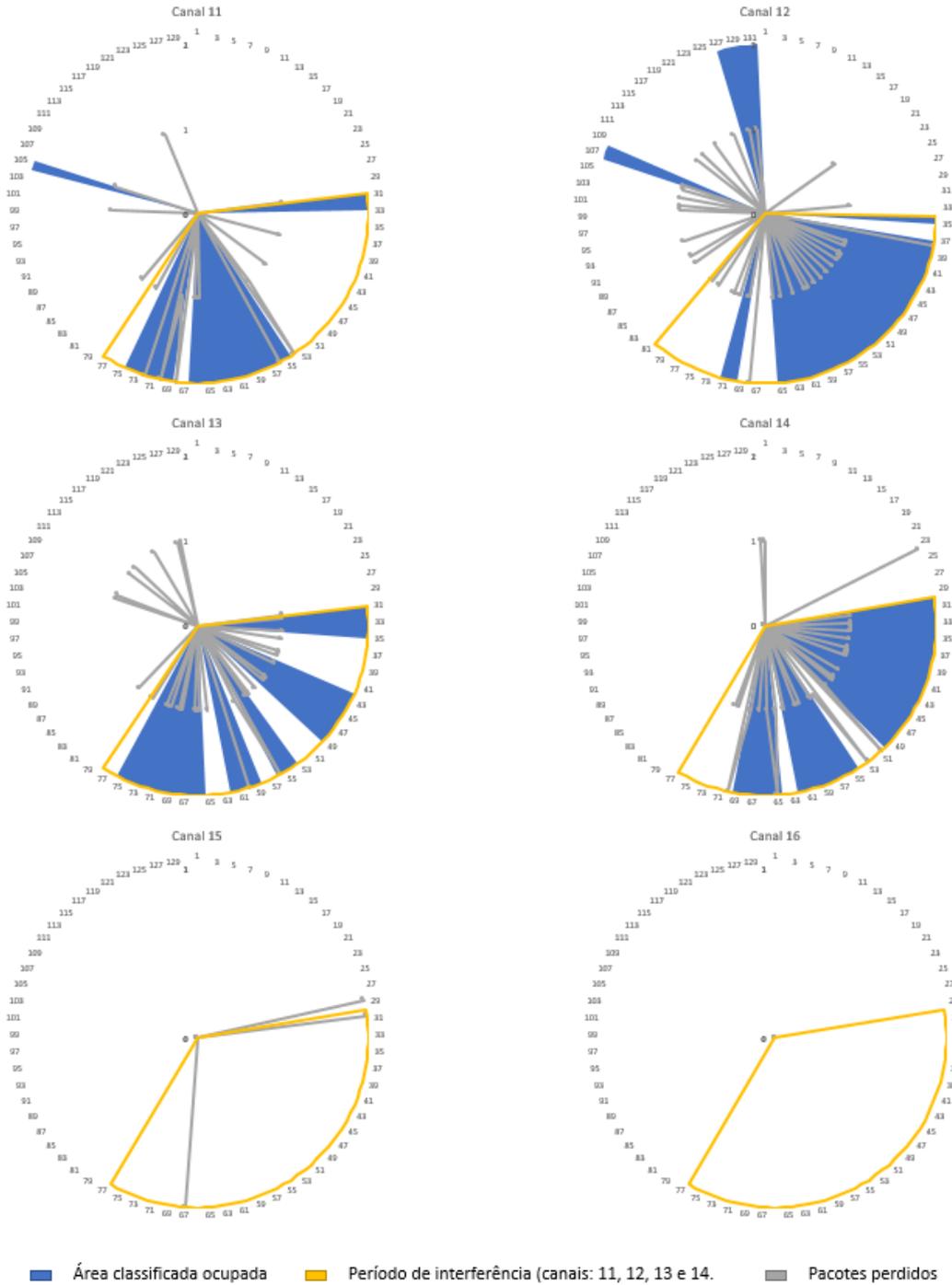
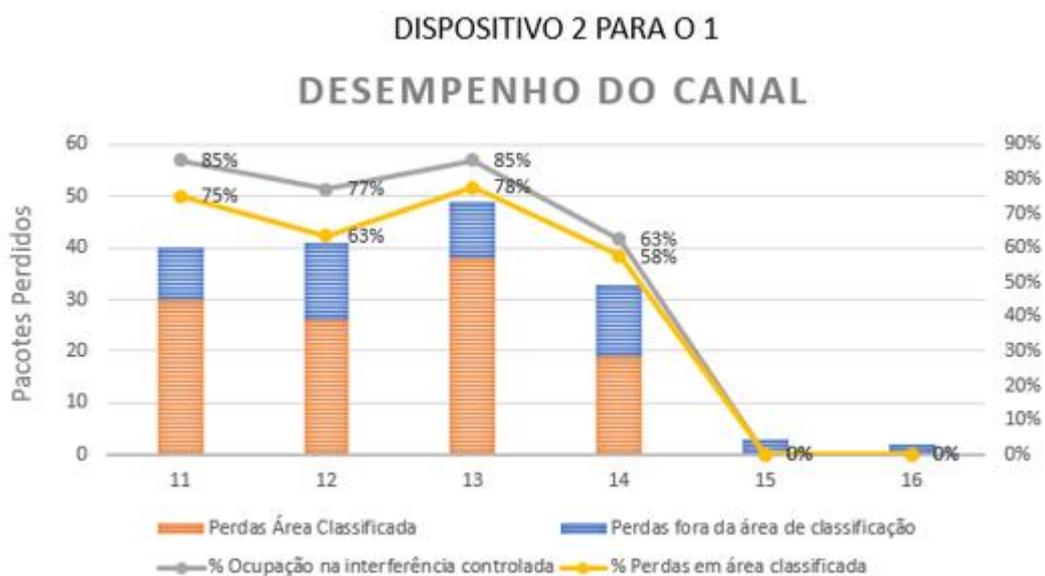


Figura 60. Desempenho do classificador de canais (dispositivo 5 para 2).

