

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

SANDRO ROBERTO DE ARAUJO

**DIVERSIDADE DE ANTENAS EM REDES DE SENSORES
SEM FIO INDUSTRIAIS COMO TÉCNICA PARA AUMENTO
DA CONFIABILIDADE**

Porto Alegre

2018

SANDRO ROBERTO ARAUJO

**DIVERSIDADE DE ANTENAS EM REDES DE SENSORES
SEM FIO INDUSTRIAIS COMO TÉCNICA PARA AUMENTO
DA CONFIABILIDADE**

Dissertação de mestrado 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 Mestre em
Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Computação;
Linha de Pesquisa: Redes e Telecomunicações.

ORIENTADOR: Álvaro Augusto Almeida de Salles

CO-ORIENTADOR: Ivan Müller

Porto Alegre

2018

SANDRO ROBERTO DE ARAUJO

**DIVERSIDADE DE ANTENAS EM REDES DE SENSORES
SEM FIO INDUSTRIAIS COMO TÉCNICA PARA AUMENTO
DA CONFIABILIDADE**

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

Orientador: _____

Prof. Dr. Álvaro Augusto Almeida de Salles, UFRGS

Doutor pela University of London – Londres, Inglaterra

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gilson Inácio Wirth, UFRGS

Doutor pela Universitaet Dortmund – Unido, Alemanha

Prof. Dr. Giovanni Bulla, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. João Cesar Netto, UFRGS

Doutor pela Université Catholique de Louvain – Louvain-la-Neuve, Bélgica

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Valner João Brusamarello

Porto Alegre, maio de 2018.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Tiago Balen, pela oportunidade de ingressar no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRGS.

Ao professor Álvaro Augusto Almeida de Salles, por prover a oportunidade de trabalho na área de pesquisa e pela confiança depositada nesta realização.

Ao professor Ivan Müller, pelo auxílio nos momentos de maior dificuldade na realização deste trabalho, bem como, nas tarefas e pesquisas desenvolvidas durante o mestrado.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRGS, pela assistência durante o período do mestrado.

À direção da Rudder Equipamentos e Sistemas de Segurança, pela liberação de horário de estudo que proporcionaram a utilização dos equipamentos disponibilizados pelo Laboratório de Sistemas de Controle, Automação e Robótica (LASCAR).

Por fim, um agradecimento especial a minha mãe Julia Benedetto e a meu filho Renan Benedetto de O. Araújo, pelo apoio incondicional e auxílio durante toda esta jornada.

RESUMO

Este trabalho concentra-se no aumento da robustez à taxa de erros em redes de sensores sem fio industriais (RSSFI). Para alcançar tal objetivo, é preciso, de algum modo, contornar os problemas intrínsecos da comunicação sem fio, que são, o ruído ambiental, interferências e desvanecimento por multipercurso. O multipercurso pode ser considerado um dos principais fatores que tornam as comunicações nas redes de sensores sem fio (RSSF) um verdadeiro desafio quando comparadas com outros meios, como a transmissão em fibra óptica, cabo ou mesmo transmissões de rádio ponto-a-ponto. Nesse sentido, propõe-se a diversidade de antenas como uma solução para minimizar os efeitos do multicaminho, com o objetivo de melhorar a confiabilidade do enlace de rádio para permitir o emprego de RSSF densas. O potencial da diversidade de antenas em RSSF não está totalmente explorado em aplicações industriais. Esta dissertação apresenta ainda, a técnica “Combinação de seleção” para RSSFI através de um algoritmo que seleciona a porta do receptor que apresenta o melhor indicador de qualidade de enlace e realiza a comutação das antenas nos módulos de rádio. Os resultados são analisados para dois tipos de enlaces, isto é, com e sem diversidade de antenas na recepção, e discute-se opções para melhorar o PER (“*Packet Error Rate*”) com as atuais técnicas de diversidade.

Palavras-chave: **Diversidade de Antenas. Redes de Sensores sem Fio Industriais. Desvanecimento por Multipercurso. LQI (*Link Quality Indicator*). PER (*Packet Error Rate*).**

ABSTRACT

This work concentrates on the increase of reliability and robustness in Industrial Wireless Sensor Networks (IWSNs), decreasing the Packet Error Rate (PER). To achieve this objective, is need to somehow circumvent and reduce the underlying problems of wireless communication, which are: environmental noise, interference, and multipath fading. The multipath can be seen as the main factor which becomes the communications in the Wireless Sensor Networks (WSNs) a real challenge when compared to other types of means such as a transmission in fiber, cable or even point-to-point radio transmissions. In this sense, it is proposed antenna diversity as solution to reduce these effects, with the aim to improve the reliability of the radio link to allow the use of dense WSNs. The potential of antenna diversity in WSN is not fully exploited in industrial applications. In this sense, this dissertation presents the "Combination of selection" technique for IWSNs through an internal algorithm that selects the receiver port that has the highest LQI ("Link Quality Indicator") and performs an antenna switching in the radio modules. Also, options to improve PER using diversity techniques are discussed.

Keywords: Antenna Diversity. Industrial Wireless Sensor Networks. Multipath Fading. LQI (Link Quality Indicator). PER (Packet Error Rate).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	O DESVANECIMENTO EM COMUNICAÇÕES SEM FIO	16
2.1.1	Desvanecimento	16
2.1.2	Percursos Múltiplos.....	17
2.1.3	ISI - <i>Inter Symbol Interference</i>	19
2.2	DIVERSIDADE DE ANTENA EM COMUNICAÇÕES SEM FIO	22
2.2.1	Diversidade no tempo	23
2.2.2	Diversidade de frequência.....	23
2.2.3	Diversidade de espaço	23
2.3	TÉCNICAS DE DIVERSIDADE DE ESPAÇO NA RECEPÇÃO	24
2.3.1	Combinação de seleção.....	27
2.3.2	Diversidade por realimentação ou varredura.....	30
2.3.3	Combinação de relação máxima	31
2.3.4	Combinação de ganho igual.....	31
2.4	BENEFÍCIOS DA DIVERSIDADE DE ANTENAS.....	32
2.4.1	Desvanecimento correlacionado em ambas as antenas.....	32
2.4.2	Desvanecimento não correlacionado em ambas as antenas.....	33
2.5	O PADRÃO IEEE 802.15.4	34
2.5.1	Camada Física do IEEE 802.15.4.....	35
2.5.2	Topologias de Rede e Modos de Operação IEEE 802.15.4	38
2.5.3	Camada de Enlace (MAC) IEEE 802.15.4	39
2.5.4	Procedimento de Formação de uma rede IEEE 802.15.4	40
2.6	O PADRÃO <i>WIRELESSHART</i>	40
2.6.1	Camadas do protocolo <i>WirelessHart</i>	42
2.6.2	Rede tipo malha	46
3	ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE	48
4	MÉTODOS E MATERIAIS	53
4.1	DISPOSITIVOS UTILIZADOS	53
4.1.1	Gateway	53
4.1.2	Transceptor de RF.....	54
4.2	HARDWARE DO TRANSCPTOR DE RF.....	55
4.2.1	Sinal de RF na transmissão	56
4.2.2	Sinal de RF na Recepção.....	57
4.3	TESTE DE VALIDAÇÃO DO MÓDULO RÁDIO	57
4.4	TESTE DE CASAMENTO DAS ANTENAS.....	58
4.5	FIRMWARE DO TRANSCPTOR DE RF	59
4.5.1	Teste de conectividade.....	60

4.5.2	Utilização do Teste de Conectividade	60
4.5.3	Teste de alcance	61
4.6	IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DE DIVERSIDADE DE ANTENA.....	62
4.6.1	Teste de validação do algoritmo de diversidade de antena.....	64
4.6.2	Implementação do algoritmo de diversidade de antena no protocolo <i>WirelessHART</i>	66
5	SIMULAÇÃO DE CORRELAÇÕES ESPACIAIS	71
5.1	SIMULAÇÃO DE GANHO DE DIVERSIDADE COM DUAS ANTENAS.....	71
5.2	CORRELAÇÃO ENTRE ANTENAS.....	74
6	ESTUDO DE CASO	76
6.1	TESTE DE GANHO DE DIVERSIDADE EM UMA RSSFI	76
6.1.1	Análise comparativa	81
6.2	ANÁLISE DE DESEMPENHO	84
6.2.1	Análise de desempenho do transceptor de RF sem diversidade de antena.....	84
6.2.2	Análise de desempenho do transceptor de RF com diversidade de antena e afastamento entre antenas de 10 cm	88
6.2.3	Análise de desempenho do transceptor de RF com diversidade de antena e afastamento entre antenas de 20 cm	90
6.2.4	RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS	92
7	CONCLUSÃO.....	94
8	REFERÊNCIAS	96

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Efeitos do desvanecimento em uma antena.	17
Figura 2 Caminhos do sinal de RF diretos e indiretos.....	18
Figura 3 Pior caso do efeito do desvanecimento de RF por mudanças de fase causadas por percursos múltiplos.	19
Figura 4 Interferência entre símbolos.....	20
Figura 5 Diversidade de polarização através do uso de múltiplas antenas.....	26
Figura 6 Redução do desvanecimento de RF com duas antenas.	26
Figura 7 Diagrama de blocos representativo da técnica combinação de seleção.	30
Figura 8 Diagrama de bloco representativo da técnica de diversidade por realimentação ou varredura.	30
Figura 9 Diagrama do bloco representativo da técnica de diversidade por combinação de razão máxima.	31
Figura 10 Antena 1 e Antena 2 com sinais de entrada correlacionados.	33
Figura 11 Antena 1 e Antena 2 com sinais de entrada não correlacionados.	34
Figura 12 Estrutura geral de um quadro IEEE 802.15.4.	37
Figura 13 Topologias permitidas no IEEE 802.15.4.	39
Figura 14 Topologia típica de uma rede <i>WirelessHart</i>	41
Figura 15 <i>Superframe</i> TDMA e detalhe do <i>timeslot</i>	44
Figura 16 Rede tipo malha.....	47
Figura 17 Gateway utilizado nos experimentos realizados.	54
Figura 18 Exemplo de dispositivo de campo utilizado nos experimentos.	55
Figura 19 Esquema elétrico do módulo de rádio.....	56
Figura 20 Setup para medição da isolação de canais do módulo de RF.....	57
Figura 21 Medida do VWSR da antena nos canais 11 e 26 para fins de comparação.	59
Figura 22 Teste de conectividade	61
Figura 23 Menu <i>Test Mode</i> (Transmissão na esquerda, recepção na direita).....	61
Figura 24 Range Test Stop e Start.	62
Figura 25 Diagrama de estado do algoritmo de diversidade de antena.	63
Figura 26 Setup para implementação do teste de validação do algoritmo de diversidade de antena.	65
Figura 27 Teste de seleção da antena pelo algoritmo.....	66
Figura 28 Setup implementado para teste de validação do algoritmo de diversidade de antena na pilha WH.	68
Figura 29 Módulo Rádio conectado à rede <i>WirelessHART</i>	68
Figura 30 Módulo Rádio se comunicando com os outros elementos da rede WH.....	69
Figura 31 Teste de seleção da melhor antena pelo transceptor de RF na rede WH.	69
Figura 32 O sinal em receptor duplo a partir de um ambiente multi-caminhos	71
Figura 33 Simulação analítica do ganho de diversidade na recepção com duas antenas em relação ao espaçamento entre elas.	73
Figura 34 Simulação do Coeficiente de correlação com duas antenas em relação ao espaçamento e ângulo de orientação entre as antenas.	74

Figura 35 Simulação do Ganho de Diversidade com duas antenas com relação ao espaçamento e ângulo de orientação entre as antenas.....	75
Figura 36 Localização dos transceptores no cenário de teste.....	76
Figura 37 Transceptores de RF com diversidade de antena se comunicando com os outros elementos da rede.	77
Figura 38 Rede formada para análise dos dados coletados.	78
Figura 39 LQI On e LQI Off médios, de todos os pacotes recebidos pelo transceptor.....	79
Figura 40 LQI On e LQI Off médios, de todos os pacotes recebidos pelo transceptor.....	80
Figura 41 Ganho de diversidade obtido pelo transceptor TAG 1008 DIV ANT.	80
Figura 42 Ganho de diversidade obtido pelo transceptor TAG 1016 DIV ANT.	81
Figura 43 Análise comparativa entre Ganho obtido e Ganho máximo simulado para o transceptor TAG 1008 DIV ANT.	82
Figura 44 Análise comparativa entre Ganho obtido e Ganho máximo simulado para o transceptor TAG 1016 DIV ANT.	83
Figura 45 Rede WH montada para análise de desempenho dos transceptores de RF sem diversidade de antena.....	84
Figura 46 Dados obtidos na interface do software.	86
Figura 47 Dados registrados na planilha Excel.	86
Figura 48 Transceptores TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT pares (alvos), com algoritmo de diversidade de antena desabilitado.	87
Figura 49 Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o TAG 1008 DIV ANT.....	88
Figura 50 Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o TAG 1016 DIV ANT.....	88
Figura 51 Afastamento entre antenas de 10 cm.....	89
Figura 52 Transceptores TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT pares (alvos), com algoritmo de diversidade de antena habilitado.	89
Figura 53 Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o TAG 1008 DIV ANT.....	90
Figura 54 Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o TAG 1016 DIV ANT.....	90
Figura 55 Afastamento entre antenas de 20 cm.....	91
Figura 56 Transceptores TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT pares (alvos), com algoritmo de diversidade de antena habilitado.	91
Figura 57 Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o TAG 1008 DIV ANT.....	92
Figura 58 Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o TAG 1016 DIV ANT.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Alocação de canais e bandas nos diferentes locais.....	35
Tabela 2	Alocação de canais e bandas nos diferentes locais.....	36
Tabela 3	Potências Mínimas de recebimento e alcance máximo.	36
Tabela 4	Frequências centrais dos canais do WH	42
Tabela 5	Distâncias de comunicação do WH.	43
Tabela 6	Medida de isolamento entre portas canal 11.	58
Tabela 7	Medida de isolamento entre portas canal 26.	58
Tabela 8	Medida do VSWR das antenas nos canais extremos utilizadas no trabalho.....	59
Tabela 9	Dados recebidos pelo TAG 1008 DIV ANT.	78
Tabela 10	Dados recebidos pelo TAG 1016 DIV ANT.	78
Tabela 11	Taxa de Falhas TX para o TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT.....	87
Tabela 12	Taxa de Falhas TX para o TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT.....	89
Tabela 13	Taxa de Falhas TX para o TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT.....	91
Tabela 14	Resumo: Taxa Média de Falhas na transmissão.	93

LISTA DE ABREVIATURAS

ACK: *Acknowledgement*

AWGN: *Additive White Gaussian Noise*

CDF: *Cumulative Distribution Function*

CRC: *Cyclic Redundancy Check*

DSSS: *Direct Sequence Spread Spectrum*

FFD: *Full Function Device*

HCF: *HART Communication Foundation*

IEEE: *Institute of Electrical Electronics Engineers*

IP: *Internet Protocol*

ISI: *Inter Symbol Interference*

LOS: *Line of Sight*

LQI: *Link Quality Indicator*

MAC: *Medium Access Control*

MIMO: *Multiple-Input and Multiple-Output*

MSDU: *MAC Service Data Unit*

PDF: *Probability Density Function*

PER: *Packet Error Rate*

PHR: *Physical Header*

PHY: *Physical Layer*

RF: *Rádio Frequência*

RFD: *Reduction Function Device*

RSSF: Rede de Sensores sem fio

RSSFI: Rede de Sensores sem fio Industriais

RSSI: *Received Signal Strength Indication*

SC: *Selection Combining*

SISO: *Single-Input and Single-Output*

SNR: *Signal-to-Noise Ratio*

WH: *WirelessHart*

WSNs: *Wireless Sensor Networks*

VSWR: *Voltage Standing Wave Ratio*

1 INTRODUÇÃO

O uso de tecnologias sem fio vem apresentando um contínuo crescimento no que se refere ao mercado que abrange equipamentos voltados comunicação de dados. A necessidade que os consumidores têm em obter informação de maneira rápida e dinâmica em qualquer lugar e a todo tempo tem estimulado muito esse mercado. Isso porque a informação instantânea requer o uso de tecnologias que sejam capazes de fabricar aparelhos de acesso à informação portátil ou não, de modo a propiciar ao mercado consumidor um acesso facilitado. É nesse contexto que a transmissão de dados sem fio se torna fundamental e imprescindível.

No entanto, existe uma preocupação, por parte de quem desenvolve tais equipamentos, em encontrar soluções que venham a aperfeiçoar o processo de transmissão e recepção sem fio, seja de modo a aumentar a confiabilidade dos dados ou agindo de modo a torna-lo cada vez mais rápido e satisfazendo, assim, o consumidor moderno.

A ideia de melhorar a qualidade do sinal transmitido está diretamente relacionada a diversas questões descritas na literatura. Para alcançar tais objetivos, é preciso, de algum modo, contornar e combater os problemas comuns à comunicação sem fio, que são entre outros: o ruído ambiental, interferências e desvanecimento por multipercurso. O multipercurso poderá ser considerado como o principal fator que torna as comunicações sem fios um verdadeiro desafio quando comparado com outros tipos de meios, como a transmissão em fibra, cabo ou mesmo transmissões rádio ponto-a-ponto.

A existência de vários possíveis caminhos, pelo qual o sinal pode trafegar em um canal de RF (Rádio Frequência) produz efeitos indesejados de desvanecimento variável, ocasionados justamente por este multipercurso (*multipath fading*). Isso acaba limitando a qualidade e o desempenho do sistema, tanto do ponto de vista da taxa de transmissão quanto do máximo alcance.

Nos sistemas de comunicação sem fio tradicionais, são normalmente utilizadas, uma antena para transmissão e uma antena para recepção, e exploram-se os domínios do tempo, frequência e codificação. Contudo, estes sistemas de transmissão são extremamente vulneráveis aos efeitos causados pelo ruído ambiental, interferências e o desvanecimento multipercorso, refletindo-se numa deterioração do sinal recebido, ou seja, verifica-se um aumento do PER (*Packet Error Rate*) e uma redução da SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), traduzindo-se, conseqüentemente, numa redução da taxa de transmissão (RAPPAPORT, 1996). A busca por um menor PER associada a melhorias na confiabilidade do sistema de telecomunicações tem motivado o uso de avançadas técnicas de transmissão e recepção de dados digitais. Entre estas técnicas, ganha espaço o estudo da utilização de múltiplas antenas, tanto na transmissão quanto na recepção. Nesse contexto, ganha destaque o estudo referente à “*diversidade de antenas*” a fim de alcançar esse objetivo.

1.1 OBJETIVOS

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo a aplicação da diversidade de antenas em RSSFI (*Rede de Sensores sem fio Industriais*) objetivando o aumento da robustez e a redução do PER, melhorando a qualidade do enlace de rádio.

As principais tarefas da dissertação são:

- Estudo das principais técnicas de diversidade de antenas;
- Aplicação da diversidade espacial de antenas em RSSFI com PHY (*Physical Layer*) padrão IEEE 804.15.4 (*Institute of Electrical Electronics Engineers*);
- Emprego da “*combinação de seleção*” como técnica de diversidade espacial de antenas na recepção em RSSFI que, através de um algoritmo agregado à pilha do protocolo, seleciona-se a porta do receptor que apresente o melhor LQI (*Link Quality Indicator*), conforme o sinal recebido e realiza a comutação das antenas em módulos de rádio (HAYKIN, 2008).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados alguns dos conceitos de base que ajudam no entendimento da diversidade de antena em redes de comunicação sem fio. Primeiramente são abordados conceitos de desvanecimento e percursos múltiplos de sinais no meio de propagação, com suas causas e efeitos. Na segunda parte é apresentada a diversidade de antena com o objetivo do aumento da confiabilidade em comunicações sem fio, bem como, os tipos mais comuns de diversidade, com ênfase a diversidade espacial de antenas na recepção. Na terceira parte são abordadas as principais técnicas de diversidade espacial de antenas na recepção, com ênfase na técnica de combinação de seleção. A quarta parte apresenta os benefícios da diversidade espacial de antenas na recepção, especialmente quando o ambiente operacional é dinâmico. A última parte apresenta brevemente o protocolo IEEE 802.15.4 abordando as camadas física, de enlace e topologias de rede.

2.1 O DESVANECIMENTO EM COMUNICAÇÕES SEM FIO

A transmissão de sinais em sistemas de comunicações sem fio é vulnerável a diversos efeitos presentes no correspondente canal. Dentre eles, o desvanecimento e os percursos múltiplos são caracterizados a seguir (ALENCAR, 2004):

2.1.1 Desvanecimento

Caracteriza a existência de variações aleatórias ao longo do tempo da intensidade do sinal recebido. A variação tem como referência o valor de campo recebido em espaço livre. As causas do desvanecimento se encontram no meio de propagação. O desvanecimento é um fenômeno frequentemente observado quando pequenos movimentos de um transmissor ou de um receptor podem provocar, por exemplo, deslocamento no sinal recebido pela antena e levar

a grandes diferenças na qualidade do link. Isso acontece quando uma antena entra e sai dos picos de um sinal, vide Figura 1.