#### 6.4 Análise de Desempenho dos Dispositivos de Campo 2 e 5

Nesta seção analisamos o desempenho geral do algoritmo de salto de canais adaptativo para a rede WH. Os gráficos apresentados na Figura 61 e Figura 62, ilustram o desempenho da seleção de canais do dispositivo 2 para seus vizinhos dispositivos 1 e 4. Os gráficos ilustram o desempenho dos canais sob condições da interferência controlada, assim como canais adjacentes e alternados.

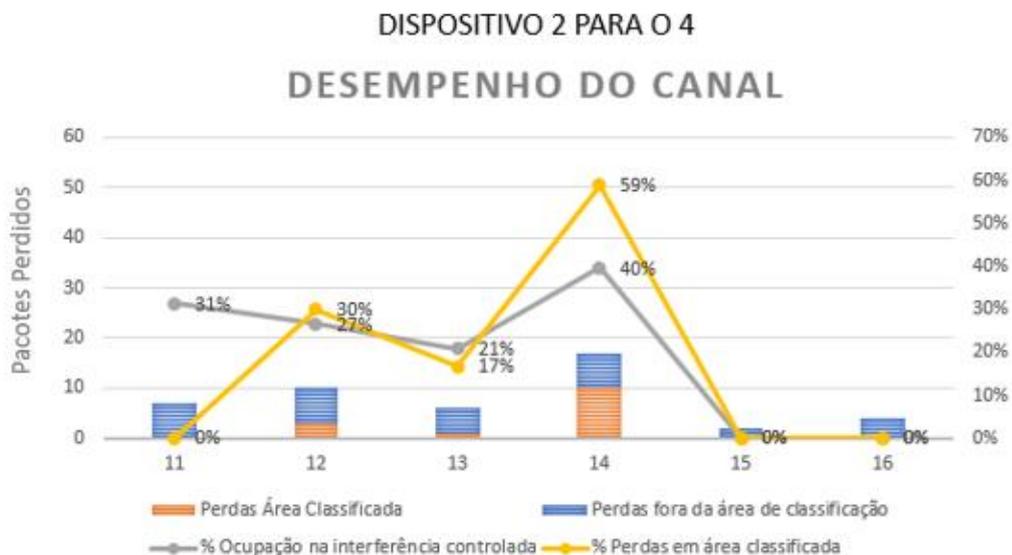


**Figura 61. Desempenho do método de classificação dos canais WH entre pares de dispositivos (Dispositivo 2 para o 1).**

Na análise do desempenho dos canais na direção do dispositivo 2 para o 1, é destacado de forma quantitativa o quão afetado foram os canais sob condições de interferência, assim como a assertividade da solução proposta para adaptação dos canais WH. O canal 11 durante todo o processo da rede apresentou a perda de 40 pacotes, sendo que 75% destas perdas ocorreram dentro da área classificada como ocupado, assim como 85% do período com ocorrência de interferência foi classificado como tal. O canal 12 registrou 63% das perdas dentro da área classificada e 77% do período com interferência classificado como na condição de ocupado. O canal 13 apresentou 78% e 85% de ocorrência de pacotes perdidos e período

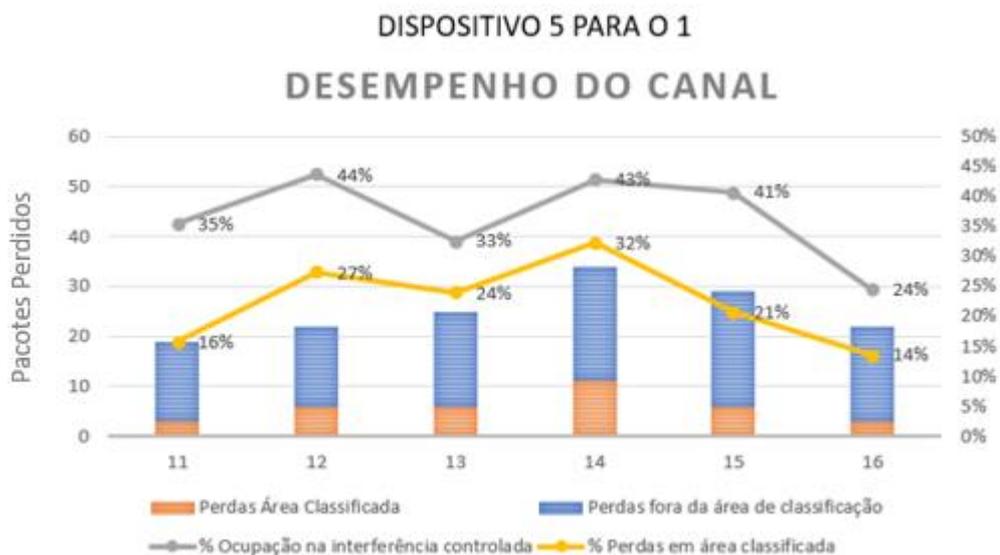
ocupado na rede durante o período de interferência, respectivamente. Enquanto o canal 14 apresentou um desempenho de 58% de pacotes perdidos com ocorrência dentro da área classificada como ocupado e 63% do período inteiro de interferência classificado como ocupado. Os canais 15 e 16 em nenhum momento foram classificados como canais de risco, apresentando perdas inferiores a 5 pacotes durante todo o período de teste. Destas perdas algumas ocorreram fora da área de interferência controlada, podendo ser caracterizadas como eventos espúrios ocasionados por outras fontes interferentes.