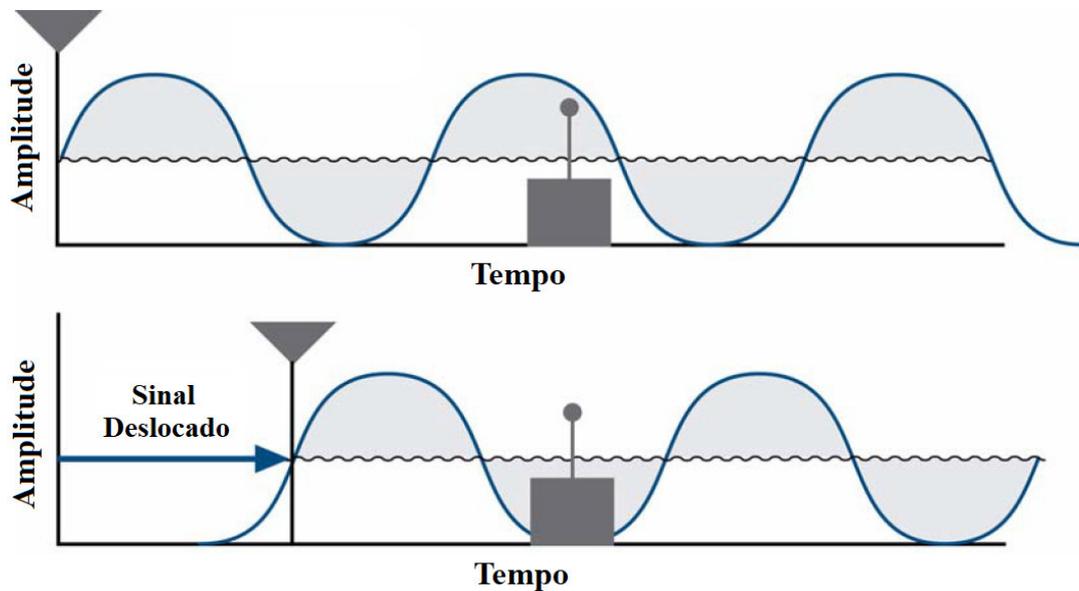


Figura 1 Efeitos do desvanecimento em uma antena.

2.1.2 Percursos Múltiplos

O sinal resultante recebido é a soma de um raio direto entre as antenas e outros raios que seguem trajetos distintos do raio direto. Os trajetos distintos, designados como percursos múltiplos, são originados das refrações e reflexões (ainda que de pequena intensidade) resultantes de irregularidades na constante dielétrica da atmosfera com a altitude e obstáculos. A energia transportada por meio dos percursos múltiplos é, em geral, bem inferior àquela associada ao feixe principal. Entretanto, quando o feixe principal por um motivo qualquer (obstrução parcial, interferência por reflexão no terreno) sofre uma atenuação considerável, a energia recebida por meio dos percursos múltiplos passa a desempenhar um papel importante, dando origem a fenômenos de interferência apreciáveis.

O desvanecimento de multipercurso, devido às reflexões nos edifícios e obstáculos naturais, ou nas paredes, teto e piso de instalações, provoca uma série de aprofundamentos no espectro do sinal recebido. O padrão assim obtido representa a assinatura do desvanecimento

seletivo, podendo ser previsto por meio de uma análise acurada do canal. Nesse tipo de propagação por múltiplos percursos, cada caminho apresenta um ganho, fase e atraso associado. Os sinais de multipercurso se recombinaem no receptor, de forma que o sinal recebido é uma versão distorcida do que foi transmitido.

A medida que as ondas de rádio são transmitidas, elas podem não ser recebidas pelo receptor através de um caminho direto de sinal, mas podem vir de múltiplos caminhos através de reflexões, conforme Figura 2.

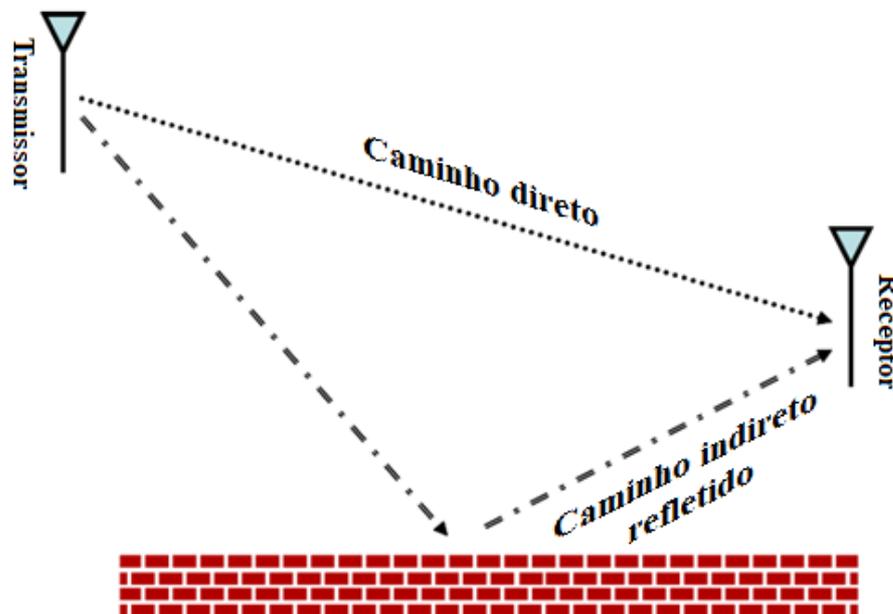


Figura 2 Caminhos do sinal de RF diretos e indiretos.

Os sinais recebidos de cada um desses caminhos são susceptíveis de chegar a intervalos de tempo ligeiramente diferentes, o que significa que podem ocorrer pequenas mudanças de fase. Quando esses sinais combinam, eles podem resultar em desvanecimento parcial ou quase total.

A Figura 3 ilustra um cenário de pior caso, pode-se demonstrar que dois sinais chegam a um receptor com amplitudes iguais, mas exatamente 180° fora de fase, o receptor não apresentará nenhum dado - isso seria 100% de desvanecimento do sinal. Embora não seja típico, não é excessivamente incomum que um receptor receba dois desses sinais com exatamente 180°

graus de mudança de fase, especialmente em frequências operacionais mais altas. No entanto, é mais provável que um ambiente multipercurso dê origem a algum outro valor de mudança de fase, resultando em desvanecimentos de sinal mais moderados (SILICON LABS, 2010).

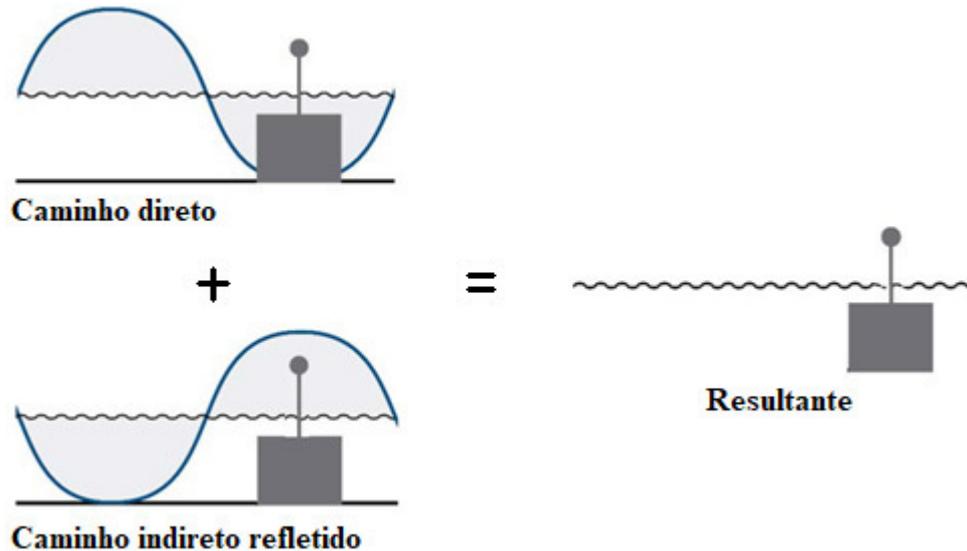


Figura 3 Pior caso do efeito do desvanecimento de RF por mudanças de fase causadas por percursos múltiplos.

2.1.3 ISI - *Inter Symbol Interference*

Entre os diferentes tipos de distorções na comunicação, a interferência é um fenômeno que costuma causar grandes perdas de dados na comunicação. Nos sistemas de comunicação digital, a informação é transmitida na forma de uma onda quadrada que representa os 1's e 0's modulando algum parâmetro da onda, amplitude, frequência ou fase. Quando a portadora modulada se mistura com os ruídos e não linearidades no canal, a modulação da mesma se espalha de forma a alterar a sequência de símbolos adjacentes, tornando-os indetectáveis pelo receptor. Neste, a decodificação poderá ocorrer de forma errada, quando o receptor não poderá prever o nível correto da modulação, o que leva à perda de informações. A interferência entre símbolos (**ISI**, *Inter Symbol Interference*, ou **IES** em português) geralmente é causada devido à propagação multipercursos do sinal no canal de banda limitada e devido à resposta de frequência não linear do canal. A Figura 4 apresenta uma representação gráfica do ISI. A

presença de ISI no sistema introduz erros no dispositivo de decisão de dados no receptor. Portanto, no projeto dos transceptores, o objetivo é minimizar os efeitos do ISI e, assim, entregar os dados digitais para o seu destino com a menor taxa de erro possível.

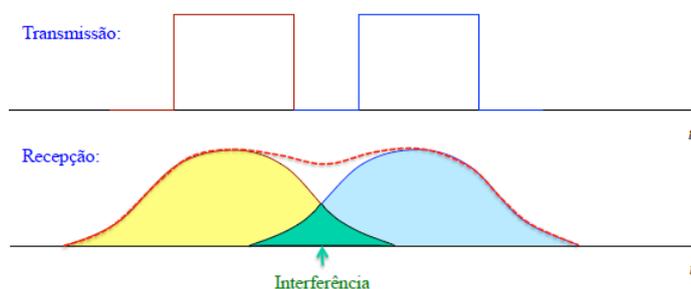


Figura 4 Interferência entre símbolos.

- **Causas da Interferência entre Símbolos**

Propagação Multipercurso: Uma das causas da ISI é a propagação multipercurso, quando um sinal de um transmissor atinge o receptor através de vários caminhos de propagação, vários sinais são recebidos pelo receptor e o nível de sinal recebido é a soma vetorial de todos os sinais. A somatória das cópias do sinal no receptor pode ser construtiva ou destrutiva, dependendo do atraso e das componentes espectrais das mesmas. O problema é que tanto os atrasos quanto as atenuações de cada cópia têm um comportamento aleatório. Por esta razão o canal não pode ser modelado como um processo determinístico, mas sim como um processo estocástico (LATHI, 2010).

Canais de banda limitada: Outra causa de ISI surge devido a imperfeições na resposta em frequência do sistema. Quando um pulso de curta duração é transmitido através de um sistema de banda limitada, os componentes de frequência que constituem o impulso de entrada são diferencialmente atenuados e diferencialmente atrasados pelo sistema. Conseqüentemente, o pulso que aparece na saída do sistema é disperso por um intervalo maior, resultando, assim, em ISI. Mesmo na ausência de ruído, a filtragem imperfeita e as restrições de largura de banda do sistema levam ao ISI (HAYKIN, 2010).

Ruídos e canais de desvanecimento: O ruído pode ser definido como qualquer sinal indesejado que interfira com a comunicação, medição ou processamento de um sinal de informação. O ruído está presente em vários graus e em quase todos os ambientes. Por exemplo, em um sistema de telefonia celular digital, pode haver vários tipos de ruído que podem degradar a qualidade da comunicação, como o ruído térmico, ruídos de origem eletromagnética, interferências devidas à coexistência, distorções de canal de rádio e interferências por multipercursos. O ruído pode ser extremo até causar erros de transmissão que podem levar à interrupção do processo de comunicação.

Dentre os modelos de canais existentes, os três seguintes são amplamente utilizados na análise das comunicações digitais. São o AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), o desvanecimento multipercurso Rayleigh e o desvanecimento multipercurso Rician.

- 1) **Canal AWGN:** O tipo mais simples de canal é o canal gaussiano. Este modelo é utilizado com bons resultados nas modelagens de sistemas de comunicação fixa e com linha de visada, como enlaces de micro-ondas e comunicação via satélite, por exemplo. O nome AWGN se deve ao fato de que, o ruído, inserido no sinal ao atravessar o canal, tem o comportamento de uma variável aleatória com distribuição estatística gaussiana ou normal, e uma densidade espectral de potência plana na banda considerada. O ruído gaussiano é muito importante na análise do desempenho do sistema de comunicação simples. O modelo de canal AWGN é sempre considerado como o ponto de partida para a avaliação do desempenho básico dos sistemas.
- 2) **Canal de desvanecimento Rayleigh:** Em um sistema de comunicação móvel, um dos fenômenos mais comprometedores de robustez é o desvanecimento. O desvanecimento de Rayleigh ocorre quando nenhum caminho de LOS (*Line of Sight*)

existe entre o transmissor e o receptor, existindo apenas o caminho indireto, logo, o sinal resultante recebido no receptor será a soma das ondas refletidas e dispersas. Estes sinais de rádio podem chegar ao receptor após diferentes atrasos, com diferentes amplitudes e com diferentes fases. Assim, em um canal de desvanecimento de múltiplos caminhos, quando um pulso de sinal é transmitido, o receptor recebe uma superposição de múltiplos pulsos. Os múltiplos caminhos causam uma ampla flutuação na magnitude e fase do sinal recebido, o que torna a transmissão confiável de informações um desafio.

- 3) **Canal de desvanecimento Rician:** O fenômeno de desvanecimento Rician é muito parecido com o fenômeno de desvanecimento de Rayleigh. A diferença é que o canal contempla a comunicação quando há um caminho de LOS, bem como a do caminho não-LOS, entre o transmissor e o receptor, isto é, o sinal recebido compreende tanto as ondas direta quanto dispersas. Esse canal também causa grandes perdas devido a colisão de sinal e interferência, tornando a comunicação degradada.

2.2 DIVERSIDADE DE ANTENA EM COMUNICAÇÕES SEM FIO

Como já visto, o fenômeno de desvanecimento por multipercurso é uma característica inerente de um canal sem fio. Diante dessa realidade física, a pergunta é, o que pode ser feito para que um processo de comunicação num canal sem fio seja confiável? Uma das respostas para essa questão fundamental consiste na diversidade, que pode ser vista como uma forma de redundância. Em particular, se várias réplicas do sinal que transporta a informação podem ser transmitidas simultaneamente por canais com desvanecimento, então existe uma grande probabilidade de que pelo menos um dos sinais recebidos não esteja seriamente degradado pelo desvanecimento do canal. Existem vários métodos para fazer tal previsão (HAYKIN, 2008).

Neste contexto, pode-se identificar três abordagens, as mais empregadas para prover diversidade.

2.2.1 Diversidade no tempo

Na diversidade de tempo, o mesmo sinal que porta a informação é transmitido em diferentes períodos de tempo, sendo o intervalo entre os diferentes períodos, igual ou maior que o tempo de coerência do canal (também chamado de banda de coerência (BWC) para poder analisar se ocorre ou não o desvanecimento seletivo em frequência). Se o intervalo for menor que o tempo de coerência, ainda é possível obter alguma diversidade. Em todo caso, a diversidade de tempo pode ser comparada com o uso de um código de repetição para codificação de controle de erro.

2.2.2 Diversidade de frequência

Na diversidade de frequência, o sinal que transporta a informação é transmitido de forma que algumas portadoras suficientemente espaçadas umas das outras proveem de forma independente versões desvanecidas do sinal. Pode-se escolher, ou não, um espaçamento de frequências igual ou maior que a largura de banda de coerência do canal. O salto de frequência da modulação por espalhamento espectral é um exemplo de diversidade de frequência.

2.2.3 Diversidade de espaço

Na diversidade de espaço, múltiplas antenas de transmissão ou recepção, ou ainda ambas, são usadas com o espaçamento entre elas escolhido de forma a garantir a independência dos possíveis eventos de desvanecimento que ocorrem no canal. Na prática verifica-se que um espaçamento suficiente, que leve a resultados de correlação tão altos quanto 0,7 (o quão “diferentes” são os sinais recebidos entre si) pode implicar em uma perda de desempenho de pelo menos meio dB em comparação com o caso ideal, de canais independentes.

Dos três tipos de diversidades abordadas, a diversidade de espaço é o assunto desta dissertação. Dependendo da forma na qual a extremidade do enlace sem fio é equipada com múltiplas antenas, pode-se identificar três formas diferentes de diversidade de espaço:

- a) *Diversidade na recepção (SIMO)*, que envolve o uso de uma única antena transmissora e múltiplas antenas receptoras;
- b) *Diversidade na transmissão (MISO)*, que envolve o uso de múltiplas antenas transmissoras e uma única antena receptora;
- c) *Diversidade tanto na transmissão quanto na recepção (MIMO)*, que combina o uso de múltiplas antenas tanto na transmissão quanto na recepção.

Todas as três categorias citadas acima têm seu grau de importância. Entretanto, este trabalho versa sobre a diversidade espacial quando aplicada no receptor. Para justificar esta escolha, a subseção 2.3 traz a descrição detalhada sobre essa técnica, em especial a técnica de combinação de seleção aplicada a diversidade espacial na recepção.

2.3 TÉCNICAS DE DIVERSIDADE DE ESPAÇO NA RECEPÇÃO

Para mitigar o problema do desvanecimento seletivo de frequência devido à propagação de múltiplos caminhos, a técnica conhecida como “diversidade de antenas” pode ser utilizada. A diversidade de antenas emprega um par de antenas que estão fisicamente separadas no local de recepção e, possivelmente, diferem na orientação de montagem (isto é, a polarização) em relação ao rádio transmissor. Cada vez que o dispositivo entra no modo de recepção (RX), a potência recebida por cada antena é avaliada. Este processo é continuamente repetido até que o sinal de maior potência seja detectado em uma das antenas. A antena com a intensidade de sinal recebida mais forte é então usada para receber o restante do pacote de dados. A mesma antena também pode ser usada para transmitir o pacote de transmissão (TX) correspondente. No

entanto, deve-se notar que não há garantia de que as características de desvanecimento do caminho TX de retorno correspondam às características de desvanecimento do caminho RX.

Em condições de comunicação onde não existem percursos múltiplos, a diversidade de antenas não oferece nenhuma melhoria em relação a uma única antena. Em um ambiente de caminho único, cada vez que as intensidades do sinal da antena são medidas, as antenas têm a mesma intensidade de sinal e, portanto, a intensidade do sinal só precisa ser medida uma única vez. No entanto, em condições reais, as intensidades de sinal observadas em duas antenas, geralmente, não são iguais, devido ao fato de que cada antena recebe um conjunto de sinais oriundo de caminhos diferentes. Além disso, esses caminhos de sinal geralmente não são estáticos, mas sim, variam devido à presença pessoas ou objetos que se deslocam ao longo do enlace, o que pode causar bloqueios e reflexões que alteram a intensidade do sinal de maneira variável no tempo. Nessas condições, a melhor antena para se escolher variará com o tempo. Isso exige que a intensidade do sinal em cada antena seja avaliada continuamente para determinar qual é a antena ideal em qualquer instante dado.

A diversidade da antena é, portanto, uma técnica frequentemente utilizada para obter sinal em ambientes multi-caminho, frequentemente não estáticos. Os equipamentos que implementam diversidade de antenas muitas vezes têm suas antenas montadas a 90° umas das outras com a finalidade de contemplar os efeitos da polarização do enlace de rádio, vide Figura 5.

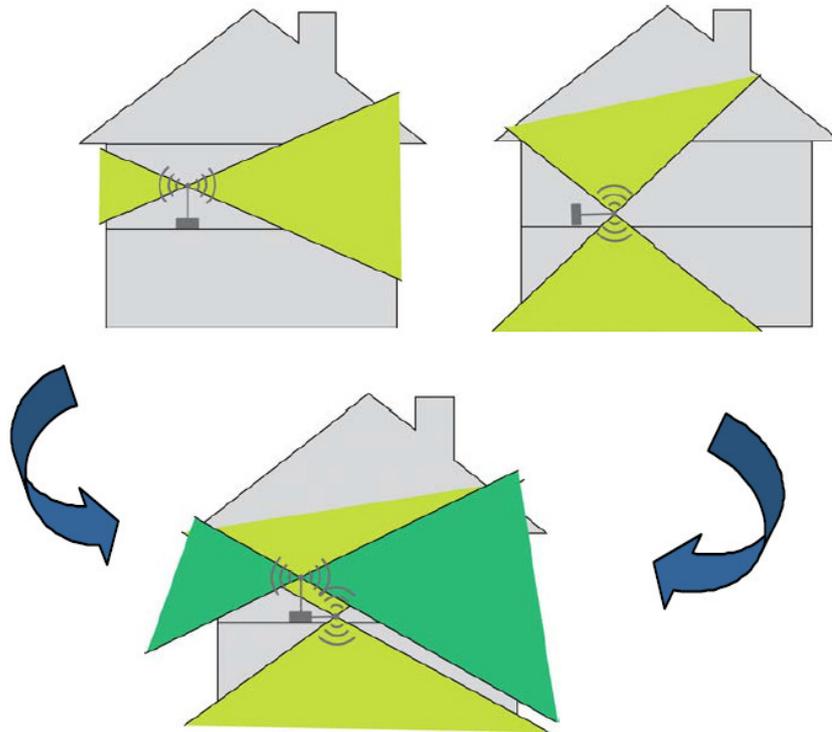


Figura 5 Diversidade de polarização através do uso de múltiplas antenas.

Além da montagem das antenas a 90° em relação uma à outra, antenas em um equipamento que implementa diversidade de antena têm suas antenas montadas a uma distância de pelo menos $1/4$ de comprimento de onda separadas (SILICON LABS, 2010). Este valor de separação espacial melhora a probabilidade de que pelo menos uma antena não esteja em uma condição de sinal profundamente desvanecida, conforme a Figura 6.