O desempenho obtido do dispositivo 2 para o dispositivo 4 apresentou um desempenho bem distinto em relação ao dispositivo 1. Apresentando perdas mais significativas apenas no canal 14, com um mapeamento direto de 59% das perdas dentro de um período classificado como ocupado. Os canais 11, 12 e 13 apresentaram algumas perdas, mas pouco significativas, sendo inferior a 10 pacotes, com ocorrência de 0%, 30% e 17% respectivamente dentro da área classificada como ocupada. Os canais 15 e 16 apresentaram perdas inferiores a 5 pacotes e não chegaram a ter ocorrência de classificação de canal para o estado de ocupado.



**Figura 62. Desempenho do método de classificação dos canais WH entre pares de dispositivos (Dispositivo 5 para o 1).**

A Figura 63 ilustra de forma detalhada o desempenho dos canais utilizados para comunicação entre os dispositivos 5 e 1. Nesta conexão todos os canais sofreram prejuízos em relação das condições de interferência. O canal 11 não chegou a registrar 20 perdas de pacotes, enquanto o canal 14 o mais suscetível ultrapassou o valor de 30 pacotes perdidos, com um mapeamento de 32% das perdas com ocorrência dentro da área classificada como ocupado.

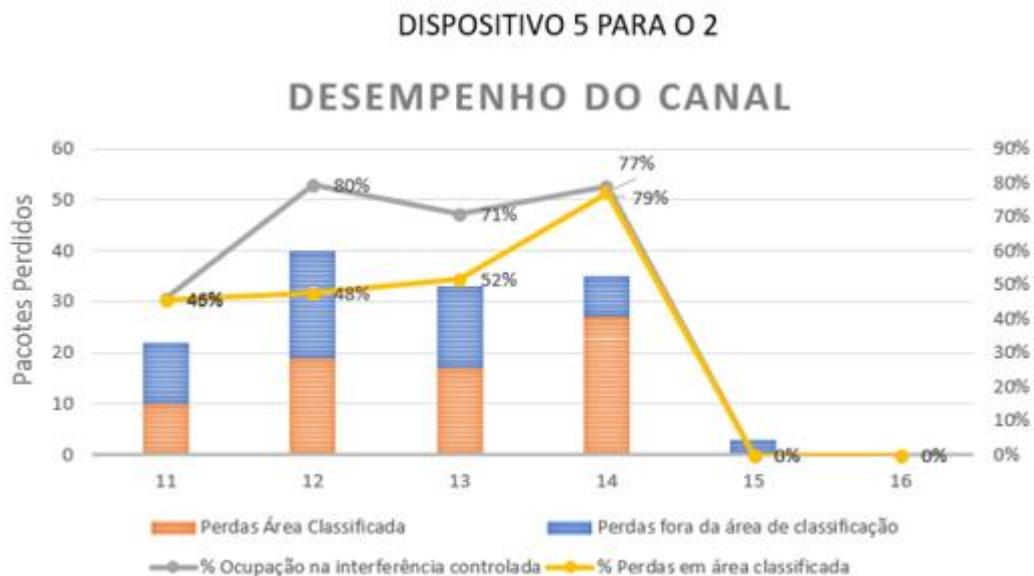


**Figura 63. Desempenho do método de classificação dos canais WH entre pares de dispositivos (Dispositivo 5 para o 1).**

Este cenário de comunicação entre os dispositivos 5 e 1 apresenta influência de outras fontes de interferência, além da fonte controlada. É possível observar perdas durante praticamente todo o período do teste, levando a um cenário de diagnóstico mais crítico em relação a múltiplas fontes de interferência, com diferentes condições de SIR que podem ou não afetar a qualidade do enlace.

O cenário de comunicação entre os dispositivos 5 e 2 apresentou uma suscetibilidade significativa quanto a interferência inserida no local de teste, com registro de perdas superiores a 30 pacotes nos canais 12, 13 e 14. Dentro desta condição de falhas, 48%, 52% e

79% das perdas tiveram sua ocorrência dentro de uma área classificada como ocupada. Enquanto os canais 15 e 16 não apresentaram perdas significativas e consequentemente não foram classificados como canais de risco durante o período de teste. A Figura 64 ilustra com mais detalhes o desempenho dos canais em análise.