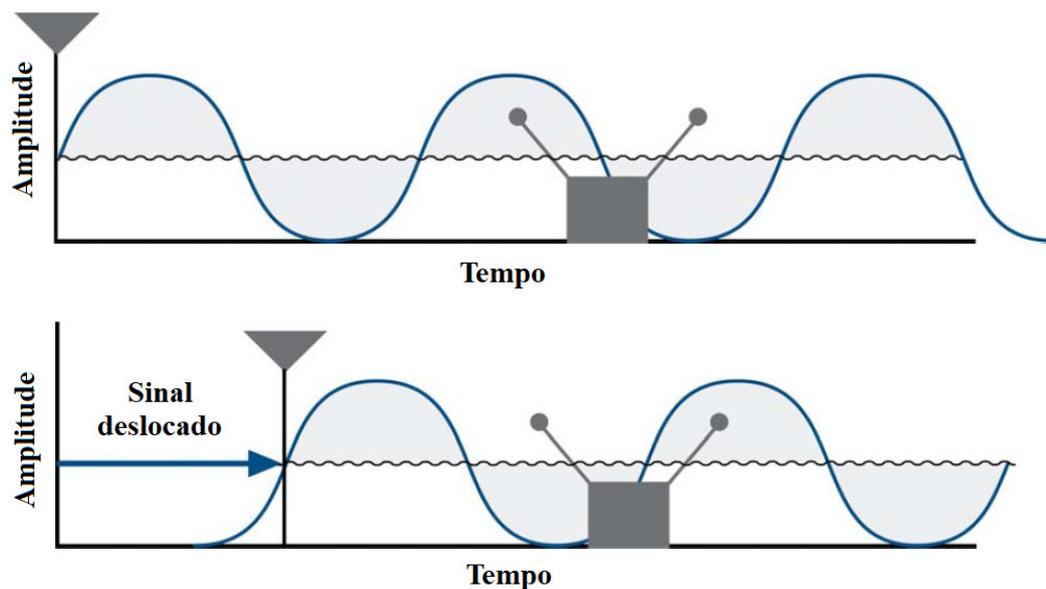


Figura 6 Redução do desvanecimento de RF com duas antenas.

Quatro técnicas de combinação de diversidade são descritas a seguir: combinação de seleção, combinação de relação máxima, combinação de ganho igual e a combinação de lei quadrática. As três primeiras envolvem o uso de receptores lineares e a quarta utiliza um receptor não-linear.

2.3.1 Combinação de seleção

O método de combinação por seleção, SC (*Selection Combining*), é caracterizado por escolher um dos sinais recebidos para o processo de detecção, utilizando como métrica a SNR instantânea (γ_i) de cada sinal. Onde, $p(X)$ é a PDF (*Probability Density Function*) de X , sendo $X = \alpha^2 E_b/N_0$. E_b e N_0 são constantes que representam a energia média por bit e a densidade da potência do ruído em um canal AWGN sem atenuação, e a variável aleatória α^2 é usada para representar os valores de potência instantâneos do canal de atenuação, com relação a E_b/N_0 sem atenuação (RAPPAPORT, 1996). É conveniente considerar $\overline{\alpha^2} = 1$, para um canal de atenuação com ganho unitário. Portanto,

$$p(X) = \frac{1}{\Gamma} e^{-\frac{X}{\Gamma}} \quad X \geq 0 \quad (1)$$

Onde $\Gamma = \frac{E_b}{N_0} \overline{\alpha^2}$ é o valor médio da relação sinal-ruído.

Para $\overline{\alpha^2} = 1$, observa-se que Γ corresponde à média de E_b/N_0 para o canal de atenuação.

Considerando os canais de atenuação Rayleigh independentes disponíveis em um receptor, cada canal é chamado de ramo de diversidade. Além disso, considera-se que cada ramo tem a mesma SNR média, dada por:

$$SNR = \Gamma = \frac{E_b}{N_0} \overline{\alpha^2} \quad (2)$$

Onde $\overline{\alpha^2} = 1$.

Se cada ramo tem uma SNR instantânea = γ_i , então, pela Equação 1, a PDF de γ_i é

$$p(\gamma_i) = \frac{1}{\Gamma} e^{-\frac{\gamma_i}{\Gamma}} \quad \gamma_i \geq 0 \quad (3)$$

onde Γ é a SNR média de cada ramo. A probabilidade de que um único ramo tenha uma SNR instantânea menor que algum patamar γ é:

$$P_r[\gamma_i \leq \gamma] = \int_0^{\gamma} p(\gamma_i) d\gamma_i = \int_0^{\gamma} \frac{1}{\Gamma} e^{-\frac{\gamma_i}{\Gamma}} d\gamma_i = 1 - e^{-\frac{\gamma}{\Gamma}} \quad (4)$$

A probabilidade de que todos os M ramos de diversidade independentes recebam sinais que são simultaneamente menores que algum patamar de SNR específico γ é:

$$P_r[\gamma_1, \dots, \gamma_M \leq \gamma] = \left(1 - e^{-\frac{\gamma}{\Gamma}}\right)^M = P_M(\gamma) \quad (5)$$

$P_M(\gamma)$, na Equação 5, é a probabilidade de todos os ramos não apresentarem uma SNR instantânea $= \gamma$. Se um único ramo alcançar SNR $> \gamma$, então a probabilidade de que SNR $> \gamma$ para um ou mais ramos é dada por:

$$P_r[\gamma_i > \gamma] = 1 - P_M(\gamma) = 1 - \left(1 - e^{-\frac{\gamma}{\Gamma}}\right)^M \quad (6)$$

A Equação 6 é uma expressão para a probabilidade de exceder um patamar quando a *diversidade de seleção* for usada.

Para determinar a relação sinal-ruído média do sinal recebido quando a diversidade é usada, primeiro é necessário encontrar a PDF do sinal de atenuação. Para a diversidade de seleção, a SNR média é encontrada, primeiro calculando-se a derivada da CDF (*Cumulative Distribution Function*) $P_M(\gamma)$, a fim de encontrar a PDF de γ , a SNR instantânea quando M ramos são usados. Prosseguindo dessa maneira,

$$P_M(\gamma) = \frac{d}{d\gamma} P_M(\gamma) = \frac{M}{\Gamma} \left(1 - e^{-\frac{\gamma}{\Gamma}}\right)^{M-1} e^{-\frac{\gamma}{\Gamma}} \quad (7)$$

Então, a SNR média, $\bar{\gamma}$, pode ser expressa como

$$\bar{\gamma} = \int_0^{\infty} \gamma P_M(\gamma) d\gamma = \Gamma \int_0^{\infty} Mx(1 - e^{-x})^{M-1} e^{-x} dx \quad (8)$$

onde $x = \gamma/\Gamma$. Observa-se que Γ é a SNR média para um único ramo (quando nenhuma diversidade é usada). A Equação 8 é avaliada quando se obtém uma melhoria de SNR média, oferecida pela diversidade de seleção:

$$\frac{\bar{\gamma}}{\Gamma} = \sum_{k=1}^M \frac{1}{k} \quad (9)$$

Pela Equação 9, pode-se perceber que a SNR média no ramo que é selecionado usando a diversidade de seleção aumenta naturalmente, pois é sempre garantida como estando acima do patamar especificado. Assim, a diversidade de seleção oferece uma melhoria média na margem do enlace sem exigir potência adicional do transmissor ou circuitos sofisticados no receptor. A melhoria com diversidade pode estar relacionada diretamente a taxa média de erros de bit para diversos tipos de modulações de RF. Além disso, diversidade de seleção é de fácil implementação, pois tudo o que é necessário é uma estação de monitoramento e o chaveamento de antena no canal receptor.

Um diagrama de blocos relacionado a esse método é apresentado na Figura 7, onde m demoduladores são utilizados para fornecer m ramos de diversidade, cujos ganhos são ajustados para fornecer a mesma SNR média para cada ramo. Conforme apresentado anteriormente, o ramo do receptor com a SNR instantânea mais alta é conectado ao demodulador. Os próprios sinais de antena podem ser amostrados, e o melhor é enviado a um único demodulador. Na prática, o ramo com o $(S+N)/N$ mais alto é usado, pois é difícil medir a SNR apenas. Ou seja, um sistema prático de diversidade de seleção não pode funcionar em uma base verdadeiramente instantânea, mas deve ser projetado de modo que as constantes de tempo internas do circuito de seleção sejam mais curtas do que a recíproca da taxa de atenuação do sinal.

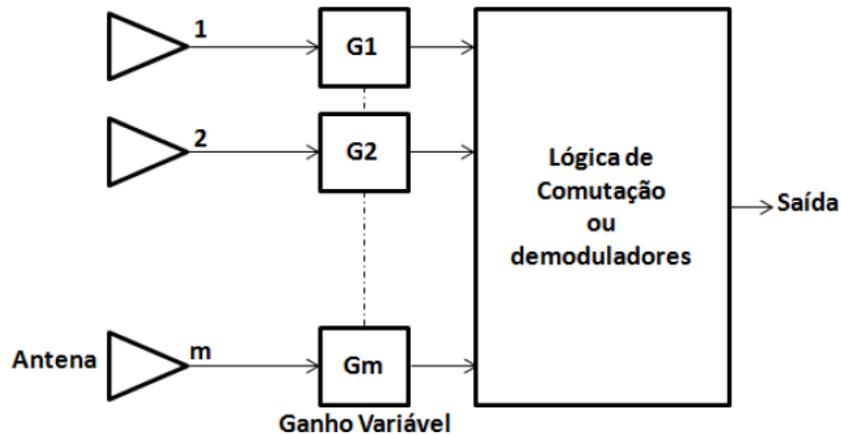


Figura 7 Diagrama de blocos representativo da técnica combinação de seleção.

2.3.2 Diversidade por realimentação ou varredura

A diversidade de varredura é muito semelhante diversidade de seleção, exceto que, em vez de usar sempre os melhores dos M sinais, estes são varridos em uma sequência fixa, até que seja encontrado um sinal acima de um limiar predeterminado. Esse sinal é então recebido até que fique abaixo do limiar e o processo de varredura é novamente iniciado. As estatísticas de atenuação resultantes são inferiores às obtidas pelos outros métodos, mas a vantagem com esse método é que ele é muito simples de se implementar - somente um receptor é exigido. Um diagrama de blocos do método em questão é apresentado na Figura 8.

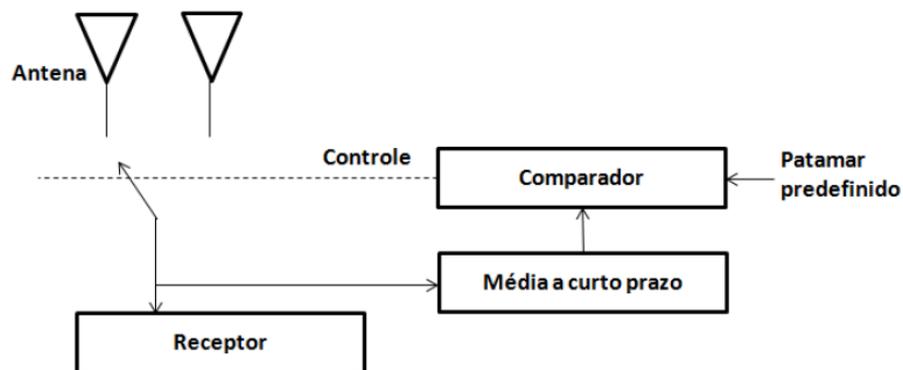


Figura 8 Diagrama de bloco representativo da técnica de diversidade por realimentação ou varredura.

2.3.3 Combinação de relação máxima

Neste método proposto, os sinais de todos os M ramos são pesados de acordo com suas razões individuais entre intensidade do sinal e potência de ruído, e depois somados. A Figura 9 mostra um diagrama de blocos da técnica. No qual, os sinais individuais devem ser co-faseados antes de serem somados, o que geralmente requer um receptor individual e um circuito de fase para cada elemento da antena. A combinação de razão máxima produz um SNR de saída igual à soma das SNRs individuais. Assim, ela tem a vantagem de produzir uma saída com uma SNR aceitável mesmo quando nenhum dos sinais individuais forem aceitáveis.

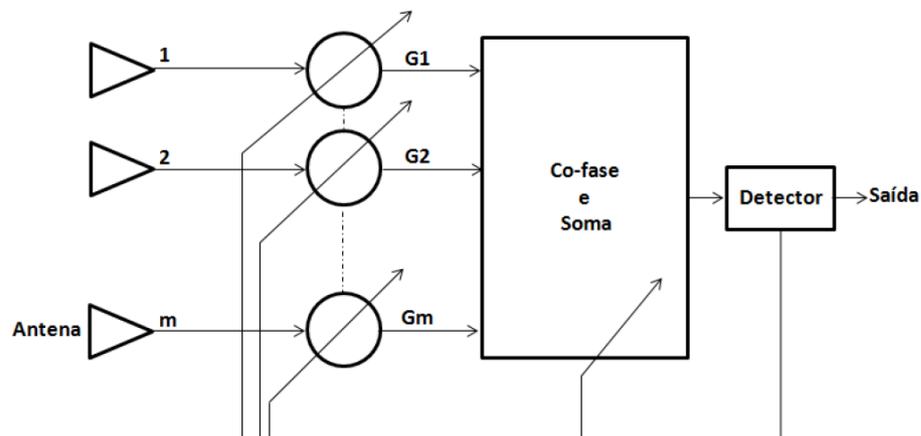


Figura 9 Diagrama do bloco representativo da técnica de diversidade por combinação de razão máxima.

2.3.4 Combinação de ganho igual

Num contexto teórico, o combinador de relação máxima é o melhor entre os que usam técnicas de combinação de diversidade linear, no sentido de que ele produz o maior valor possível de SNR instantâneo de saída. Entretanto, em termos práticos, existem três questões importantes:

1. Uma instrumentação significativa é necessária para ajustar os parâmetros de peso complexo do combinador de relação máxima para os seus valores exatos.

2. A melhoria adicional obtida na relação sinal-ruído de saída pelo combinador de relação máxima sobre o combinador de seleção, não é tão grande e é bastante provável que a melhoria adicional no desempenho do receptor seja perdida na inabilidade de se conseguir o ajuste exato do combinador de relação máxima.

2.4 BENEFÍCIOS DA DIVERSIDADE DE ANTENAS

A técnica de diversidade de antenas fornece uma melhora significativa no desempenho do sistema de comunicação quando o ambiente operacional é dinâmico em termos de intensidade do sinal e condições de desvanecimento. Essas condições geralmente ocorrem em ambientes internos ou em ambientes urbanos ao ar livre, onde o sinal transmitido é refletido em diferentes objetos, chegando ao receptor por vários caminhos com diferentes mudanças de fase e atenuação do sinal. A soma do sinal desses caminhos múltiplos resulta em uma amplitude variável no espaço, ao longo do enlace de rádio.

Os exemplos a seguir ilustram algumas condições diferentes da antena para demonstrar os benefícios da diversidade da antena.

2.4.1 Desvanecimento correlacionado em ambas as antenas

A Figura 10 demonstra uma condição em que o ambiente é variável no tempo, mas não contém reflexões multi-caminho. A condição demonstrada pode ser encontrada em um espaço aberto ao ar livre que é relativamente livre de qualquer objeto que possa causar reflexões de sinal. A natureza variável no tempo do sinal recebido pode simplesmente ser devida ao movimento da fonte de transmissão. Os níveis de sinal recebidos nas duas antenas mostram uma diferença de ganho fixo consistente.

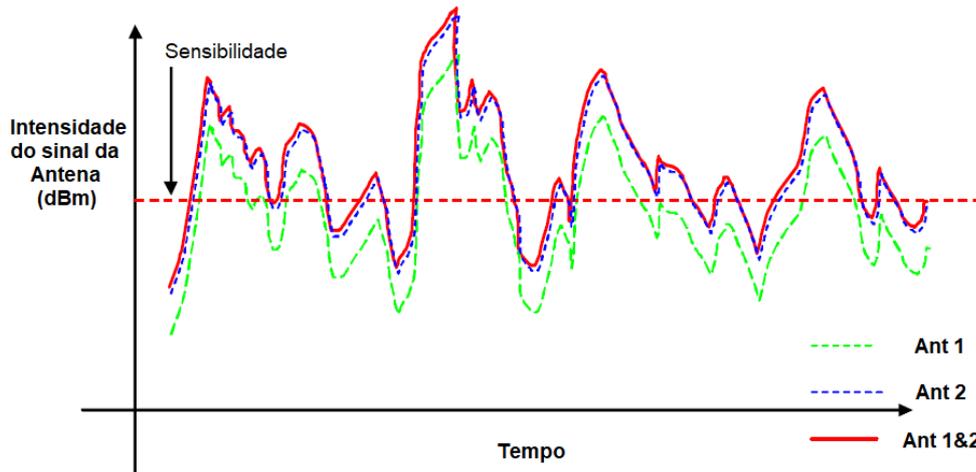


Figura 10 Antena 1 e Antena 2 com sinais de entrada correlacionados.

Nessas condições, o algoritmo de diversidade de antena não apresentará melhora no desempenho em comparação com o caso de selecionar estaticamente a antena ideal (por exemplo, a Antena 2). Neste exemplo, a seleção contínua da Antena 2 oferece um desempenho ótimo porque a Antena 2 sempre recebe um sinal mais forte do que a Antena 1. O algoritmo de diversidade de antena sempre selecionará corretamente a Antena 2 e, portanto, não proporcionará nenhuma melhoria de desempenho em relação à seleção estática da Antena 2. Em outras palavras, se as intensidades do sinal nas duas antenas estiverem estreitamente correlacionadas, a diversidade de antena não irá melhorar o desempenho quando comparado à seleção estática da única antena ideal.

2.4.2 Desvanecimento não correlacionado em ambas as antenas

A Figura 11 apresenta o caso onde os níveis de sinal recebidos nas duas antenas não são idênticos, devido a reflexões ou movimentos de pessoas ou objetos no ambiente.

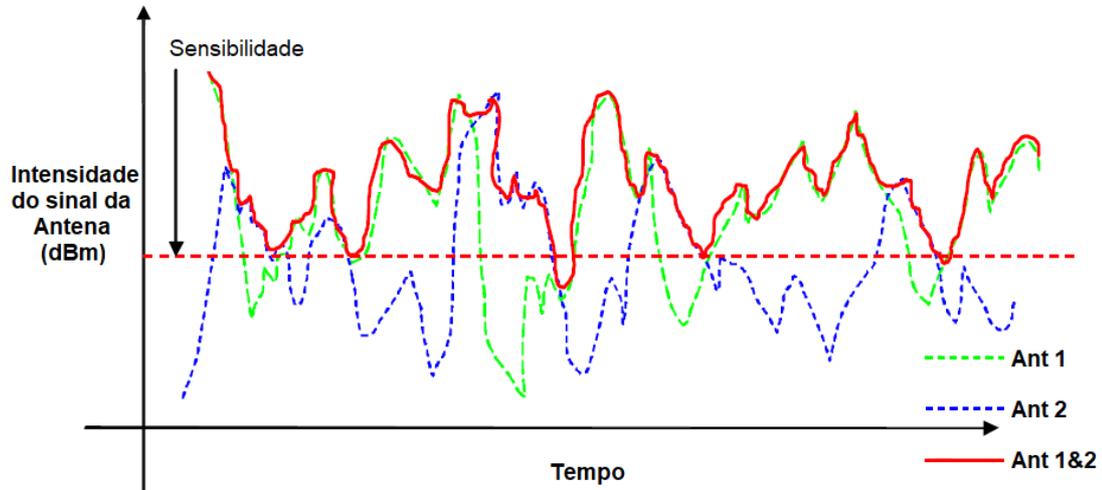


Figura 11 Antena 1 e Antena 2 com sinais de entrada não correlacionados.

Neste caso, a Antena 1 às vezes recebe o sinal mais forte, enquanto outras vezes, a Antena 2 recebe o sinal mais forte. O algoritmo de diversidade de antena selecionará dinamicamente o sinal mais forte entre as duas antenas, resultando em melhor desempenho em comparação com o caso de selecionar continuamente a Antena 1 ou a Antena 2. As Figuras 10 e 11 ilustram que, se o ambiente de propagação não exibir desvios de múltiplos caminhos (por exemplo, uma aplicação de linha de visada, livre de obstáculos), nenhuma melhoria no desempenho será observada ao permitir a diversidade de antena. No entanto, a maioria das aplicações exige que o dispositivo opere em condições diversas, que o farão suscetível ao desvanecimento devido a vários caminhos de propagação. Deste modo, pode ser obtida uma melhoria no desempenho do sistema de comunicação ao permitir a diversidade da antena sob tais condições.

2.5 O PADRÃO IEEE 802.15.4

O IEEE 802.15.4 é um padrão de comunicação sem fio de curto alcance e baixo consumo, que tem o propósito de servir a aplicações que não possuem requisitos de alta taxa de transmissão e baixa latência (BURATTI, et al., 2011).

As principais funcionalidades deste padrão são: baixa complexidade, baixo custo e baixo consumo de energia. Devido a estas características, a maior aplicação do 802.15.4 são as RSSF (*Rede de Sensores sem fio*) (BURATTI, et al., 2011). A seguir será abordada a camada física (PHY, *physical*) e de enlace (MAC, *Medium Access Control*) propostas pelo 802.15.4.

2.5.1 Camada Física do IEEE 802.15.4

A camada física do 802.15.4 opera em três diferentes faixas de frequência não licenciadas de acordo com a localização geográfica. O padrão especifica 27 canais *half-duplex* para as três bandas, conforme pode ser visualizado na Tabela 1 (BURATTI, et al., 2011), (LABIOD, 2007).

Tabela 1 Alocação de canais e bandas nos diferentes locais.

Banda	Frequência (MHz)	Local Disponível	Largura de Banda	Quantidade de Canais
2,4 GHz (ISM)	2400 - 2483,5	Todo o mundo	250 Kbps	16
915 MHz (ISM)	902 - 928	EUA	40 Kbps	10
868 MHz	868 - 868,6	Europa	20 Kbps	1

A modulação, método de propagação e a distância entre os canais variam de acordo com a banda utilizada. A Tabela 2 resume estas informações para cada uma das bandas. As faixas de 868 MHz e 915 MHz implementam uma modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) e utilizam o método de propagação (*spreading method*) DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). Já a banda de 2,4 GHz utiliza modulação O-QPSK (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*) (BURATTI, et al., 2011).

Tabela 2 Alocação de canais e bandas nos diferentes locais.

Banda	Distância entre Canais	Modulação	Método de Propagação
2,4 GHz (ISM)	5 MHz	O-QPSK	16-array ortogonal
915 MHz (ISM)	2 MHz	BPSK	DSSS Binário
868 MHz	-	BPSK	DSSS Binário

Na Tabela 3 pode ser observada a potência mínima para recepção e o alcance máximo em cada uma das bandas. O alcance máximo é obtido em condições ideais, ou seja, sem considerar efeitos de reflexão, difração e espalhamento (BURATTI, et al., 2011).

Tabela 3 Potências Mínimas de recebimento e alcance máximo.

Banda	Sensibilidade de Recepção	Alcance Máximo
2,4 GHz (ISM)	-85 dBm	200 m
915 MHz (ISM)	-92 dBm	1 km
868 MHz	-92 dBm	1 km

Ainda existem especificações opcionais para as bandas de 815/915 MHz. Um resumo destas especificações pode ser encontrado em (BURATTI, ET AL., 2011), assim como maiores detalhes sobre a camada física do IEEE 802.15.4 em (BURATTI, et al., 2011), (LABIOD, 2007).

A preocupação com o consumo de energia também está especialmente presente na camada PHY. Os dispositivos que implementam o padrão IEEE 802.15.4 devem permanecer no estado ativo por curtos períodos de tempo (o padrão possibilita que dispositivos fiquem no estado de *sleep* por 99% do tempo).

De acordo com o padrão IEEE 802.15.4, a transmissão é organizada em quadros (*frames*) que diferem entre si. A estrutura de um quadro geral é mostrada na Figura 12. Existem quatro tipos de quadros, que compõem o PPDU (*Physical Protocol Data Unit*): quadro de *beacon*, quadro de dados, quadro de ACK (*Acknowledgement*) e quadro de comando MAC. Todos os quadros são estruturados com um SHR (*Synchronization Header*), um PHR (*Physical*

Header) uma PSDU (*Physical Service Data Unit*), este último é composto por uma MPDU (*MAC Payload Data Unit*), que por sua vez, é construído com um MHR (*MAC Header*), um MFR (*MAC Footer*) e um MSDU (*MAC Service Data Unit*). Ainda, para assegurar que uma mensagem foi recebida corretamente é utilizado CRC (*Cyclic Redundancy Check*). O campo MSDU é preenchido de acordo com o tipo do quadro, exceto no quadro de ACK, onde este campo é ausente.

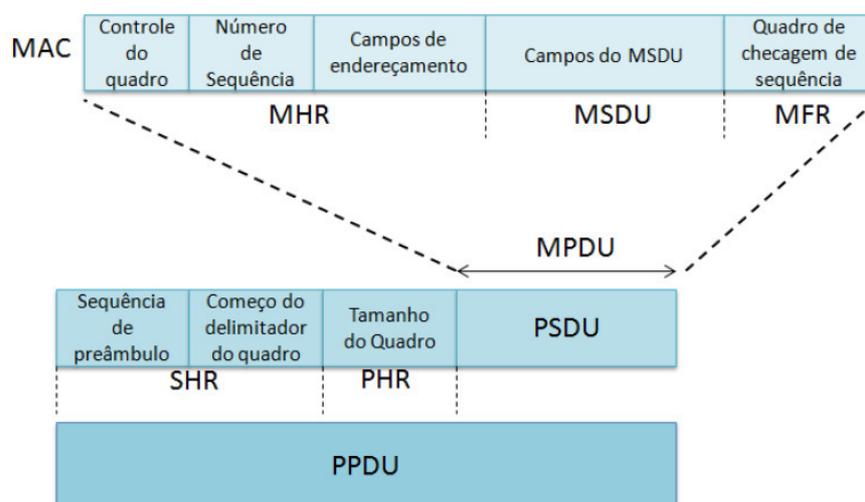


Figura 12 Estrutura geral de um quadro IEEE 802.15.4.

Indicação de Qualidade do Link

O receptor, ao receber uma mensagem, produz uma informação designada como LQI (*Link Quality Indication*), relacionada à qualidade do enlace. O pacote LQI fornece a medição da potência do sinal recebido e, por consequência, a qualidade dos dados do pacote recebido no receptor. Esta implementação pode ser feita utilizando o estado ED (*Energy Detection*) do receptor, e através da estimativa da relação sinal ruído.

Esta medida pode variar entre os valores de 0x00 a 0xFF, e pode ser usada pelas camadas de enlace, rede ou de aplicação do protocolo utilizado acima do 802.15.4. As medições mínimas e máximas devem estar associadas a pior e melhor qualidade que o padrão 802.15.4 estabelece, e deverá ser uniforme entre os limites superior e inferior.

Detecção de energia no receptor

A detecção de energia no receptor (ED) é um atributo utilizado pela camada de enlace para seleccionar o canal que se encontra em melhores condições para a transmissão e recepção. Segundo a norma, o tempo em que é detectada a energia tem que corresponder a oito períodos de símbolo, para que se possa avaliar corretamente o canal. O resultado do ED é representado em oito bits, variando entre 0x00 a 0xFF. O valor de ED mínimo deve indicar a potência recebida inferior a 10 dB acima da sensibilidade especificada pelo receptor. A faixa de potência recebida deve ser de pelo menos 40 dB. Dentro deste intervalo, a potência recebida em dBs para o valor ED deve ser linear com uma precisão de ± 6 dB.

2.5.2 Topologias de Rede e Modos de Operação IEEE 802.15.4

Antes de descrever o MAC do IEEE 802.15.4 é necessária uma discussão das possíveis topologias e modos de operação.

O padrão 802.15.4 descreve dois tipos de dispositivos: dispositivos de função completa, FFD (*Full Function Device*) e dispositivos de função reduzida, RFD (*Reduced Function Device*). Um dispositivo FFD possui o conjunto completo dos serviços MAC e pode operar como coordenador de uma rede ou como um simples dispositivo da rede. Já os dispositivos RFD possuem apenas uma parte dos serviços MAC e operam apenas como um dispositivo da rede.

Existem duas topologias permitidas no padrão, que não são completamente descritas, já que a definição das camadas mais altas (i.e. rede e transporte) está fora do escopo do IEEE 802.15.4. As topologias permitidas são: estrela e *peer-to-peer*. Na topologia estrela, o nó coordenador (um FFD que inicia a rede) possui comunicação direta para os demais nós e estes apenas podem ter comunicação com o coordenador. Já na topologia *peer-to-peer* é permitido

que os nós que não são o coordenador da rede se comuniquem entre si. A Figura 13 ilustra as duas topologias.

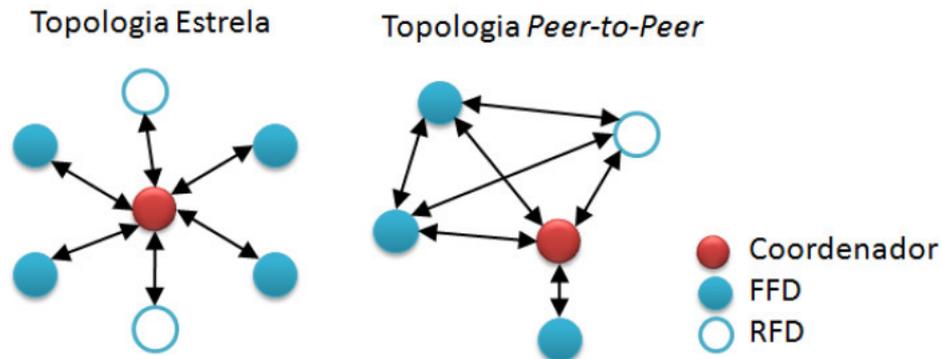


Figura 13 Topologias permitidas no IEEE 802.15.4.

Toda a rede, independente da topologia, possui um PAN ID (*Personal Area Network Identification*), que é um endereço de 16 bits que a identifica. Cada dispositivo também possui um endereço de 16 bits que o identifica dentro de uma rede 802.15.4.

2.5.3 Camada de Enlace (MAC) IEEE 802.15.4

As funções executadas pela camada de enlace na tecnologia IEEE 802.15.4 são: associação e desassociação, controle de segurança, funções para redes na topologia estrela (gerenciamento de *time slot* para transmissão, geração de ACKs) e suporte à aplicação para as duas topologias suportadas.

A camada MAC usa um protocolo baseado no algoritmo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), o qual requer que se escute o canal antes de transmitir para que a probabilidade de colisões durante a transmissão seja diminuída (IEEE, 2006). Existem dois modos de operação, que correspondem a dois mecanismos diferentes de acesso ao meio: um modo chamado *beacon-enabled* e outro *non beacon-enable*. No modo *non beacon-enable* o nó procura um canal para realizar a transmissão, enquanto que no modo *beacon-enabled*, existe uma estrutura chamada *superframe* que provê sincronização para

transmissão, evitando colisões, ou seja, para que um nó tenha acesso ao canal, ele deve receber um quadro de *beacon*. Uma descrição detalhada do acesso ao meio no IEEE 802.15.4, incluindo fluxogramas dos algoritmos CSMA/CA *beacon-enabled* e *non beacon-enabled* encontra-se disponível em (IEEE, 2006).

2.5.4 Procedimento de Formação de uma rede IEEE 802.15.4

Na formação de uma rede, inicialmente o coordenador, para estabelecer uma WPAN (*Wireless Personal Area Network*), precisa achar um canal que seja livre de interferências, já que outras WPAN podem coexistir na mesma região. A seleção do canal é realizada através de uma varredura para detectar o nível de energia nos canais. Quando o coordenador selecionar o canal, estabelecendo assim a WPAN, outros dispositivos poderão se associar à rede.

A operação de associação à rede pode ser resumida da seguinte forma: o nó procura por WPANs disponíveis, seleciona uma WPAN para se associar e inicia o processo de associação com um dispositivo FFD que já faz parte da rede.

2.6 O PADRÃO WIRELESSHART

O WH é o primeiro padrão aberto de comunicação sem fio certificado pela IEC para medidas e controle em processos industriais (MULLER, 2011). As aplicações são direcionadas principalmente para o uso em sensores fixos e atuadores. O WH possui uma arquitetura centralizada através de uma rede do tipo malha, apresentada na Figura 14.

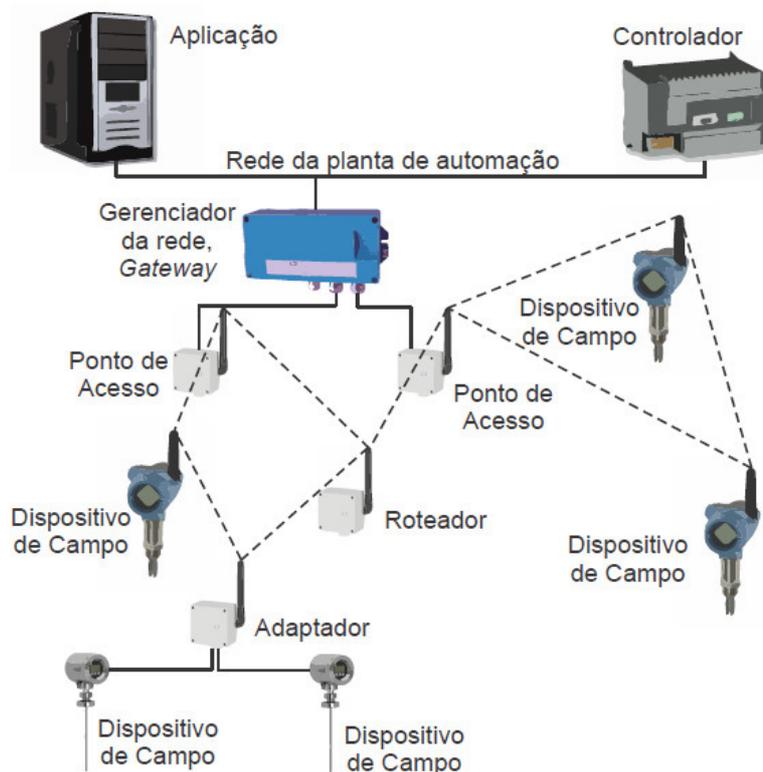


Figura 14 Topologia típica de uma rede *WirelessHart*.

A tecnologia do protocolo WH propicia uma rede segura e opera na banda de rádio de 2,4 GHz ISM. O protocolo utiliza a camada física do 802.15.4 com sequência direta de espalhamento do espectro (DSSS). Uma rede WH suporta uma ampla variedade de dispositivos de diversos fabricantes. Dos diversos dispositivos possíveis, são citados os principais:

- Dispositivos de campo básicos realizando funções de sensoriamento ou atuação;
- Dispositivos acessórios para roteamento, utilizados para suprir necessidades adicionais de enlace;
- Adaptador de dispositivos de campo, capazes de conectar redes HART com fio à rede WH;
- Dispositivos portáteis, para comissionamento e inspeção de rede;
- Pontos de acesso, que ligam os dispositivos de campo ao gateway;
- Gerenciador de rede, que cria e coordena a rede através do gateway.

2.6.1 Camadas do protocolo *WirelessHart*

Neste capítulo, são apresentados alguns conceitos importantes para entendimento do trabalho desenvolvido. As camadas física e enlace são apresentadas, em função da relevância para entendimento deste trabalho.

- **Camada física**

A camada física do WH é baseada na norma 802.15.4 (IEEE, 2006), operando na faixa de frequência livre de licença ISM (*Industrial, Scientific e Medical*) de 2,4 GHz, a uma taxa bruta de 250 kbits/s. Utiliza a técnica de *Channel Hopping* (salto de canais), fazendo com que cada comunicação entre dois dispositivos ocorra em um canal distinto. Essa técnica é empregada para reduzir a possibilidade de interferências com outras redes sem fio. A norma 802.15.4 define os canais 11 a 26 para o espectro de 2,4 GHz, sendo que cada canal possui uma largura de banda de 2 MHz, espaçados a cada 5 MHz. Porém, como o canal 26 ocupa uma faixa de frequências empregada por outros sistemas de RF em alguns locais do planeta, o WH utiliza apenas os canais 11 a 25. A Tabela 4 apresenta as frequências centrais dos canais utilizados no WH.

Tabela 4 Frequências centrais dos canais do WH

Canal	Freq. (GHz)	Canal	Freq. (GHz)	Canal	Freq. (GHz)
11	2,405	16	2,430	21	2,455
12	2,410	17	2,435	22	2,460
13	2,415	18	2,440	23	2,465
14	2,420	19	2,445	24	2,470
15	2,425	20	2,450	25	2,475

Fonte: HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2007

Todos os dispositivos WH devem fornecer uma EIRP (potência radiada isotrópica equivalente) nominal de até +10 dBm e devem possuir antena omni-direcional. O nível de potência do dispositivo deve ser controlado (programável) em níveis discretos de -10 dBm a +10 dBm EIRP.

As distâncias de comunicação esperadas para ambientes *outdoor* (com linha de visada direta) e ambientes *indoor* (sem linha de visada direta) são mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 Distâncias de comunicação do WH.

<i>Ambiente outdoor</i>		<i>Ambiente indoor</i>	
Potência de transmissão (dBm)	Distância (m)	Potência de transmissão (dBm)	Distância (m)
0	100	0	35
10	200	10	75

Fonte: HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2007

A camada física possui as seguintes funcionalidades (IEEE, 2006):

Detecção de energia (*ED Energy Detection*): é uma estimativa da potência do sinal recebido dentro da largura de banda do canal. Nenhuma tentativa é feita para identificar ou decodificar sinais no canal. O tempo de medição do ED deve ser igual ao período de 128 μ s.

Avaliação da utilização do canal (*CCA - Clear Channel Assessment*): avalia se determinado canal está em uso. A norma 802.15.4 define 6 tipos de CCA, sendo que o CCA utilizado no WH é do tipo 2 (*Carrier Sense Only* - sensibilidade da portadora somente). Neste caso, o CCA deve reportar o meio ocupado somente quando for detectado um sinal compatível com a norma 802.15.4, com a mesma modulação e características de espalhamento do PHY que está em uso no dispositivo.

- **Camada de enlace**

Esta camada define meios confiáveis para a transmissão de pacotes entre dois dispositivos da rede, detectando erros de transmissão que podem ocorrer na camada física (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2008a). Pode ser dividida em duas subcamadas:

- a) Camada Logical Link Control (LLC): controla o formato dos quadros, a estrutura dos endereços dos dispositivos e serviços de segurança para garantir a integridade das mensagens e detecção de erros;

- b) Camada Medium Access Control (MAC): Coordena os instantes nos quais o dispositivo pode transmitir mensagens.

A camada de enlace utiliza o método de acesso ao meio TDMA (*Time Division Multiple Access*) de modo a prover comunicação determinística e livre de colisões. Os canais de comunicação são divididos em segmentos de tempo (*timeslots*) de 10 ms nos quais são realizadas as comunicações entre os dispositivos. A camada mantém uma contagem do número absoluto de *timeslots* que já ocorreram desde a inicialização da rede. Este número é conhecido como *Absolute Slot Number* (ASN). O padrão utiliza o conceito de *channel hopping*, no qual saltos de canais são realizados a cada *timeslot*, de modo a reduzir os efeitos das interferências.

O conceito de *superframe*, comum em protocolos que utilizam TDMA, descreve uma sequência de *timeslots* consecutivos que se repetem periodicamente. O período de um *superframe* é determinado pelo seu comprimento em número de *timeslots*. Os *superframes* iniciam a partir do ASN 0 (no momento em que a rede é criada). Diferentes *superframes* com diferentes comprimentos podem ser configurados nos dispositivos. A Figura 15 ilustra um exemplo de *superframe* com comprimento de 25 *timeslots*, se repetindo periodicamente. O período do ciclo é, portanto, de 250 ms.

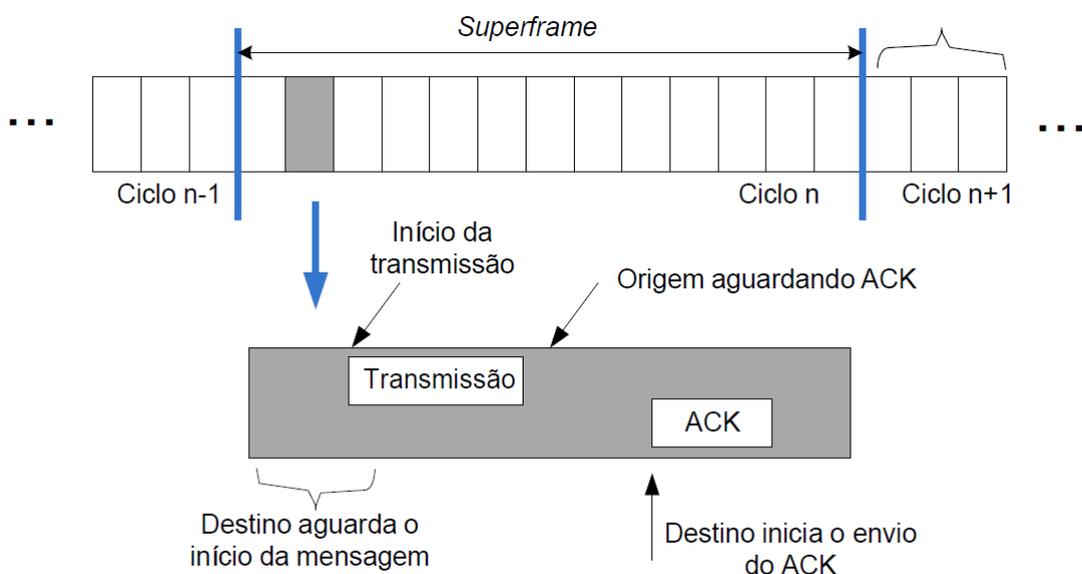


Figura 15 Superframe TDMA e detalhe do timeslot

Os *timeslots* disponíveis no *superframe* são alocados para a comunicação entre os dispositivos de acordo com suas demandas. Quando dois nodos possuem um mesmo *timeslot* configurado para se comunicarem um com o outro, diz-se que os mesmos possuem um link.

Cada *timeslot*, ou link, pode ser descrito por um vetor que consiste nos seguintes itens:

- a) *Superframe* id: identificador do *superframe* ao qual o *timeslot* pertence;
- b) Índice: define o número do *timeslot* dentro do *superframe*;
- c) Tipo: define qual é o tipo de *slot* para cada dispositivo (se é usado para transmissão ou recepção de dados, ou é inativo);
- d) Origem e destino: identifica qual o dispositivo transmissor dentro do *timeslot* e o dispositivo do receptor;
- e) e) Offset de canal: provê o canal lógico a ser utilizado na comunicação.

Dentro do período do *timeslot*, estão previstos o envio de um pacote pelo dispositivo de origem, e a confirmação do recebimento pelo destinatário. Com a confirmação, é possível detectar falhas nas transmissões. Se o nodo que envia a mensagem não recebe a confirmação do nodo destinatário, o mesmo pode reenviar o pacote no próximo link disponível com o destinatário.

Os *links* ainda podem ser do tipo compartilhado, onde diversos dispositivos competem pela transmissão a um dispositivo receptor. Neste caso, se dois dispositivos transmitirem simultaneamente no *link* compartilhado, irá ocorrer uma colisão que invalidará o conteúdo do pacote recebido no dispositivo receptor. O receptor não irá enviar a confirmação de recebimento e os transmissores deverão retransmitir o pacote no próximo *link* disponível.

Um *link* do tipo broadcast possui um nodo transmissor e múltiplos nodos receptores. Quando o endereço de destino de um pacote é do tipo *broadcast*, os dispositivos receptores não enviam a confirmação de recebimento dentro do *timeslot*.

O padrão utiliza o conceito de *channel blacklisting*, no qual os canais afetados por interferências podem ser desabilitados pelo operador. Em função do *blacklisting*, cada nodo possui uma tabela contendo os canais ativos da rede. Tendo de base esta tabela de canais ativos e o offset de canal do *timeslot*, o nodo pode determinar o canal físico a ser utilizado na sua comunicação.

2.6.2 Rede tipo malha

A rede do tipo malha completa deve ser considerada uma característica que torna o protocolo WH robusto, uma vez que utiliza rotas redundantes para o envio das mensagens. O padrão WH requer que cada dispositivo de campo seja capaz de fazer o roteamento das mensagens (WINTER, 2013).