**Figura 64. Desempenho do método de classificação dos canais WH entre pares de dispositivos (Dispositivo 5 para o 2).**

#### 6.4.1 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES

Durante o experimento não foram registrados falta de atualizações em relação as publicações das variáveis de processo previamente configurados nos dispositivos WH, ou seja, mesmo havendo as perdas nos canais que sofreram interferência a rede conseguiu retransmitir as devidas mensagens dentro do tempo determinado, mantendo o nível de confiabilidade em 100%. Estas informações foram coletadas diretamente do gerenciador de rede WH.

A proposta apresentada neste trabalho introduz novas métricas para avaliação das condições do meio em uma rede WH e propõem a centralização das informações de campo de cada dispositivo, ao mesmo tempo que introduz um método distribuído de sensoriamento.

Dentro destas condições há possibilidade da implementação de diferentes estratégias de análise de dados e resposta aos componentes da rede.

No experimento conduzido para validação da estratégia adotada foi possível identificar os canais ocupados por meio do ajuste do limiar de detecção de energia, o qual foi baseado diretamente no desempenho de cada canal para o seu respectivo vizinho. Como houve limitação em função da plataforma utilizada para os ensaios, gerenciador de rede comercial, não foi possível implementar o processo de adaptação (troca de canais), mas foi avaliado o desempenho considerando as perdas monitoradas dentro das zonas classificadas como áreas ocupadas. Considerando a etapa de adaptação, pode-se estimar uma abordagem ligeiramente diferente, considerando períodos para entrada e saída de novos mapas de canais, uma vez que à rede WH não deve efetuar uma troca de forma instantânea. Neste novo cenário deve-se encontrar maior assertividade quanto à classificação do canal, especialmente quando houver a condição de interferência permanente.

No experimento é proposto a inserção de interferência controlada em um número limitado de canais, visando identificar o desempenho de classificação do estado de tais canais entre os diferentes pares de dispositivo. Conforme discutido previamente a relação SIR é um importante fator na qualidade da comunicação e taxa de sucesso de entrega de pacotes, e está diretamente relacionada a algumas variáveis, tais como, potência e localização da fonte interferente em relação aos dispositivos da rede de comunicação. Observa-se no experimento que foram introduzidas outras fontes de interferência, não controladas, distribuídas em diferentes canais do espectro. Embora, inicialmente esta condição veio a prejudicar o ensaio, também demonstrou o quão diversificado pode ser a condição de qualidade de comunicação existente entre os diferentes pares de dispositivos e seus respectivos canais.

Foi considerado como uma das métricas de desempenho a permanência do estado do canal durante o período com interferência controlada. Entretanto, é importante considerar o

tempo de adaptação de uma rede WH, esta etapa não foi abordada neste trabalho, mas em função das características da rede, tais como, o tempo de parametrização dos dispositivos, deve-se prever técnicas de adaptação para situações estacionárias, descartando variações espúrias. Nos resultados obtidos, encontramos eficiência de até 78% para perdas de mensagens que poderiam ser evitadas, utilizando a troca de canal. Também considerando uma média de pacotes que poderiam ser propagados em outros canais, considerando a classificação ocupada do canal, foram obtidas médias na ordem de 26,2%, 68,5%, 24,7% e 56,3% para as comunicações entre os dispositivos 2 para o 4, 2 para o 1, 5 para o 1 e 5 para o 2 respectivamente. Havendo, no pior caso, uma economia de aproximadamente 25% dos recursos utilizados entre um par de dispositivos.

## 7 CONCLUSÃO

As tecnologias de comunicação sem fio têm ganhado cada vez mais espaço e há uma grande tendência para o reforço de sua presença em ambientes industriais nos próximos anos. Para a utilização efetiva de um determinado protocolo de comunicação, este deve atender uma série de requisitos, os quais muitas vezes representam desafios tecnológicos para sua total conformidade dentro da aplicação industrial. Neste trabalho procura-se contribuir com métodos que permitam melhorar o desempenho de comunicação de forma harmônica e em conformidade com tais tecnologias, visando reduzir perdas em ambientes com interferências no espectro.

Este trabalho apresentou uma análise do padrão *WirelessHART*, aspectos do protocolo, tais como, arquitetura, características de comunicação e mecanismos de coexistência. Uma análise mais profunda da distribuição dos recursos da rede foi abordada permitindo o melhor entendimento da dinâmica da rede, assim como as estratégias necessárias para atender os requisitos de comunicação em aplicações industriais. A partir do estudo realizado, nota-se que, embora o WH possua características que o tornam um protocolo robusto, foram identificadas situações em que há uma grande demanda por recursos da rede, as quais acabam sendo subutilizados, além da falta de responsividade quanto as perdas ocasionadas por interferências. Também foi demonstrado a falta de dinamismo do protocolo na exploração de espaços disponíveis no espectro de frequência da banda de 2.4GHz.

A partir dos resultados da presente pesquisa métodos de sensoriamento integrado ao WH foram propostos, permitindo uma abordagem para possibilitar a redução de perdas de transmissão em ambientes com interferência severa. A estratégia proposta forneceu mecanismos para possibilitar a classificação de canais de forma dinâmica entre cada par de dispositivos da rede WH. Uma proposta de sensoriamento do espectro de forma distribuída

por meio do método de detecção de energia, torna a solução factível e bem ampla quanto à questão de detecção de interferência, mesmo quando proveniente de diferentes tecnologias, logo que o método utilizado não requer nenhum conhecimento prévio quanto ao tipo de sinal da interferência presente. A solução proposta implementa uma forma determinística para a sensoriamento das condições da rede, de forma a evitar ou mitigar o problema de consumo de energia e latência na rede usualmente consequência de métodos de monitoramento intensivo do espectro. Esta característica traz um importante aspecto para manter os requisitos de sistemas de comunicações sem fio para aplicações industriais.