As mensagens podem se propagar através de dispositivos intermediários, sendo que cada movimento de um pacote de um dispositivo para outro, ao longo da rota para o dispositivo de destino final, é chamado de salto (*hop*). A latência da rede aumenta à medida que uma mensagem leva um número maior de saltos para o destino final (FERRARI, et al., 2012).

A Figura 16 ilustra um exemplo 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, foi analisada a dinâmica de encaminhamento de pacotes entre os diversos dispositivos. As linhas tracejadas identificam as rotas diretas para o gateway da rede e as linhas contínuas indicam as rotas alternativas utilizadas pelos dispositivos para encaminhamento de mensagens. Durante o ensaio, são observados envios de mensagens através de dispositivos intermediários bem como envios diretos para o gateway.

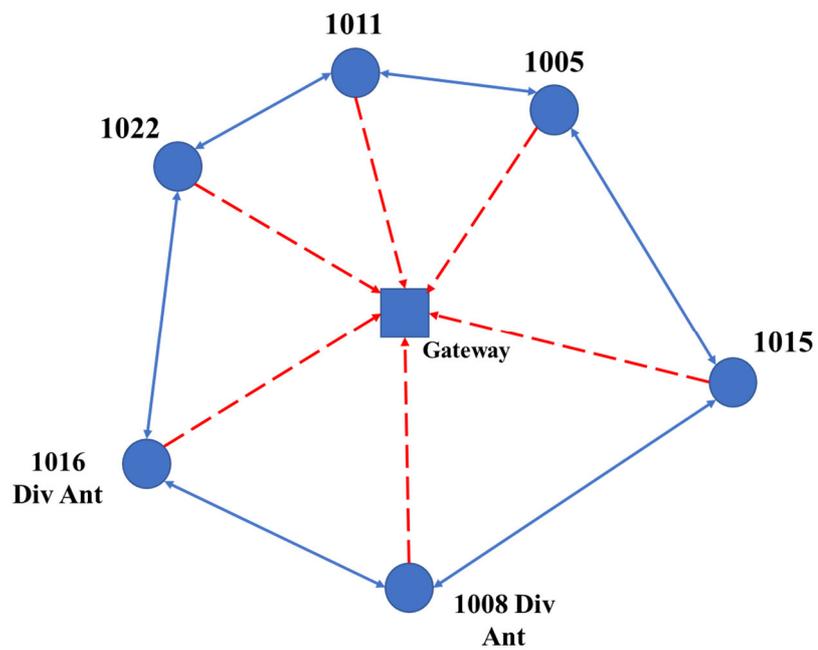


Figura 16 Rede tipo malha

A topologia em malha é uma característica importante de confiabilidade das redes WH, pois, uma vez que o enlace entre dois dispositivos não possui uma relação sinal-ruído suficiente para garantir a entrega de uma mensagem, o protocolo em nível lógico encaminha a mensagem através de outra rota, que pode apresentar uma relação sinal-ruído melhor. Isto pode ocorrer em função de estar fora da zona de interferência ou mesmo mais próximo do dispositivo fonte.

3 ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE

A análise do estado da arte tem como objetivo uma pesquisa dos trabalhos acadêmicos de maior relevância publicados em periódicos e revistas da área referentes à diversidade de antenas em redes de sensores sem fio, expondo as características principais, os resultados experimentais e conclusões destes trabalhos.

Alguns trabalhos estão relacionados com diversidade de antenas em WSNs (*Wireless Sensor Networks*), como no trabalho de (SEBALD, et al., 2016) onde foi desenvolvida uma topologia de WSNs num sistema de comunicação para o ambiente aeroespacial, mais precisamente para um lançador de foguetes da Airbus Espaço e Defesa, que explora a redundância espacial. O ambiente é um desafio para a comunicação sem fio em relação à propagação de ondas eletromagnéticas devido à sombra, reflexão e absorção por objetos metálicos e materiais de fibra de carbono. O ambiente aeroespacial(industrial) é conhecido por ser rígido para dispositivos eletrônicos, não só por causa do estresse mecânico e temperaturas extremas, mas também no que diz respeito ao canal de comunicação sem fio. A propagação de ondas eletromagnéticas é dificultada por muitos objetos metálicos, que também criam um canal multi-caminho desafiador devido a várias reflexões. Além disso, o uso de materiais de polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP) para peças estruturais leva a um ambiente onde as ondas eletromagnéticas são parcialmente absorvidas, o que resulta em intervalos de comunicação ainda mais baixos sob condições de não-linha de visada. Para alcançar comunicação em tempo real com alta confiabilidade nestas condições de canais, é promissor explorar as redundâncias no sistema de comunicação. Em princípio, as fontes de redundância podem ser encontradas no tempo, na frequência e no domínio espacial.

É implementada uma rede de sensores sem fios no compartimento de equipamento do veículo (VEB) de um Ariane 5 composto por 6 pontos de acesso (AP) e 70 nós de sensores sem fios. Considerando o tamanho do VEB (5,4 m de diâmetro), um AP seria suficiente para atingir

todos os nós do sensor dentro, mas pelo menos dois APs são necessários para explorar a redundância espacial. Foram utilizados seis APs (um a cada 2,8 m) para poder medir o desempenho para um intervalo razoável de redundância espacial.

Mensagens de sensores individuais são recebidas por pontos de acesso distribuídos e mensagens para sensores / atuadores são enviadas simultaneamente a partir desses APs. Este método permite uma comunicação confiável sem impacto negativo na latência ou no consumo de energia. As medições em um ambiente relevante, bem como simulações e avaliações de desempenho em termos de taxas de erro de bits mostraram que o sistema funciona melhor do que as redes de sensores de última geração em uma ampla faixa de condições de contorno, especialmente sob condições de canal sem fio desvanecidos. Especificamente, uma precisão de sincronização entre os APs de $0,3 \mu\text{s}$ permite um desempenho superior em termos de taxa de erro bit em todas as condições de limite.

No trabalho de (BILGIÇ, 2014) é apresentada uma rede de alarmes sem fio, onde os transceptores são colocados em uma cerca metálica. Como a transmissão sem fio é considerada a operação mais cara em termos de energia do nó sensor, é mais do que uma necessidade ter um bom projeto de antena. Simulações mostram que as estruturas de antenas tradicionais exibem um desempenho ruim para essas aplicações. Em vez disso, é proposto um sistema de diversidade de duas antenas de baixo custo que utiliza duas antenas PCB. A diversidade de antenas por meio de chaves de frequência de rádio foi implementada para duas configurações: seleção de antena de estado único e combinação de diversidade de ganho igual. Ganhos de diversidade foram calculados para as condições de operação de espaço livre e sobre a cerca, e a melhor configuração de antena é sugerida para aplicações práticas. Os resultados mostraram que dentre as estruturas de antenas tradicionais, a antena dipolar impressa balanceada com balun PCB integrado exibiu desempenho superior em simulações. Os ganhos de diversidade foram calculados usando o coeficiente de correlação.

O trabalho de (HAMDOUN et al., 2013) propõe um método de estimativa de localização indoor baseado no RSSI em WSNs aplicando diversidade de antena, no qual apresenta algumas vantagens em termos de complexidade e consumo de energia. A estimativa precisa da localização do nó alvo sem fio pode ser conseguida através da utilização de antenas múltiplas. Neste trabalho, foi realizada uma comparação entre três modelos de sistemas para mostrar o impacto do uso de antenas múltiplas na precisão de posição tanto no transmissor como no receptor ou nos dois lados. É assumido, que apenas os transceptores de apoio estão equipados com múltiplas antenas independentemente do seu papel como transmissores ou receptores. Sendo assim, os três modelos de sistemas propostos são: O sistema SIMO "Single Input Multiple Output" onde a diversidade de recepção é explorada. O sistema MISO "Multiple Input Single Output" onde a diversidade de transmissão é explorada. É considerado também, o caso de diversidade na transmissão e recepção conjunta denominada MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Nós fazemos uma comparação relativa à precisão de posição entre estes três modelos de sistema ao usar a trilateração, bem como o algoritmo de multilateração. Os algoritmos de multilateração e trilateração são usados para calcular o erro de posição.

Para comparar o impacto da utilização de múltiplas antenas de transmissão e / ou de recepção na precisão da localização, estabeleceu-se uma vasta gama de medições. Foram consideradas três posições para o nó alvo P1, P2 e P3 para cada algoritmo de localização. Para cada etapa, foram coletadas 100 medições das posições. A média das medidas é calculada para ser considerada para o processo de localização, a fim de estimar a posição do alvo. Para fins de comparação, o sistema SISO (*Single-Input and Single-Output*) é considerado. Foram utilizadas duas antenas no transmissor, no receptor e no lado transmissor-receptor para os sistemas MISO, SIMO e MIMO, respectivamente.

Os melhores resultados foram obtidos para a posição P1 do alvo para ambos os algoritmos de localização, pois é o centro de gravidade das âncoras. Assim, quanto mais

próxima for a posição-alvo para o centro de gravidade, melhores serão os resultados. Uma melhoria no desempenho de cerca de 30% a 50% é obtida quando se utilizam duas e quatro antenas, respectivamente. Notamos que a precisão de desempenho melhora consideravelmente ao aumentar o número de antenas.

Especificamente, o sistema MIMO executa os sistemas SIMO e MISO que apresentam o mesmo desempenho, deste modo, os resultados obtidos mostraram que o desempenho de localização é melhorado quando se utiliza múltiplas antenas. Especificamente, usando antenas múltiplas em ambos os lados, elas apresentam melhor desempenho do que usando antenas múltiplas no transmissor ou no receptor.

Foi mostrado também que o algoritmo de multilateração apresenta melhores resultados em comparação com o de trilateração. A partir de (HAMDOUN et al., 2013), conclui-se também que os melhores resultados foram obtidos para o sistema MIMO.

No trabalho realizado por (KUSY, et al., 2011) foi implementada uma nova arquitetura de rede de rádio dual para melhorar a confiabilidade de comunicação em redes de sensores sem fio. Especificamente, foram implementados transceptores de rádio que operam em frequências de rádio duplas amplamente espaçadas e através de antenas espacialmente separadas que oferecem comunicação robusta, alta diversidade de links e melhor mitigação de interferência. Os autores concluíram que a pilha de rádio duplo obtém melhorias significativas nas taxas de entrega de ponta a ponta, nos custos de transmissão de dados e nas latências de entrega em relação às redes de rádio simples implantadas nos mesmos locais. Além disso, a melhora da confiabilidade vem com um incremento de energia de menos de 33% usando-se em baixa potência.

O trabalho de (WEI, 2010) utiliza a técnica de diversidade de antenas, para aumentar a capacidade dos canais e expandir a faixa de cobertura do sinal para melhorar a qualidade do sinal de transmissão, com objetivo na localização de um nó numa WSN. O RSSI, um dos

métodos mais comuns de medição de distância na localização do nó WSN, é muito sensível ao ambiente, causando grande erro de alcance. Os resultados mostraram que a técnica de diversidade de antena quando aplicada, em comparação com a medição de distância tradicional do RSSI com uma antena ideal, a precisão da localização é efetivamente melhorada.

4 MÉTODOS E MATERIAIS

4.1 DISPOSITIVOS UTILIZADOS

Uma rede WH é composta de diversos elementos como gateway, pontos de acesso gerenciador de rede, dispositivos de campo, *handhelds* e adaptadores HART. Os dispositivos que realizam comunicação sem fio na rede são identificados através de identificadores únicos (IDs) que, posteriormente ao ingresso na rede, são substituídos por apelidos atribuídos pelo gerenciador da rede. Também são utilizados nomes curtos, ou TAGs, que são utilizados nesse trabalho para identificar os dispositivos utilizados nos experimentos.

4.1.1 Gateway

O gateway é o elemento central de uma rede WH. Uma rede deve conter ao menos um gateway, pois ele viabiliza a comunicação entre a rede WH e os outros elementos da rede corporativa. No âmbito deste trabalho, foi utilizado o *Smart Wireless Gateway* da Emerson (EMERSON, 2013) que consiste em três elementos da rede em conjunto: o gateway, o gerenciador de rede e o ponto de acesso (Figura 17). O gateway possui um software de gerenciamento através do qual é possível enviar comandos HART definidos na norma para rádios conectados à rede. A interface do gateway é utilizada para configurar a rede conforme desejado.



Figura 17 Gateway utilizado nos experimentos realizados.

4.1.2 Transceptor de RF

O dispositivo utilizado nesse trabalho pode ser visto na Figura 18 (MULLER et al., 2010), (FREESCALE, 2012). Ele utiliza um rádio microcontrolador que está de acordo com o padrão da IEEE 802.15.4. Possui um processador ARM7 de 32bits e um transceptor de rádio de baixo consumo que opera na banda de 2,4GHz. O transceptor suporta transmissão, recepção, CCA, detecção de energia e medição do LQI. A alimentação do transceptor é realizada através de uma bateria de Lítio-íon de 3,7V que pode ser recarregada através de uma porta USB. Foi acrescentado na placa do transceptor de RF um LNA-PA (*Low Noise Amplifier* e *Power Amplifier*) para aumentar a sensibilidade do receptor em 10 dB e a potência de saída para até 20 dBm (embora o protocolo WH defina a potência de saída em 10 dBm, a norma IEEE 802.15.4 permite até 20 dBm). Também é utilizado um RTC TCXO (*Real-time clock temperature compensated crystal oscillator*) para que as restrições temporais do TDMA sejam atendidas, uma vez que o protocolo WH exige um RTC com incerteza máxima de 10 ppm para que não ocorra a perda de sincronização.

O hardware previamente desenvolvido foi modificado para incluir uma chave que seleciona a antena que irá transmitir ou receber o sinal de RF.

Os dispositivos de campo WH incluem os sensores, condicionamento de sinal e o transceptor, sendo estes dispositivos, distribuídos pelo ambiente industrial. Os transceptores de RF são responsáveis por realizar a publicação de suas variáveis de processo e a transmissão de pacotes entre dois pontos distintos na rede.



Figura 18 Exemplo de dispositivo de campo utilizado nos experimentos.

O transceptor de RF também possui uma porta de manutenção que permite o envio local de comandos HART para o rádio, sem que passe pela camada de enlace e rádio. Isso permite realizar a configuração inicial do rádio, operações de manutenção e outras operações locais no dispositivo. A mesma porta pode ser utilizada para depuração, que foi feito nesse trabalho, de acordo com as necessidades apresentadas.

4.2 HARDWARE DO TRANSCEPTOR DE RF

Para o desenvolvimento desta dissertação, os transceptores de RF anteriormente descritos, são analisados para o emprego da diversidade de antenas. A descrição do caminho de RF, de seleção de portas, é apresentada abaixo, com o intuito de esclarecer os detalhes para aplicação da técnica de diversidade de antena.

4.2.1 Sinal de RF na transmissão

O esquema elétrico com o caminho do sinal de RF na transmissão pode ser visto na Figura 19.

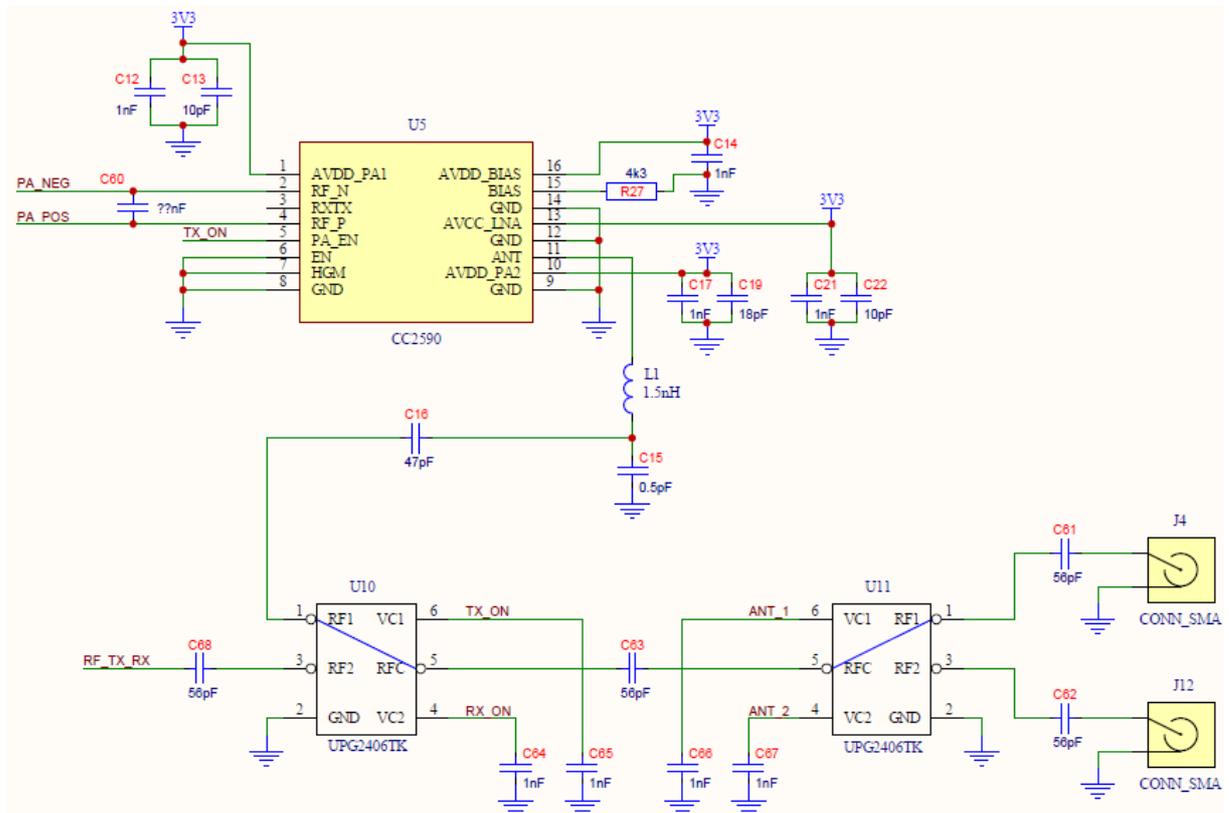


Figura 19 Esquema elétrico do módulo de rádio.

O transceptor de RF transmite os sinais diferenciais PA_POS e PA_NEG para as entradas RF_P e RF_N, respectivamente, do amplificador de potência de RF, referência U5 no esquemático (TEXAS INSTRUMENTS, 2008), onde estes sinais são acoplados através de um Balun e depois enviados ao PA interno, que fornece um ganho de até 22 dB. Em seguida o sinal de RF amplificado passa por uma chave de RF (U10) que está selecionada para o modo transmissão (chave na posição RF1). As chaves apresentam perda de atenuação de cerca de 0,5 dB, de acordo com o fabricante. Após o sinal passa por outra chave, que seleciona a porta de RF na qual a antena conectada irá transmitir o sinal de RF.

4.2.2 Sinal de RF na Recepção

Na recepção do sinal de RF, a chave U11, inicialmente na posição RF1, recebe o sinal proveniente da antena. Após o sinal chega à outra chave (U10) que está na posição RF2, ou seja, no modo recepção, para assim, o sinal de RF (RF_TX_RX) chegar ao transceptor.

4.3 TESTE DE VALIDAÇÃO DO MÓDULO RÁDIO

Objetivando validar o módulo de rádio utilizado para o desenvolvimento desta dissertação, um teste de isolamento é realizado através de um firmware de testes. O firmware permite a realização de configurações de modulação, canal, potência e porta de saída (RF1 = Antena 1 ou RF2 = Antena 2) do sinal a ser transmitido/recebido. Então, inicialmente o módulo é configurado para transmitir pela porta RF1, canal 11 (2,405 GHz) e com potência de 20 dBm. Após a porta RF2 do módulo é isolada através de uma carga para evitar a reflexão do sinal e um medidor de potência de RF é conectado à porta RF1 para realizar-se a medição da potência de transmissão. Em seguida seleciona-se a porta RF2 e mede-se a isolamento da porta RF1. A Figura 20 apresenta o experimento para a realização das medidas.

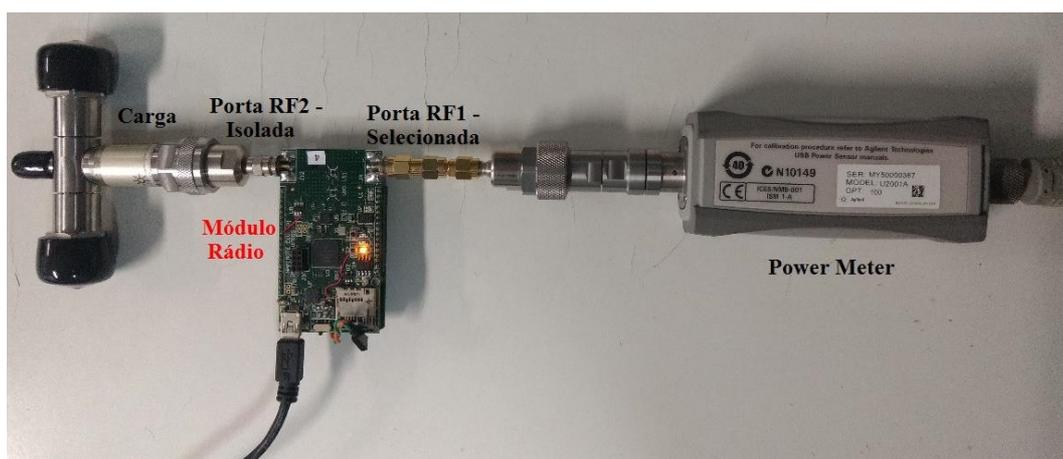


Figura 20 Setup para medição da isolamento de canais do módulo de RF.

O procedimento de teste é realizado nos extremos da banda de RF empregada. Primeiramente, faz-se as medições no canal 11 e, após, configura-se o módulo para o canal 26

e a porta RF1 é isolada. Repete-se o procedimento de modo inverso. As medidas de isolamento entre as portas nos canais extremos são apresentadas nas Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 Medida de isolamento entre portas canal 11.

Saída	Potência Medida	Saída	Potência Medida
RF 1 (selecionada)	20,3dBm	RF 1 (Isolada)	3,4dBm
RF 2 (Isolada)	4,1dBm	RF 2 (selecionada)	19,7dBm

Tabela 7 Medida de isolamento entre portas canal 26.

Saída	Potência Medida	Saída	Potência Medida
RF 1 (selecionada)	19,5dBm	RF 1 (Isolada)	3,7dBm
RF 2 (Isolada)	4,9dBm	RF 2 (selecionada)	19,1dBm

De posse dos dados do experimento realizado, é possível determinar a sensibilidade de recepção, para que a seleção da porta de RF adequada seja efetiva. Uma vez validado o hardware, sabe-se que o mesmo está apto para uso com diversidade de antenas.

4.4 Teste de casamento das antenas

O objetivo deste teste é verificar as antenas com o menor VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*), obtendo assim o melhor casamento de impedâncias, e como resultado, a máxima transferência de potência para a antena durante a transmissão. Desta forma, o conjunto transceptor mais antenas casadas está apto para o experimento com diversidade de antenas.

Na medição das antenas, um VSWR alto indica má adaptação da linha de transmissão, acarretando em energia refletida pela antena, diminuindo a eficiência do transmissor e até mesmo danificando o amplificador de potência. Para fins de comparação das antenas, foram realizadas medições de VSWR de antenas com um analisador vetorial, onde a máscara da

medição de uma antena ideal é utilizada como referência para as medições, conforme a Figura 21.

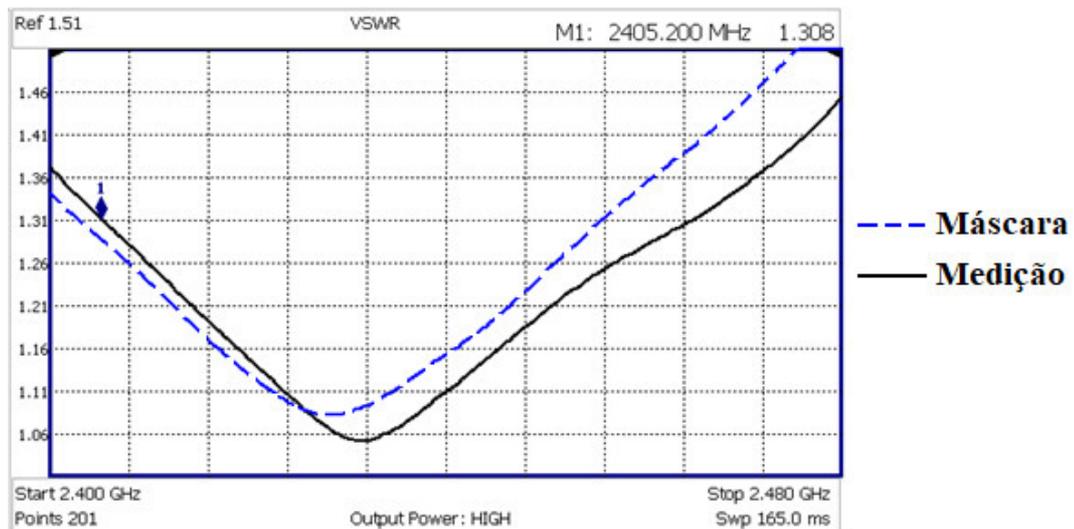


Figura 21 Medida do VSWR da antena nos canais 11 e 26 para fins de comparação.

Foram consideradas aptas a serem utilizadas neste trabalho as antenas que apresentaram $VSWR < 2$ nos canais 11 e 26, conforme Tabela 8.

Tabela 8 Medida do VSWR das antenas nos canais extremos utilizadas no trabalho.

Antenas	VSWR – canal 11	VSWR – canal 26
1	1,17	1,96
2	1,12	1,55
3	1,29	1,57
4	3,17	2,66
5	2,89	3,1
6	1,73	1,41
7	2,72	3,91
8	1,14	1,49
9	1,06	1,62
10	2,42	1,86
11	1,98	2,28
12	3,87	2,05
13	2,05	2,13
14	4,00	2,85

4.5 FIRMWARE DO TRANCEPTOR DE RF

A placa do módulo rádio é carregada com um firmware que permite a realização de testes de conectividade sem fio e comunicação serial através de portas USB tipo COM virtuais. Para executar este aplicativo, o usuário precisa de uma ferramenta para enviar e receber

caracteres em duas portas seriais. Nesta dissertação, a ferramenta utilizada como terminal serial foi o PuTTY.

4.5.1 Teste de conectividade

O teste de conectividade avalia a conectividade básica entre dois transceptores. São necessários um transmissor e um receptor. O teste de conectividade suporta as seguintes funcionalidades (FREESCALE SEMICONDUCTOR, 2011):

- Configuração do transceptor em um modo de teste específico para testar o desempenho do transceptor RF. Estes modos de teste são:
 - Transmissão modulada;
 - Transmissão não modulada;
- Medir a porcentagem de perdas de pacotes em um determinado canal, bem como o Indicador de Qualidade de Link de cada pacote recebido.
- Apresenta a potência do sinal recebido usando o Indicador de Qualidade do Link.

Em ambos os modos, parâmetros como o número do canal e o nível de potência podem ser modificados. Isso permite que o usuário execute todos os testes em cada canal usando diferentes valores de potência.

4.5.2 Utilização do Teste de Conectividade

Para iniciar o teste de conectividade, são executados os seguintes passos:

1. Configurar a porta serial USB virtual;
2. Conectar cada Módulo Rádio a um cabo USB e a uma porta USB;
3. Reinicialização dos módulos.

No terminal aparece como mostrado na Figura 22-*a*, após a opção 3 "SELECT TEST MODE" é selecionada, esta opção de menu é exibida como mostrado na Figura 22-*b*.

O teste de alcance usa o LQI para monitorar a variação da distância entre o transmissor e o receptor em uma transmissão normal. Este teste usa dois dispositivos, um configurado como transmissor e o outro como receptor. Neste teste, o transmissor envia uma mensagem e aguarda um pacote de confirmação, então o receptor calcula o LQI do pacote recebido e envia para o transmissor o pacote de confirmação. Em ambos os dispositivos (transmissor e receptor), o valor LQI é enviado para o terminal serial PuTTY. Este processo é repetido até o usuário terminar o teste. Ver Figura 24.



Figura 24 Range Test Stop e Start.

4.6 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DE DIVERSIDADE DE ANTENA

O algoritmo de diversidade de antena foi projetado para selecionar a melhor antena com base nos valores de LQI medidos em ambas as antenas. Um fluxograma foi elaborado para a concepção do algoritmo, conforme pode ser visto na Figura 25.

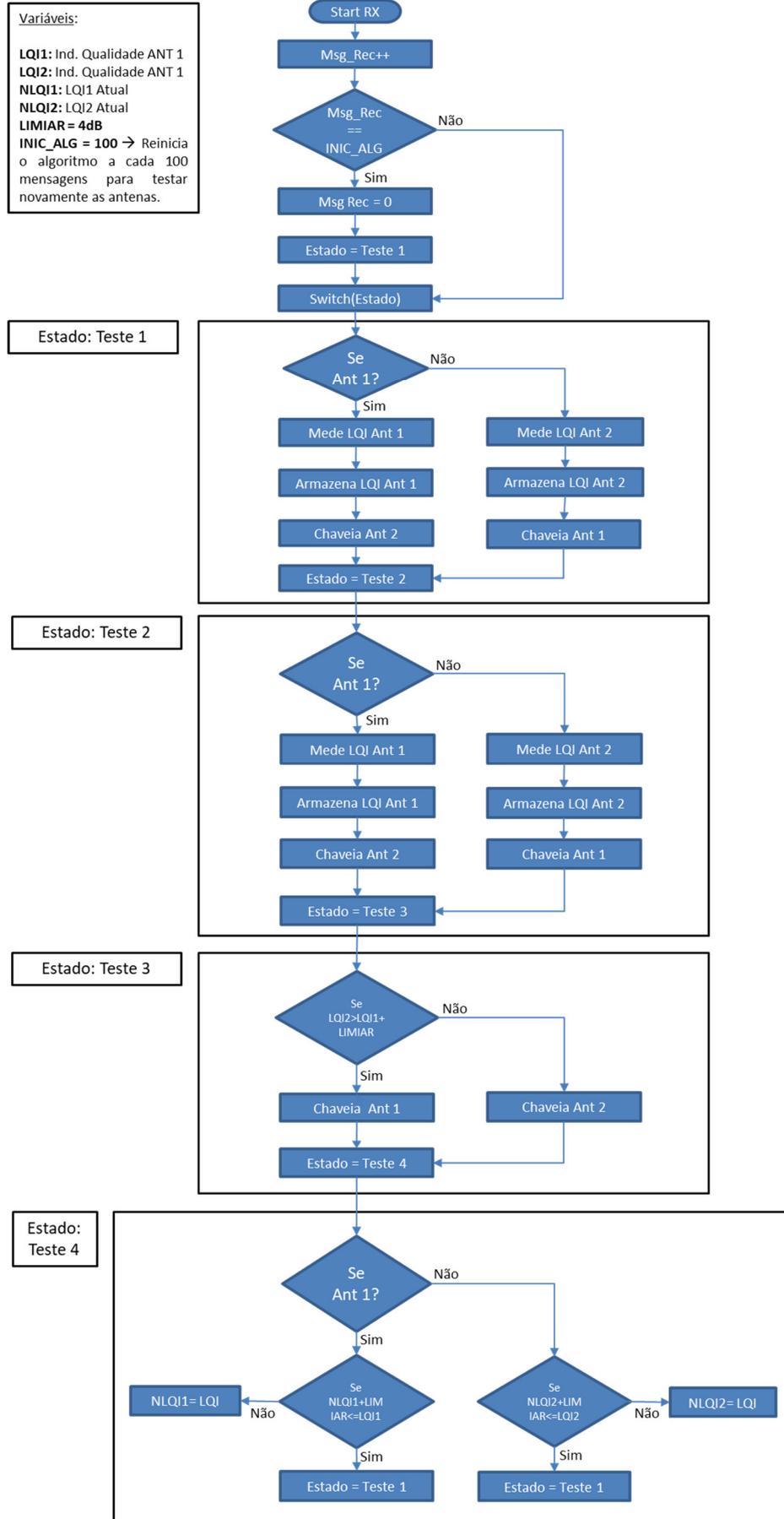


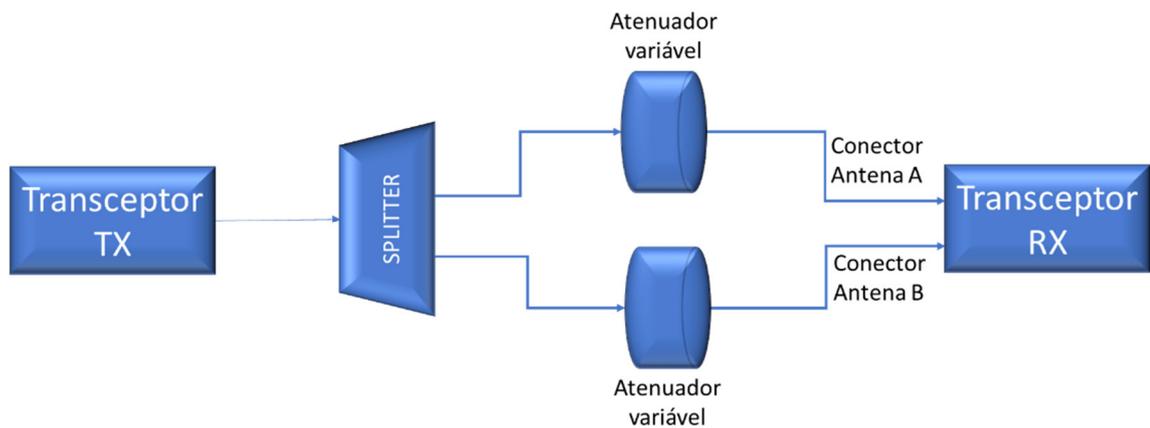
Figura 25 Diagrama de estado do algoritmo de diversidade de antena.

O algoritmo realiza, inicialmente, a medição do valor de LQI da antena 1. Este valor de LQI é armazenado e o receptor então muda para a antena 2. O valor de LQI da antena 2 também é medido e armazenado. Com base nos valores relativos destas duas medidas de LQI, é então tomada a decisão para selecionar a antena ideal (ou seja, a antena com o maior valor de LQI). A cada nova mensagem de rádio recebida, é realizada uma nova leitura do LQI da antena selecionada e comparada com o LQI anterior da mesma antena, que serve para verificar se não houve perda considerável de intensidade do sinal da antena. Na comparação do valor atual com o anterior, é acrescentado um determinado limiar ajustável, a fim de dessensibilizar o algoritmo para evitar trocas desnecessárias (em função de ruídos, por exemplo). Além disso, é verificado se o sinal LQI da antena selecionada é ainda mais forte que o LQI da antena alternativa. Caso alguma das condições anteriores não seja satisfeita a antena alternativa será selecionada.

A cada 100 mensagens recebidas, o algoritmo é reiniciado para verificar novamente se a escolha da antena deve ser reavaliada.

4.6.1 Teste de validação do algoritmo de diversidade de antena

O algoritmo de diversidade de antena foi primeiramente implementado em linguagem C dentro do firmware de testes. O teste de validação do algoritmo foi incluído no comando *RANGE TEST* (opção r) do software, que permite o teste de conectividade entre dois transceptores de RF, conforme visto na seção 4.5.1. O *setup* para implementação do teste de validação, foi realizado dentro de um ambiente confinado (sem utilização de antenas), afim de evitar interferências devido a fatores externos. A Figura 26-*a* apresenta um diagrama de blocos do experimento realizado, e 26-*b*, uma fotografia do mesmo.



a) Diagrama de blocos do setup.



b) Imagem do setup implementado.

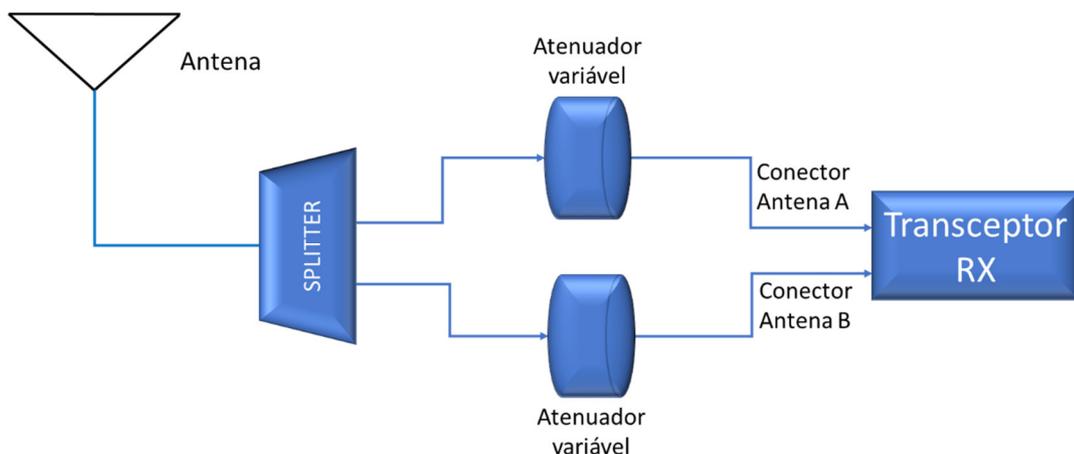
Figura 26 Setup para implementação do teste de validação do algoritmo de diversidade de antena.

O Módulo de Rádio TX, através de cabos, transmite o sinal de RF em baixa potência para o *splitter* que divide este sinal em dois sinais com intensidades equivalentes para serem injetados em dois atenuadores variáveis, com o objetivo de simular o desvanecimento dos sinais por multipercursos e aplicá-los aos conectores das antenas A e B. Deste modo o algoritmo deve selecionar a antena com o melhor sinal de LQI, conforme Figura 27.

vizinho; *b*) a antena escolhida, para cada vizinho; *c*) variáveis acessórias para controle da máquina de estado.

Desta maneira, existe uma máquina de estados para cada vizinho, de forma que a escolha da melhor antena é feita para cada vizinho ligado ao dispositivo com diversidade de antena.

Deste modo, o *setup* para realização do teste de validação, foi novamente implementado dentro de um ambiente confinado, ou seja, livre de interferências. A antena conectada ao *splitter* recebe os sinais de RF provenientes do *Smart Wireless Gateway*, e o *splitter* divide este sinal em dois sinais com potências equivalentes para serem injetados, através de cabos, em dois atenuadores variáveis com o objetivo de simular o desvanecimento dos sinais por multipercursos e aplicá-los aos conectores das antenas A e B do transceptor de RF. Deste modo o algoritmo seleciona a antena com o melhor LQI. A Figura 28-*a* apresenta o diagrama de blocos do experimento, e 28-*b*, uma fotografia do mesmo.



a) Diagrama de blocos do setup.



b) Imagem do setup implementado.

Figura 28 Setup implementado para teste de validação do algoritmo de diversidade de antena na pilha WH.

Após o *setup* implementado, verificou-se a conexão e a comunicação entre o módulo de rádio e os outros elementos da rede WH, através do gerenciador de rede do *Smart Wireless Gateway*, conforme as Figuras 29 e 30.

HART Tag	Node state	Active neighbors	Neighbors	Service denied	Reliability	Missed updates	Path stability	RSSI	Joins	Join Time
TAG_1008 DIV_ANT	●	wihartgw	1	●	46.4 %	5580	69.4 %	-54 db	7	01/11/18 17:13:48

Figura 29 Módulo Rádio conectado à rede *WirelessHART*

HART Tag	Node state	Active neighbors	Neighbors	Service denied	Reliability	Missed updates	Path stability	RSSI	Joins	Join Time
TAG 1005	●	wihartgw TAG 1011 TAG 1015	3	●	99.4 %	11	99.5 %	-43 db	1	01/17/18 07:11:01
TAG 1008 DIV_ANT	●	wihartgw TAG 1015	2	●	100.0 %	0	89.5 %	-47 db	1	01/18/18 14:12:27
TAG 1011	●	wihartgw TAG 1022 TAG 1005	3	●	99.4 %	11	98.5 %	-67 db	1	01/17/18 07:13:24
TAG 1015	●	wihartgw TAG 1005 TAG 1008 DIV_ANT	3	●	99.5 %	10	95.8 %	-65 db	1	01/17/18 07:14:26
TAG 1022	●	wihartgw TAG 1011	2	●	99.3 %	13	99.1 %	-43 db	1	01/17/18 07:10:30

Figura 30 Módulo Rádio se comunicando com os outros elementos da rede WH.

Desta forma, verificou-se o funcionamento do algoritmo de diversidade de antena dentro da rede WH, pela percepção de que o algoritmo seleciona a antena com o melhor LQI. No teste realizado, é possível verificar pela Figura 31, que o algoritmo seleciona a antena com o menor valor em módulo do LQI.

```

- 1, Off A LQI=-91 ----- On B LQI=-84
- 1, Off A LQI=-91 ----- On B LQI=-84
- 1, Off A LQI=-91 ----- On B LQI=-84
- 1, Off A LQI=-91 ----- On B LQI=-84
- 1, Off A LQI=-91 ----- On B LQI=-84
- 1, Off A LQI=-86 ----- On B LQI=-84
- 1, On A LQI=-75 ----- Off B LQI=-85
- 1, On A LQI=-75 ----- Off B LQI=-85
- 1, On A LQI=-75 ----- Off B LQI=-85
- 1, Off A LQI=-85 ----- On B LQI=-77
- 1, Off A LQI=-85 ----- On B LQI=-77
- 1, Off A LQI=-85 ----- On B LQI=-77
- 1, Off A LQI=-85 ----- On B LQI=-77
- 1, On A LQI=-78 ----- Off B LQI=-83
- 1, On A LQI=-78 ----- Off B LQI=-83
- 1, Off A LQI=-78 ----- On B LQI=-76
- 1, Off A LQI=-83 ----- On B LQI=-83
- 1, Off A LQI=-83 ----- On B LQI=-83
- 1, Off A LQI=-83 ----- On B LQI=-83
- 1, Off A LQI=-83 ----- On B LQI=-83
- 1, On A LQI=-75 ----- Off B LQI=-80
- 1, On A LQI=-75 ----- Off B LQI=-80
- 1, Off A LQI=-87 ----- On B LQI=-84
- 1, Off A LQI=-87 ----- On B LQI=-84
- 1, Off A LQI=-87 ----- On B LQI=-84
- 1, Off A LQI=-95 ----- On B LQI=-81

```

Figura 31 Teste de seleção da melhor antena pelo transceptor de RF na rede WH.

Este teste valida o algoritmo, e os valores obtidos de LQI On (antena selecionada, com melhor valor de LQI) e LQI Off (antena não selecionada, com pior valor de LQI) são posteriormente utilizados para o cálculo de ganho de diversidade dos sinais recebidos pelo transceptor de RF com o algoritmo de diversidade de antena implementado.

5 SIMULAÇÃO DE CORRELAÇÕES ESPACIAIS

5.1 SIMULAÇÃO DE GANHO DE DIVERSIDADE COM DUAS ANTENAS

Os sinais transmitidos por dispositivos de comunicação percorrem caminhos múltiplos até serem recebidos pelo receptor. No receptor, o sinal recebido parece ser originário de fontes distribuídas, que abrangem ao longo da propagação, os muitos obstáculos que causam dispersão. O padrão de transmissão resultante de uma dessas fontes distribuídas, oferece oportunidade para se estudar a diversidade no receptor dotado de duas antenas (KAZIMIERZ, 2007). Os sinais que chegam no receptor, nas antenas A e B, podem exibir variação significativa das suas magnitudes, conforme observado na Figura 32. Assim, dependendo da frequência de operação, duas antenas separadas adequadamente, receberão sinais em níveis diferentes de potência.