Um estudo de caso em um cenário real foi desenvolvido para avaliar o desempenho da arquitetura proposta. Comparado a solução atual da rede WH, sem estabelecimento de critério para entendimento das condições do meio associado a definição dos recursos do espectro (canais), os resultados demonstram uma abordagem ágil e eficiente, estimando para alguns casos até 78% de redução de perdas de mensagens, por meio do processo de detecção e validação de canais apropriados para uso de forma específica para cada par de dispositivos. Ainda a solução atual permite determinar um ou mais canais para não serem utilizados na rede durante a operação da rede, esta condição é adequada para interferências conhecidas e presentes antes da instalação da rede WH. Entretanto, mesmo considerando tal situação, nota-se que a solução atual acaba reduzindo recursos importantes e escassos da rede de comunicação, uma vez que só há disponibilidade de 15 canais, e conforme foi validado nesta proposta um determinado canal sob interferência não é necessariamente inviável de comunicação para todos os dispositivos da rede. Aqui pode-se determinar uma boa alternativa para tornar particular, para cada dispositivo, a identificação de quais recursos são mais apropriados.

Ainda, durante esta pesquisa, foram apresentados outras oportunidades de desenvolvimento como alternativas ou complementação à abordagem proposta neste trabalho,

tais como, introdução de novos parâmetros e uso de métodos alternativos de aprendizagem para a rede WH. Nesta proposta não foram abordados o processo de adaptação da rede, pois para tal é necessário atuar diretamente nos algoritmos do gerenciador de rede, o qual não houve acesso por utilizarmos uma solução comercial fechada. Entretanto, foram apontadas possíveis soluções para viabilizar a implementação de tais mecanismos. A partir da implementação do processo de adaptação outros parâmetros de desempenho da rede também podem ser avaliados, assim aumentando a visão sobre a contribuição de tais técnicas na tecnologia de comunicação sem fio WH.

Como principais contribuições deste trabalho pode-se destacar a proposta de uma arquitetura para gerenciamento do espectro, com características de sensoriamento distribuído e customizado entre pares de dispositivos, associado a um protocolo de comunicação sem fio industrial, *WirelessHART*, com o propósito de mitigar perdas geradas por interferência e também buscando eficiência na disponibilidade dos recursos que a rede necessita. No próximo Capítulo são destacados os trabalhos futuros para continuidade desta pesquisa.

## 8 TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentados diversas oportunidades consideradas e levantadas durante esta pesquisa para a continuidade deste trabalho.

### 8.1 Adaptação da rede WH

O processo de adaptação da rede WH não pode ser abordado neste trabalho, pois há necessidade de acesso à um gerenciador de rede WH para, assim, alterarmos os algoritmos que determinam a operação da rede. Esta etapa representa um grande desafio na visão geral de operação de uma rede mais dinâmica e assertiva quanto ao uso de seus recursos. Entretanto podemos antecipar aqui algumas estratégias que podem ser abordadas para uma troca adequada do conjunto de canais a ser utilizado entre os diversos dispositivos. Uma possibilidade é adotar períodos para a inserção de um novo mapa de canais na rede, por meio de um agendamento de comutação de variável associado ao número absoluto da rede (ASN). Nesta abordagem uma vez definido os canais dentro da métrica de ocupação, pode ser estabelecido o tempo quando o mapa de canal atual torna-se obsoleto e passa a operar o novo esquema. Para este problema um outro desafio está na diversidade de mapa de canais que um dispositivo deve possuir em razão de seus diferentes vizinhos. Esta questão pode ser tratada condicionando o mapa de canais como uma variável própria de cada vizinho na tabela de dispositivos vizinhos (já existente), apenas preocupações quanto a quantidade de memória devem ser analisadas com cautela. Uma vez integrado o método de adaptação da rede podem ser avaliadas a capacidade de dinamicidade da rede e confiabilidade, tais como, por exemplo, uma redução na taxa de perda de pacotes ou o uso de menos recursos da rede sem o comprometimento dos níveis de confiabilidade da rede devem ser avaliadas.

## 8.2 Métodos de Aprendizado

Neste trabalho a abordagem de aprendizagem foi simplificada, entretanto a literatura dispõe de diversas técnicas e métodos para adaptação e aprendizado. Uma ramificação desta pesquisa pode ser em uma análise comparativa de desempenho de outras abordagens, buscando então identificar melhores resultados e ajustes adequados conforme a condição de teste.

Outra proposta que pode ser avaliada é a correlação das informações coletadas dos diferentes dispositivos para uma predição mais poderosa quanto as condições de utilização do espectro. Neste cenário é possível atuar no desenvolvimento de uma técnica de avaliação que possibilite trabalhar na identificação da tecnologia interferente, inicialmente uma abordagem pode ser o monitoramento das potencias presentes nos canais relacionados as potências dos canais adjacentes, permitindo, por exemplo, a diferenciação de uma tecnologia do tipo IEEE802.11 (22 MHz) de uma IEEE802.15.4 (5 MHz).