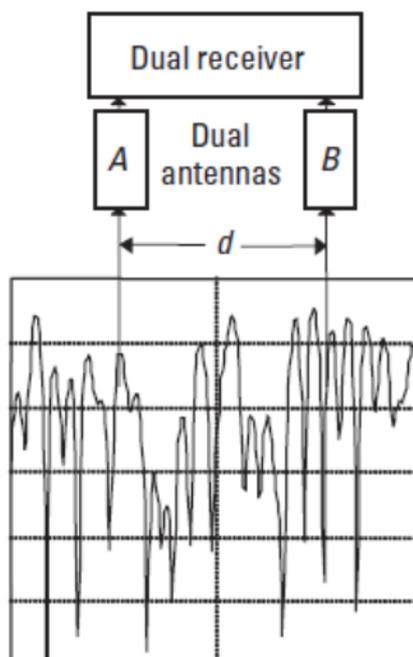


Figura 32 O sinal em receptor duplo a partir de um ambiente multi-caminhos (KAZIMIERZ, 2007)

Uma simulação de ganho de diversidade na recepção pode ser realizada a partir do coeficiente de correlação dos sinais recebidos por duas antenas. Essa função de correlação ρ_e entre amostras de sinal recebido por duas antenas separadas por d , pode ser expressa como (W. C. Jakes, 1974):

$$\rho_e = J_0^2\left(k \cdot \frac{d \cdot s}{r}\right) \cdot J_0^2\left(\frac{k}{2} \cdot \left(\frac{s}{r}\right)^2 \cdot d\right) \quad (10)$$

Onde:

J_0 é a função de Bessel de ordem zero;

$K = 2\pi/\lambda$ é o número de onda, onde o comprimento de onda é $\lambda = c/f$;

r é a distância dos sinais recebidos desde uma fonte emissora;

s é o raio do círculo de espalhamento dos sinais transmitidos na unidade receptora.

Uma vez que ρ_e representa a potência do sinal correspondente às componentes do sinal de amplitude correlacionada, então $1 - \rho_e$ é a potência de sinal não correlacionada. A variação média do sinal, ou ganho de diversidade, a partir de sinais recebidos pelas duas antenas pode então ser expressa como:

$$S = 20 \log\left(1 + \sqrt{1 - \rho_e}\right) \quad (11)$$

A Figura 33 mostra os resultados de uma simulação do modelo analítico, especificamente, o ganho de diversidade obtido com duas antenas para sinais recebidos a uma distância de $r = 300$ m, iluminando um $s = 30$ m de raio de espalhamento, com número de onda k avaliado na frequência de interesse, para uma RSSFI de 2,45 GHz. Este resultado é comparado com uma simulação na faixa de 900 MHz, considerando-se as mesmas especificações anteriores.

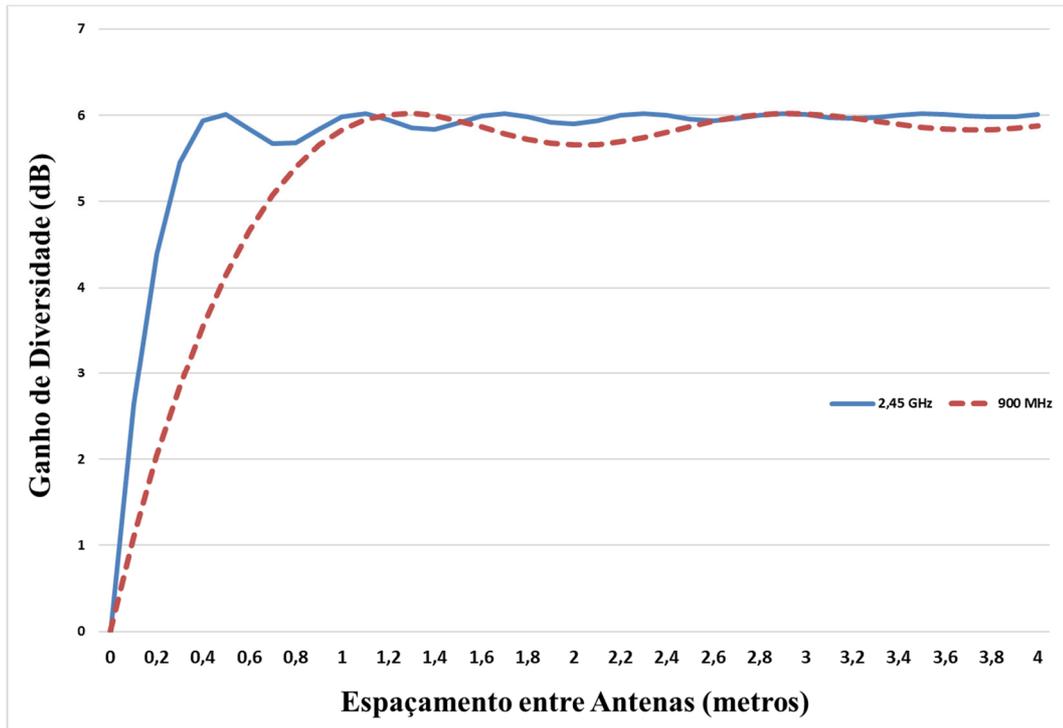


Figura 33 Simulação analítica do ganho de diversidade na recepção com duas antenas em relação ao espaçamento entre elas.

Para os valores simulados, a variação média do sinal aumenta de 0 dB para antenas coincidentes para um valor limite de 6,02 dB para espaçamento de antenas maiores que 0,1 m, com um valor oscilatório, rapidamente convergente. Essa variação de sinal é a oportunidade para a melhoria da qualidade do enlace de rádio utilizando diversidade de antena. Observa-se também, que quanto maior for a frequência menor será o espaçamento necessário entre as antenas para se atingir o valor máximo. Isto ocorre porque quanto maior for a frequência do sinal, menor será o comprimento de onda, maior será o deslocamento da onda até o receptor, e, deste modo, o desvanecimento não correlacionado dos sinais recebidos pelas duas antenas aumenta, isto é, diminui a probabilidade de que as duas antenas estejam sob o mesmo tipo de desvanecimento ao mesmo tempo. Assim, o espaçamento entre as duas antenas fica menor com o aumento da frequência.

5.2 CORRELAÇÃO ENTRE ANTENAS

Um resultado semelhante pode ser encontrado a partir do coeficiente de correlação dos sinais recebidos por duas antenas em função do espaçamento e ângulo de orientação entre elas. O modelo analítico que representa esta relação está expresso na equação 12, onde a é o ângulo de orientação das antenas (KAZIMIERZ, 2007), (W. C. Jakes, 1974):

$$\rho_e = J_0^2\left(k \cdot \frac{d \cdot s}{r} - \text{sen}(a)\right) J_0^2\left(\frac{k \cdot d}{2} \cdot \left(\frac{s}{r}\right)^2 \cdot \sqrt{1 - \frac{3}{4} \cos(a)}\right) \quad (12)$$

Uma simulação do Coeficiente de correlação em função do espaçamento e ângulo de orientação entre as antenas pode ser visto na Figura 34.

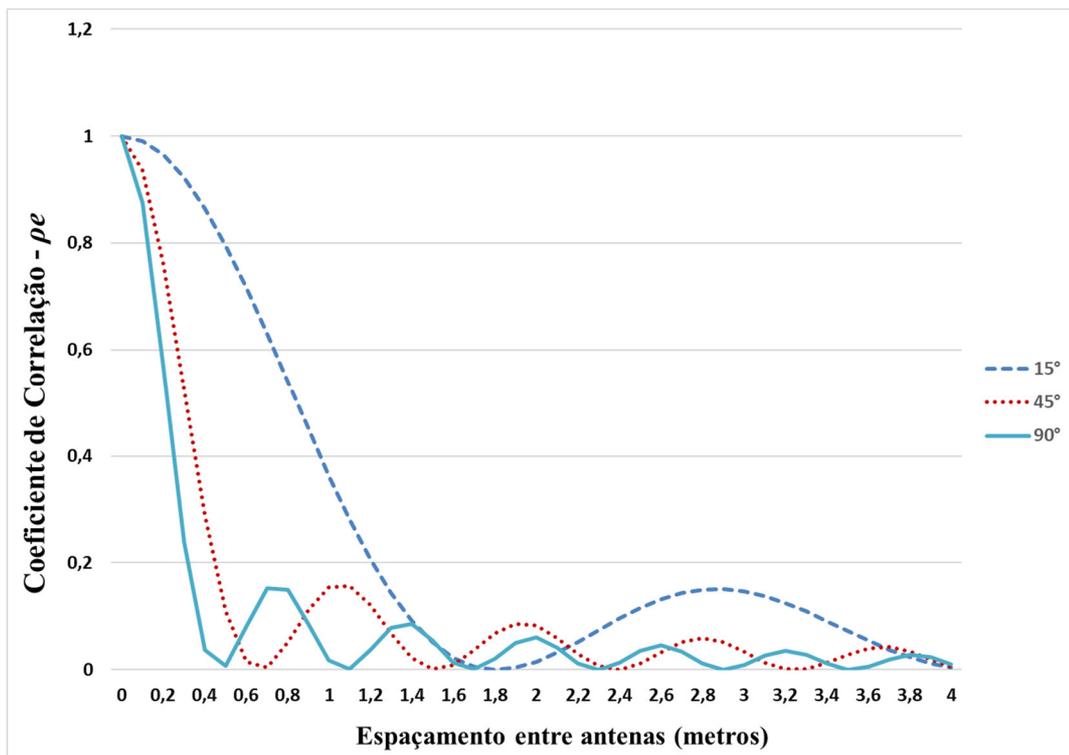


Figura 34 Simulação do Coeficiente de correlação com duas antenas em relação ao espaçamento e ângulo de orientação entre as antenas.

Nesta figura são mostrados os resultados obtidos da simulação do modelo analítico, especificamente, o coeficiente de correlação obtido com duas antenas para sinais recebidos de um dispositivo a uma distância de $r = 300$ m, iluminando um $s = 30$ m de raio de espalhamento, com número de onda k avaliado na frequência de interesse, de uma RSSFI na faixa de 2,45

GHz. Os resultados da simulação mostram que, quanto maior o ângulo de orientação entre as antenas, menor será o coeficiente de correlação. Ou seja, o coeficiente de não correlação dos sinais recebidos pelas duas antenas aumenta, isto é, é pequena a probabilidade de que as duas antenas estejam sob o mesmo tipo de desvanecimento ao mesmo tempo. Deste modo, como pode ser visto na Figura 35, considerando um valor de espaçamento entre antenas menor que 1,2 metros, o ganho de diversidade será maior, para um ângulo de orientação entre antenas igual a 90° . Ao contrário, o ganho de diversidade será menor para ângulo de orientação entre antenas menor que 90° . Para espaçamento entre antenas maior ou igual a 1,2 metros a mudança no ângulo de orientação das antenas manterá o ganho de diversidade constante em aproximadamente 6 dB.

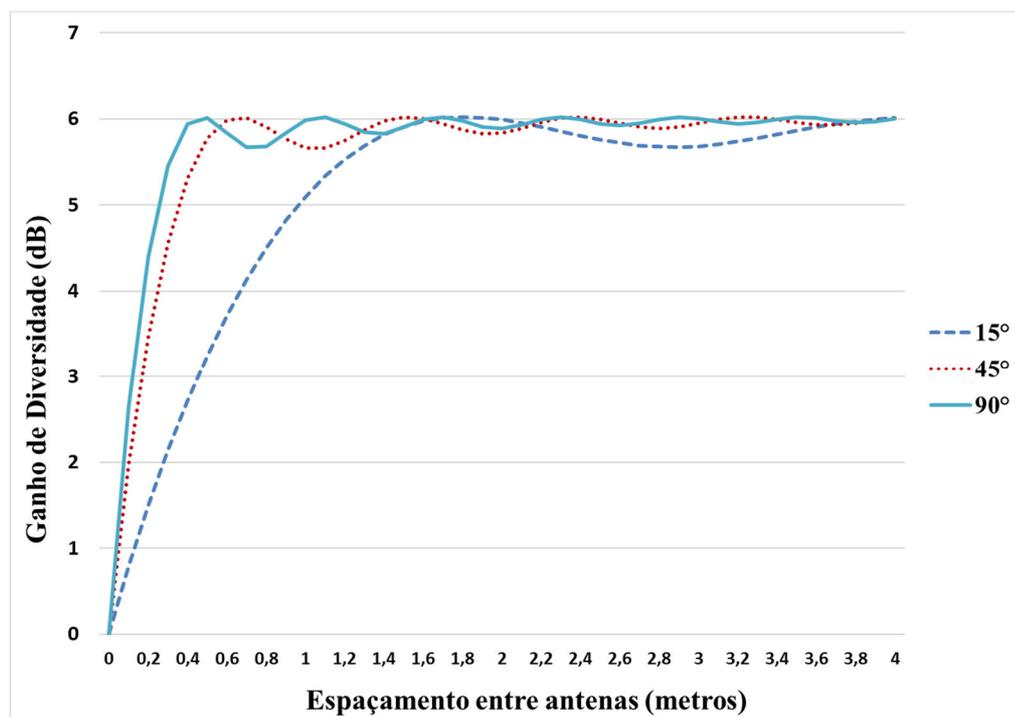


Figura 35 Simulação do Ganho de Diversidade com duas antenas com relação ao espaçamento e ângulo de orientação entre as antenas.

6 ESTUDO DE CASO

6.1 TESTE DE GANHO DE DIVERSIDADE EM UMA RSSFI

A Figura 36 demonstra o cenário de teste utilizado para o estudo de caso dos transceptores de RF com diversidade de antena, onde foi implementada uma rede WH composta por quatro transceptores de RF sem diversidade e dois com de diversidade de antena, os TAG 1008_DIV ANT e TAG 1016_DIV ANT, formando uma rede com 6 nodos além do gateway.

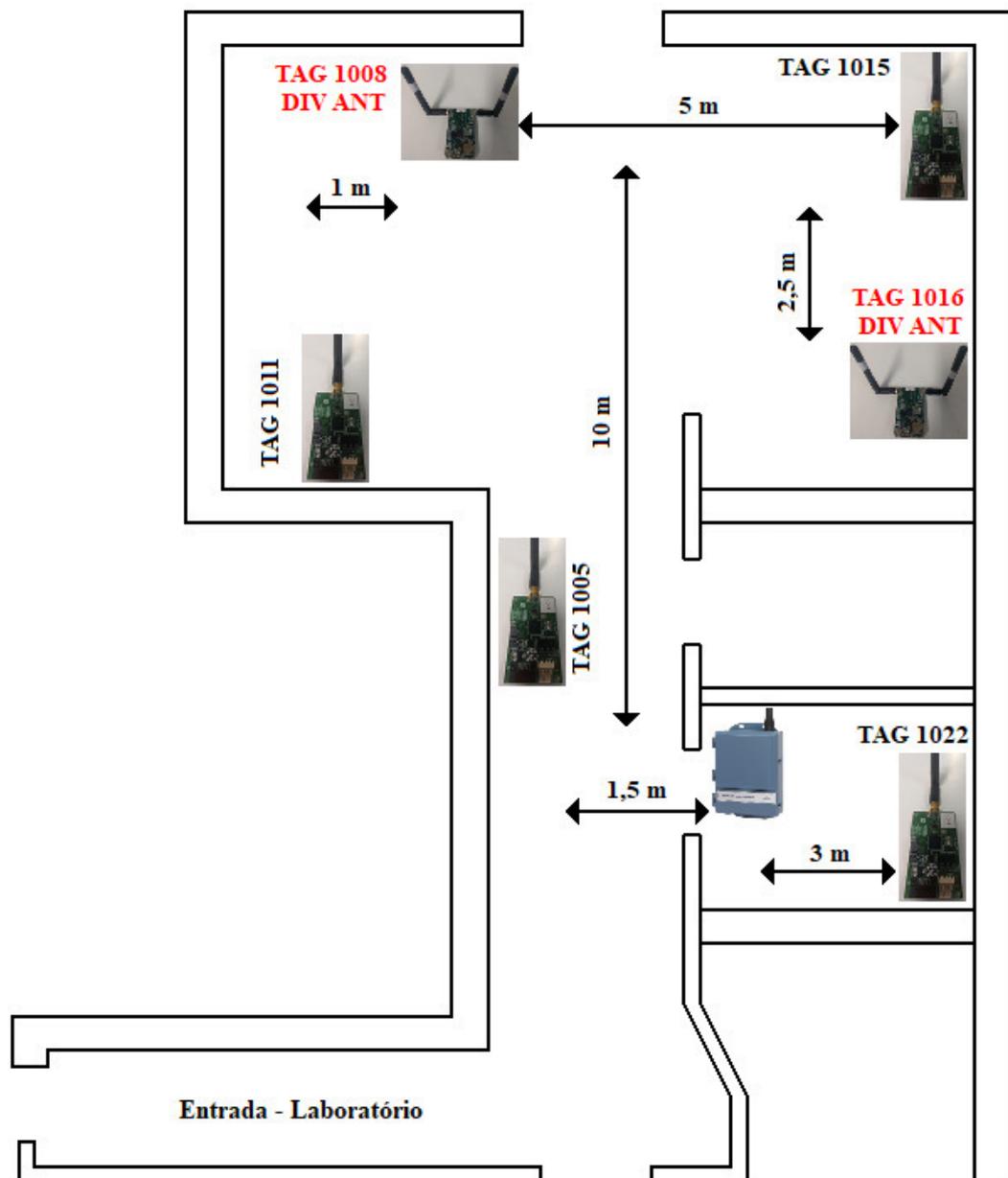


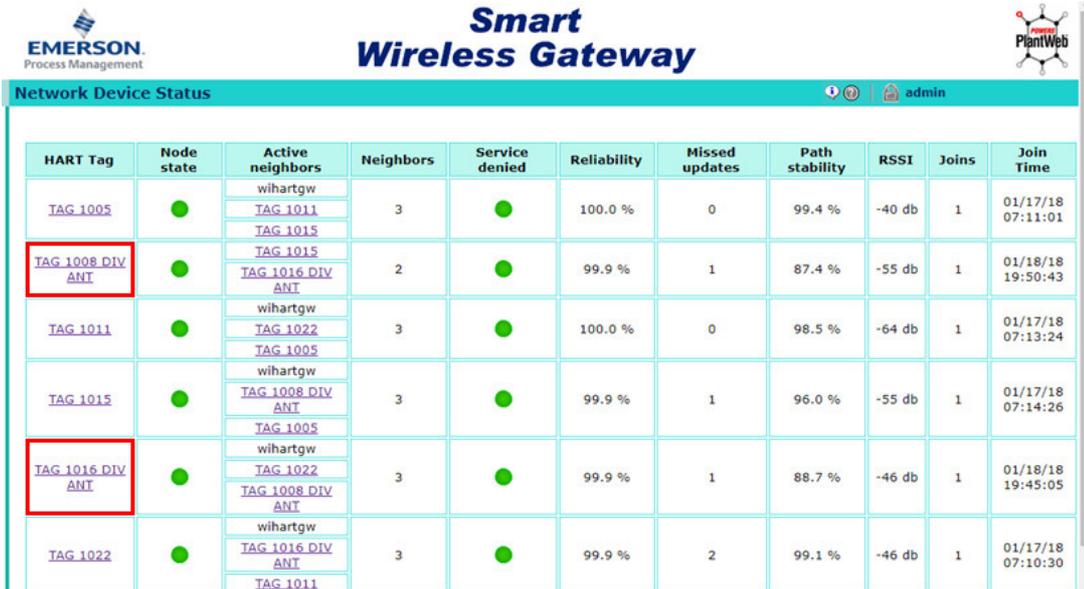
Figura 36 Localização dos transceptores no cenário de teste

Seguem abaixo os parâmetros utilizados no cenário de estudo:

- O espaçamento entre as antenas dos dois transceptores de RF com diversidade é de 0,1 metros;
- Os dispositivos foram distribuídos em uma área com um raio de aproximadamente 6 metros;
- O tempo de duração das coletas de dados foram de aproximadamente 24 horas;
- A potência de transmissão dos transceptores foi ajustada para 10 dBm;
- O tempo de publicação da variável de processo associada aos dispositivos de campo foi ajustado para 60 segundos;
- O mecanismo de CCA da rede WH manteve-se na configuração padrão, ou seja, não habilitado.

A rede implementada através do gerenciador de rede Emerson 1420 e a rede formada para análise dos dados coletados, podem ser vistos nas Figuras 37 e 38, respectivamente.

Primeiramente, observou-se nos dois transceptores de RF com o algoritmo de diversidade de antena, a comunicação em rede, a formação de vizinhos com outros elementos da rede (Rádio Id) e a recepção de pacotes de dados.



HART Tag	Node state	Active neighbors	Neighbors	Service denied	Reliability	Missed updates	Path stability	RSSI	Joins	Join Time
TAG 1005	●	wihartgw TAG 1011 TAG 1015	3	●	100.0 %	0	99.4 %	-40 db	1	01/17/18 07:11:01
TAG 1008 DIV ANT	●	TAG 1015 TAG 1016 DIV ANT	2	●	99.9 %	1	87.4 %	-55 db	1	01/18/18 19:50:43
TAG 1011	●	wihartgw TAG 1022 TAG 1005	3	●	100.0 %	0	98.5 %	-64 db	1	01/17/18 07:13:24
TAG 1015	●	wihartgw TAG 1008 DIV ANT TAG 1005	3	●	99.9 %	1	96.0 %	-55 db	1	01/17/18 07:14:26
TAG 1016 DIV ANT	●	wihartgw TAG 1022 TAG 1008 DIV ANT	3	●	99.9 %	1	88.7 %	-46 db	1	01/18/18 19:45:05
TAG 1022	●	wihartgw TAG 1016 DIV ANT TAG 1011	3	●	99.9 %	2	99.1 %	-46 db	1	01/17/18 07:10:30

Figura 37 Transceptores de RF com diversidade de antena se comunicando com os outros elementos da rede.