Ainda, para trabalhos futuros, é relevante desenvolver a análise de outras métricas para validar o desempenho de todo o sistema, um estudo relevante é a medida do desempenho quanto ao consumo de energia dos dispositivos, quando integrados com métodos de adaptação em relação ao método convencional utilizado atualmente.

## REFERÊNCIAS

- AKERBERG, J.; GIDLUND, M.; BJORKMAN, M. A. T. S. Future research challenges in wireless sensor and actuator networks targeting industrial automation. In: INDUSTRIAL INFORMATICS (INDIN), 2011, Caparica. **Proceedings...** New York: IEEE press, 2011. p. 410-415.
- AKYILDIZ, I. F. LO, B. F.; BALAKRISHNAN, R. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: a survey. **Physical Communication**, Amsterdam, v. 4, n. 1, p. 40-62, 2011.
- ARSLAN, H. (Ed.). **Cognitive radio, software defined radio, and adaptive wireless systems**. Berlin: Springer, 2007.
- BOTTA, A.; DAINOTTI, A.; PESCAPÉ, A. A tool for the generation of realistic network workload for emerging networking scenarios. **Journal Computer Networks**, [S.l.], v. 56, n. 15, p. 3531-3547, 2012.
- BLOCK, D.; MEIER, U. Wireless deterministic medium access: a novel concept using cognitive radio. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COGNITIVE RADIO, 3., 2013, Venice **Proceedings...** Birmingham: IARIA Press, 2013. p. 35-38.
- CAVALCANTI, D. et al. Cognitive radio based wireless sensor networks. In: COMPUTER COMMUNICATIONS AND NETWORKS ICCCN'08, 17., 2008, St. Thomas **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2008. p. 1-6.
- CHANG, K. **Spectrum sensing, detection and optimisation in cognitive radio for non-stationary primary user signals**. 2012. 198 p. Tese (Tese em Redes de Comunicação) – Queensland University of Technology, Brisbane, 2012.
- CHEN, D.; NIXON, M.; MOK, A. (Ed.). **WirelessHART: real-time mesh network for industrial automation**. New York: Springer, 2010.
- CHEN, D. et al. WirelessHART and IEEE 802.15. 4e. In: INDUSTRIAL TECHNOLOGY (ICIT), 2014, Busan. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2014. p. 760-765.
- DANG, K. et al. A Graph Route-Based *Superframe* Scheduling Scheme in *WirelessHART* Mesh Networks for High Robustness. **Wireless personal communications**, New York, v. 71, n. 4, p. 2431-2444, 2013.
- DE DOMINICIS, C. M. et al. On the improvement of *WirelessHART* access points by means of software defined radio. In: FACTORY COMMUNICATION SYSTEMS (WFCS), 8., 2010, Nancy. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2010. p. 71-74.

DICKOW, V. H. et al. Análise de Algoritmos de Escalonamento para redes *WirelessHART*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS COMPUTACIONAIS, 3., 2013, Niterói. **Anais...** Florianopolis: SBC, 2013. v. 1. p. 1-6.

DOHERTY, L.; TEASDALE, D. A. Towards 100% reliability in wireless monitoring networks. In: ACM INTERNATIONAL WORKSHOP ON PERFORMANCE EVALUATION OF WIRELESS AD HOC, SENSOR AND UBIQUITOUS NETWORKS, 3., 2006, Terromolinos. **Proceedings...** New York: ACM, 2006. p. 132-135.

DOMINICIS, C. M. et al. Investigating *WirelessHART* coexistence issues through a specifically designed Simulator. In: IEEE INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2009, Singapore. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2009. p.1085-1090.

WIKIPEDIA. **Dust Networks.** Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Dust\\_Networks](http://en.wikipedia.org/wiki/Dust_Networks)>. Acesso em: 05 de Agosto de 2015.

FANG, M. et al. An Innovative Routing and Resource Optimization Strategy for *WirelessHART*. In: ADVANCES IN TECHNOLOGY AND MANAGEMENT, 2012, Jeju-Island. **Proceedings...** Berlin Heidelberg: Springer, 2012. p. 353-360.

FARNHAM, T. et al. Ist-trust: A perspective on the reconfiguration of future mobile terminals using software download. In: PERSONAL, INDOOR AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS (PIMRC), 2000. London **Proceedings...** New York: IEEE press, 2000. p. 1054-1059.

FERRARI, P. et al. An Innovative Distributed Instrument for *WirelessHART* testing. In: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2009, Singapore. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2009. p.1091-1096

FROTZSCHER, A. et al. Requirements and current solutions of wireless communication in industrial automation. In: COMMUNICATIONS WORKSHOPS (ICC), 2014, Sydney. **Proceedings...** New York: IEEE press, 2014. p. 67-72.

GOLMIE, N. (Ed.). **Coexistence in Wireless Networks: Challenges and System-Level Solutions in the Unlicensed Bands.** New York: Cambridge University Press, 2006.

HAN, S. et al. Wi-HTest: compliance test suite for diagnosing devices in real-time *WirelessHART* network. In: IEEE REAL-TIME AND EMBEDDED TECHNOLOGY AND APPLICATIONS SYMPOSIUM, 15., 2009, São Francisco. **Proceedings...** New York: IEEE press, 2009

HAN, S. et al. Control over *WirelessHART* network. In: ANNUAL CONFERENCE ON IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 36., 2010, Glandale. **Proceedings...** New York: IEEE press, 2010. p. 2114-2119.

HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF\_SPEC-085, Rev. 1.2.** Austin, 2009. Parte da norma.

HUANG, S. et al. Sensing-energy tradeoff in cognitive radio networks with relays. **Systems Journal IEEE**, New York: v. 7, n. 1, p. 68-76, 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTHECHNICAL COMMISSION. **IEC 62591, Rev. 1.0**. Massachusetts, 2010. Parte da norma.

KAISER, T.; PÉREZ-GUIRAO, M. D.; WILZECK, A. Cognitive radio & networks in the perspective of industrial wireless communications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COGNITIVE RADIO AND ADVANCED SPECTRUM MANAGEMENT, 2., 2009, Aalborg. **Proceedings...** New York: IEEE press, 2009. p. 24-29.

KUMAR, A.; MANJUNATH, D. KURI, J. (Ed). **Wireless networking**. São Francisco: Morgan Kaufmann, 2008.

KUMAR, S. et al. An industrial perspective on wireless sensor networks—a survey of requirements, protocols, and challenges. **IEEE Journal Communications Surveys & Tutoriais**, New York, v. 16, n. 3, p. 1391-1412, 2014.

KUNZEL, G. **Ambiente para Avaliação de Estratégias de Roteamento para Redes WirelessHART**. 2012. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

KUNZEL, G. et al. Passive Monitoring Software Tool for Evaluation of Deployed *WirelessHART* Networks. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTING SYSTEM ENGINEERING, 2012, Natal. **Proceedings...** New York: IEEE press, 2013.

JIN, X. et al. Reliability and temporality optimization for multiple coexisting *WirelessHART* networks in industrial environments. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 64, n. 8, p. 6591-6602, 2017

LIANG, W. et al. Survey and experiments of WIA-PA specification of industrial wireless network. **Wireless Communications and Mobile Computing**, New Jersey, v. 11, n. 8, p. 1197-1212, 2011.

LINDAU, M. G. et al. Low cost wireless site survey system for *WirelessHART* network deployment. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 2013, Fortaleza, **Anais...** São Paulo: SBA, 2013. v.1.

LIN, F. et al. A novel spectrum sharing scheme for industrial cognitive radio networks: from collective motion perspective. In: COMMUNICATIONS (ICC), 2014, Sydney. **Proceedings...** New York: IEEE press, 2014, p. 203-208.

LORENÇATO, A. et al. *WirelessHART* Field Device with Integrated Network Analyzer. In: COMPUTING AND AUTOMATION FOR OFFSHORE SHIPBUILDING (NAVCOMP), 2013, Rio Grande. **Anais...** New York: IEEE press, 2013. p. 29-33.

MITOLA III, J. Software radios: Survey, critical evaluation and future directions. **Aerospace and Electronic Systems Magazine**, Washington, v. 8, n. 4, p. 25-36, 1993.

MOLISCH, A. F. (Ed.). **Wireless Communications**. Chennai: Laserwords, 2005.

MULLER, I. **Gerenciamento descentralizado de redes sem fio industriais segundo o padrão *WirelessHART***. 2012. 105p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

NOBRE, M. H. R. **Análise de Desempenho Baseada em Simulação de Redes *WirelessHART***. 2011. 73 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

PAWELCZAK, P. et al. Cognitive radio: Ten years of experimentation and development. **Communications Magazine**, New York, v. 49, n. 3, p. 90-100, 2011.

PETERSEN, S.; CARLSEN, S. Performance Evaluation of *WirelessHART* for Factory Automation. In: IEEE CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION, 2009, Mallorca. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2009. p. 1-9.

PETROVA, M. et al. Performance Study of IEEE 802.15.4 Using Measurements and Simulations. In: IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 2006, Las Vegas. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2006. p. 487-492.

POLLIN, S. et al. Distributed cognitive coexistence of 802.15. 4 with 802.11. In: COGNITIVE RADIO ORIENTED WIRELESS NETWORKS AND COMMUNICATIONS, 1., 2006, Mykonos Island. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2006. p. 1-5.

POOLIN, S. et al. Harmful coexistence between IEEE 802.15.4 and 802.11. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COGNITIVE RADIO ORIENTED WIRELESS NETWORKS AND COMMUNICATIONS, 2008, Singapore. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2008. p. 1-9.

QI, Y. et al. Security Analysis of WIA-PA Protocol. In: ADVANCED TECHNOLOGIES IN AD HOC AND SENSOR NETWORKS, 2014, Qingdao. **Proceedings...** Berlin and Heidelberg: Springer, 2014. p. 287-298.

QUANG, P. T. A.; KIM, S.; KIM, D. A throughput-aware routing for distributed industrial cognitive radio sensor networks. In: FACTORY COMMUNICATION SYSTEMS (WFCS), 9., 2012, Lemgo. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2012. p. 87-90.

QUANG, P. T. A. KIM, D. Throughput-aware routing for industrial sensor networks: Application to isa100. 11a. **Industrial Informatics IEEE Transactions on**, New York, v. 10, n. 1, p. 351-363, 2014.

ROBERTS, S. W. **Control Charts Tests Based on Geometric Moving Averages**. New York: American Statistical Association, 1959. Technometrics. v.1.

SHANKAR, N. S.; CORDEIRO, C.; CHALLAPALI, K. Spectrum agile radios: utilization and sensing architectures. In: NEW FRONTIERS IN DYNAMIC SPECTRUM ACCESS NETWORKS DySPAN, 2005, Baltimore. **Proceedings...** New York: IEEE Press 2005. p. 160-169.

SINGH, A.; BHATNAGAR, M. R.; MALLIK, R. K. Cooperative spectrum sensing in multiple antenna based cognitive radio network using an improved energy detector. **Communications Letters**, New York, v. 16, n. 1, p. 64-67, 2012.

SMART WIRELESS GATEWAY. **Reference Manual Emerson**. Shakopee, 2015.

SOTO, V. S. et al. Control over *WirelessHART* Network through a Host Application. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS COMPUTACIONAIS, 2014, Manaus. **Anais...** New York: IEEE Press, 2014. p. 91-96

STALLINGS, W. (Ed.). **Data And Computer Communications**. New Jersey: Prentice Hall, 2007.

TAHERPOUR, A. G. S. NASIRI-KENARI, M. Wideband spectrum sensing in unknown white Gaussian noise. **IET communications**, New York, v. 2, n. 6, 2008, p. 763-771.

TANDRA, R. SAHAI, A. SNR walls for feature detectors. In: NEW FRONTIERS IN DYNAMIC SPECTRUM ACCESS NETWORKS (DySPAN), 2., 2007, Dublin . **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2007. p. 559-570.

THOMAS, R. W. et al. **Cognitive networks**. Berlin: Springer, 2007.

TYTGAT, L. et al. Avoiding collisions between IEEE 802.11 and IEEE 802.15. 4 through coexistence aware clear channel assessment. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, Berlin, v. 2012, n. 1, p. 1-15, 2012.

WANG, B. LIU, KJ Ray. Advances in cognitive radio networks: A survey. **Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of**, New York, v. 5, n. 1, p. 5-23, 2011.

WENYUAN, X. et al. Jamming Sensor Networks: Attack and Defense Strategies. **Journal in IEEE Networks**, New York, v. 20, n. 3, p. 41-47, 2006.

WINTER, J. M. et al. Study of routing mechanisms in a *WirelessHART* network. In: INDUSTRIAL TECHNOLOGY (ICIT), 2013, Busan. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2013. p. 1540-1545.

WINTER, J. M. et al. Towards a *WirelessHART* Network with Spectrum Sensing. In: IFAC WORLD CONGRESS, 2014, Cape Town. **Proceedings...** Amsterdam: Elsevier, 2014. p. 9744-9749.

WINTER, J. M.; PEREIRA, C. E. Coexistence aware for *WirelessHART* networks. In: INDUSTRIAL INFORMATICS (INDIN), 12., 2014, Porto Alegre. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2014. P. 803-806.

WINTER, J. M., **Análise de Coexistência de Redes *WirelessHART***. 2013. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

WINTER, J. M. et al. Coexistence issues in wireless networks for factory automation. In: INDUSTRIAL INFORMATICS (INDIN), 12., 2014, Porto Alegre. **Proceedings...**, New York: IEEE Press, 2014. p. 370-375.

WINTER, J. M. et al. Wireless coexistence and spectrum sensing in industrial internet of things: An experimental study. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, Thousand Oaks, v. 11, n. 11, p. 1-12, 2015.

YANG, D.; XU, Y.; GIDLUND, M. Wireless Coexistence between IEEE 802.11 and IEEE 802.15.4 – Based Networks: A Survey. **Journal of Distributed Sensor Networks**, Thousand Oaks: v.1, n. 11, 2011, p. 1-17, 2011.

YUCEK, T.; ARSLAN, H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. **Communications Surveys & Tutorials**, New York, v. 11, n. 1, p. 116-130, 2009.

YUNHUAN, L. et al. A cognitive radio based reliability optimization for industrial wireless DSSS/CH transmission links. In: CONTROL CONFERENCE (CCC), 31., 2012 Hefei. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2012. p. 5542-5547.

ZEGHDOUD, M.; CORDIER, P.; TERRE, M. Impact of clear channel assessment mode on the performance of ZigBee operating in a WiFi environment. In: OPERATOR-ASSISTED (WIRELESS MESH) COMMUNITY NETWORKS, 1., 2006, Berlin. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2006. p. 1-8.

ZHENG, T. et al. A self-configurable power control algorithm for cognitive radio-based industrial wireless sensor networks with interference constraints. In: COMMUNICATIONS (ICC), 2012, Ottawa. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2012. p. 98-103.

ZHU, X. et al. Hardware challenges and their resolution in advancing *WirelessHART*. In: INDUSTRIAL INFORMATICS (INDIN), 9., 2011, Caparica. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2011. p. 416-421.

ZENG, Y.; LIANG, Y.; ZHANG, R. Blindly combined energy detection for spectrum sensing in cognitive radio. **Signal Processing Letters**, New York, v. 15, p. 649-652, 2008.