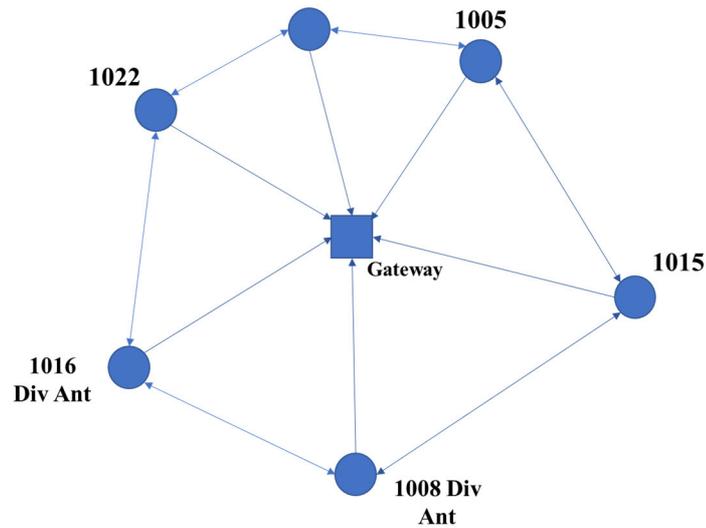


Figura 38 Rede formada para análise dos dados coletados.

Em seguida, verificou-se via depuração serial, a eficiência do algoritmo de diversidade de antena, dos transceptores TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT dentro da rede tipo malha, de modo, que o algoritmo venha a selecionar a antena com o melhor sinal de LQI. Os dados coletados são mostrados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 Dados recebidos pelo TAG 1008 DIV ANT.

Rádio Id	Msg RX	Ant 1	Ant 2
Gateway	911	404	507
TAG 1011	135	71	64
TAG 1015	1258	650	608
TAG 1022	103	53	50
TAG 1005	152	64	96
Total de Msg RX	2559		

Tabela 10 Dados recebidos pelo TAG 1016 DIV ANT.

Rádio Id	Msg RX	Ant 1	Ant 2
Gateway	445	173	272
TAG 1011	58	24	34
TAG 1015	49	19	30
TAG 1022	480	178	302
TAG 1005	101	40	71
Total de Msg RX	1133		

Os resultados mostraram que o TAG 1008 DIV ANT recebeu um total de 2559 pacotes de dados, de todos os elementos da rede, sendo que, 911 recebidos pelo gateway. Com o gateway, a Antena 1 foi selecionada 404 vezes com melhor sinal de LQI em relação a Antena 2 e a Antena 2 foi selecionada 507 vezes com melhor sinal de LQI em relação a Antena 1.

Já o transceptor TAG 1016 DIV ANT recebeu um total de 1133 pacotes de dados, de todos os elementos da rede, sendo que, 445 recebidos pelo gateway. A Antena 1 foi selecionada 173 vezes com melhor sinal de LQI em relação a Antena 2 e a Antena 2 foi selecionada 272 vezes com melhor sinal de LQI em relação a Antena 1.

Deste modo, o LQI On médio (LQI médio de todos os pacotes recebidos pela antena 1 ou 2 selecionada com melhor sinal) e o LQI Off médio (LQI médio de todos os pacotes recebidos pela antena 1 ou 2 não selecionada com pior sinal) obtidos pelos transceptores TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT para cada elemento da rede pode ser calculado, conforme os gráficos das Figuras 39 e 40.

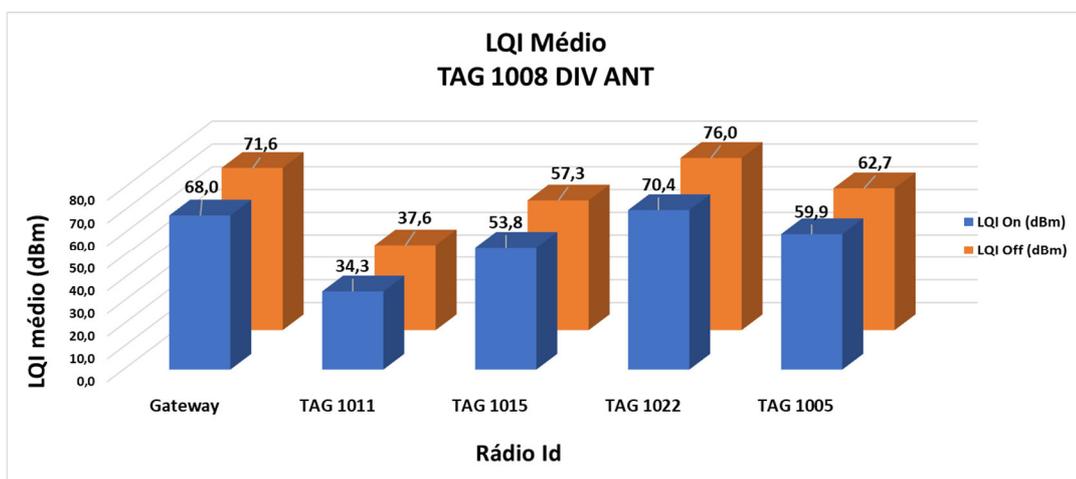


Figura 39 LQI On e LQI Off médios, de todos os pacotes recebidos pelo transceptor TAG 1008 DIV ANT de cada Rádio Id da rede.

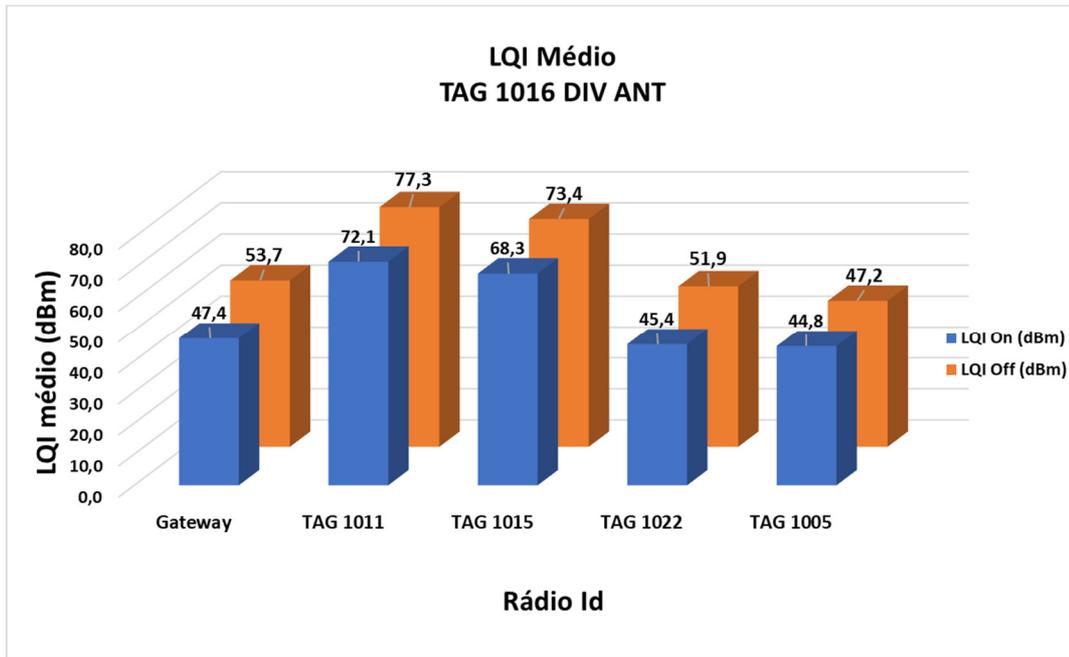


Figura 40 LQI On e LQI Off médios, de todos os pacotes recebidos pelo transceptor TAG 1016 DIV ANT de cada Rádio Id da rede.

Desta maneira, o ganho de diversidade obtido pelos transceptores TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT para cada elemento da rede, também pode ser calculado, conforme os gráficos das Figuras 41 e 42.

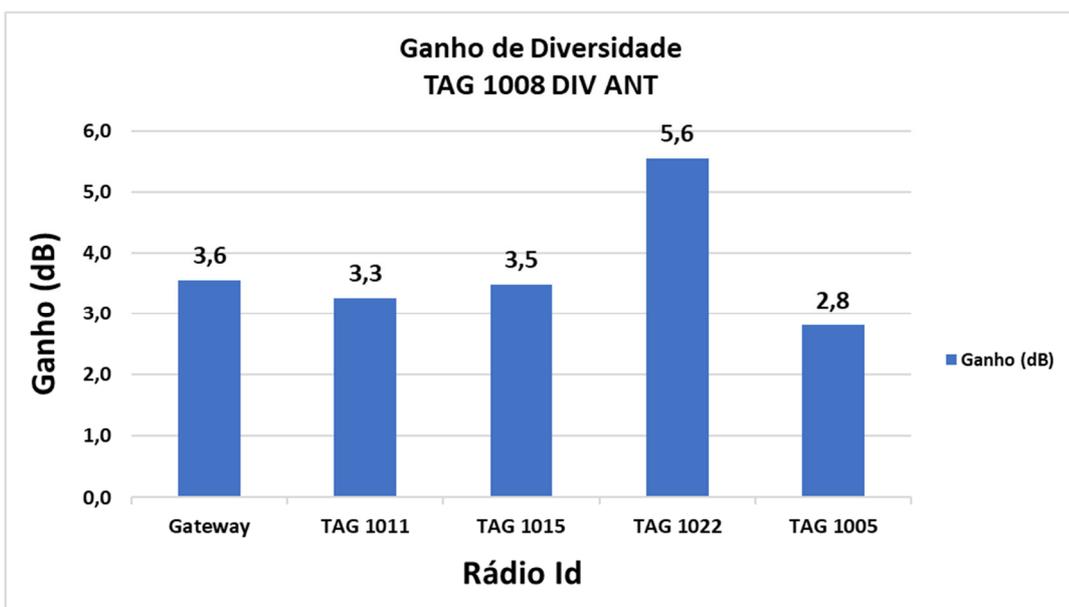


Figura 41 Ganho de diversidade obtido pelo transceptor TAG 1008 DIV ANT.

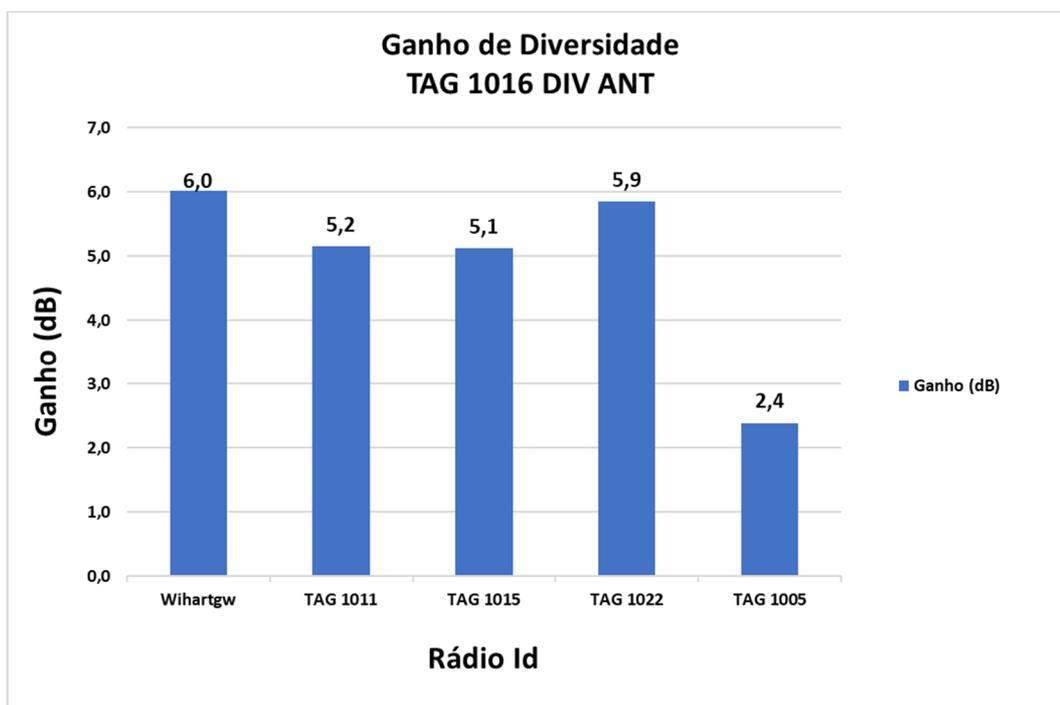


Figura 42 Ganho de diversidade obtido pelo transceptor TAG 1016 DIV ANT.

Pode-se observar, pelos gráficos das Figuras 41 e 42, que ambos transceptores TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT obtiveram ganho de diversidade dos sinais recebidos de todos os elementos da rede (Rádios Id).

O TAG 1008 DIV ANT obteve maior ganho de diversidade através dos sinais transmitidos pelo Rádio Id TAG 1022, já o TAG 1016 DIV ANT obteve maior ganho de diversidade através dos sinais transmitidos pelo gateway e também pelo TAG 1022, caracterizando um ambiente mais dinâmico, onde os níveis de sinal recebidos nas duas antenas dos transceptores com diversidade estão fortemente não correlacionadas, ou seja, o algoritmo de diversidade de antena atuou melhorando o desempenho quando comparado à seleção estática com apenas uma antena ideal.

6.1.1 Análise comparativa

Com o objetivo de verificar a relação do algoritmo de diversidade com as simulações apresentadas na seção 5 deste trabalho, foi realizada uma análise comparativa entre o ganho de diversidade obtido pelos transceptores TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT,

apresentados nas Figuras 41 e 42, respectivamente, e as simulações do ganho de diversidade com duas antenas. Os dados da distância entre transceptores r , raio de espalhamento s e afastamento entre antenas d para realizar as simulações, foram obtidos através dos parâmetros do cenário de teste da Figura 36. Os dados da distância entre transceptores e afastamento entre antenas são valores conhecidos. Por outro lado, os raios de espalhamento são valores que podem variar dependendo do arranjo dos transceptores em cada cenário de teste. Em algumas situações este raio de espalhamento fica bem definido. Em outras podem haver incertezas. Então, estimativas destes valores usando o bom senso, devem ser efetuadas.

Usando este critério, uma análise comparativa entre ganho de diversidade e as simulações de correlações espaciais para os TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT pode ser realizada, conforme as Figura 43 e 44.

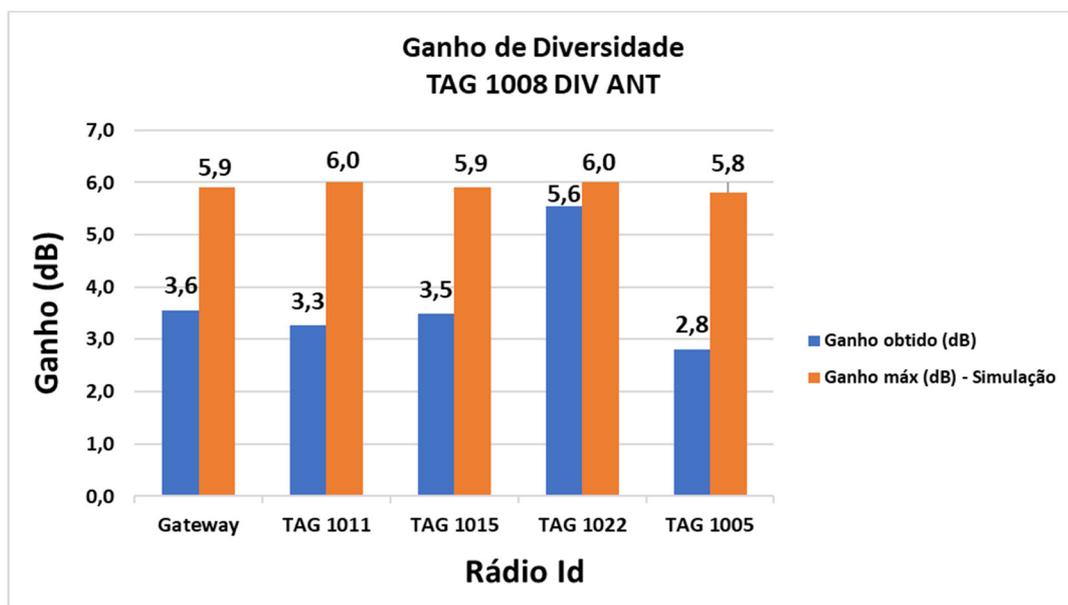


Figura 43 Análise comparativa entre Ganho obtido e Ganho máximo simulado para o transceptor TAG 1008 DIV ANT.

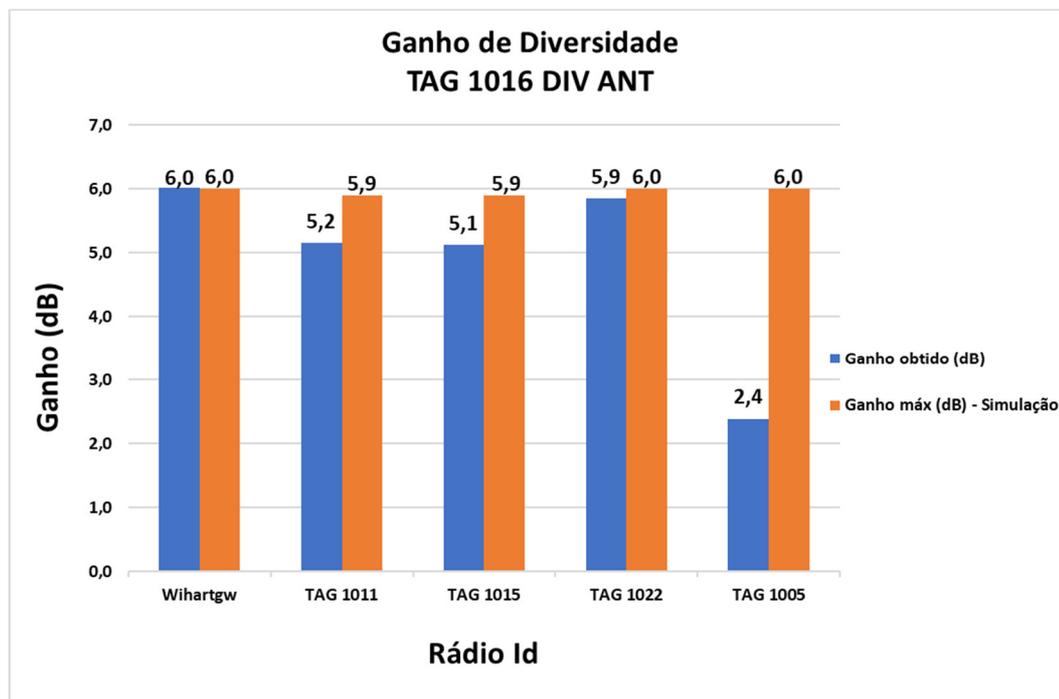


Figura 44 Análise comparativa entre Ganho obtido e Ganho máximo simulado para o transceptor TAG 1016 DIV ANT.

Pela análise comparativa, pode-se observar, pelo gráfico da Figura 43, que o transceptor TAG 1008 DIV ANT obteve ganho de diversidade próximo ao ganho máximo simulado, apenas para os sinais transmitidos pelo TAG 1022 (observe que, a distância entre estes dois TAGs é a maior nestes testes). Já pelo gráfico da Figura 44, o TAG 1016 DIV ANT obteve ganho de diversidade próximo ao ganho máximo simulado, através dos sinais transmitidos pelo gateway e também pelo TAG 1022 (Observe pela Fig. 36, que isto pode ser atribuído à uma distribuição mais simétrica). De uma maneira geral, observou-se também nas simulações, que devido à alta frequência dos canais *WirelessHart* ($f = 2,4$ GHz) e o pequeno afastamento definido entre as antenas ($d = 0,1$ m), o ganho de diversidade dependerá do raio de espalhamento s . Verifica-se que quanto maior o raio de espalhamento maior o ganho de diversidade.

6.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO

6.2.1 Análise de desempenho do transceptor de RF sem diversidade de antena

Para o teste de análise de desempenho dos transceptores de RF sem diversidade de antena foi montada uma rede WH tipo malha, conforme mostrado na Figura 45 e o algoritmo de diversidade de antena foi desabilitado de modo a habilitar uma das antenas somente.

HART Tag	Node state	Active neighbors	Neighbors
TAG 1005	●	wihartgw TAG 1011 TAG 1022	3
TAG 1008 DIV ANT	●	wihartgw TAG 1022 TAG 1016 DIV ANT	3
TAG 1011	●	wihartgw TAG 1005 TAG 1016 DIV ANT	3
TAG 1015	●	wihartgw TAG 1016 DIV ANT	2
TAG 1016 DIV ANT	●	wihartgw TAG 1011 TAG 1015 TAG 1008 DIV ANT	4
TAG 1022	●	wihartgw TAG 1005 TAG 1008 DIV ANT	3

Figura 45 Rede WH montada para análise de desempenho dos transceptores de RF sem diversidade de antena.

Como ferramenta de análise, foi utilizado “*Software para Análise de Dispositivos WH*” desenvolvido por (WINTER, et al., 2011). Este software é capaz de obter informações relacionadas ao comportamento da rede WH e aos status dos dispositivos. Isto inclui, por exemplo, a análise dos dispositivos que estão na rede, topologia da rede e links entre os dispositivos. O software é executado em um computador, que deve estar na mesma rede IP (*Internet Protocol* – Protocolo de Internet) do gateway, e que utiliza o protocolo HART-sobre-UDP para se comunicar com o gerenciador de rede WH. A aplicação é baseada em comandos HART, que são utilizados para obter os dados desejados a respeito da rede. Os comandos são

encapsulados no padrão UDP e enviados através do gateway, aos dispositivos de campo, que respondem as requisições (MACHADO, 2014). Deste modo, o software identifica os dispositivos conectados na rede WH e envia uma requisição periódica de dados. Neste experimento, foi utilizada a requisição e resposta ao comando 780, *Report Neighbor Health List* (HCF, 2008).

Através deste comando são coletados periodicamente os seguintes dados:

- *Nickname*: Número de dispositivos vizinhos (dispositivos com conexão com o dispositivo alvo);
- nTX: Número de pacotes de dados transmitidos para cada dispositivo vizinho;
- nRX: Número de pacotes recebidos de cada dispositivo vizinho;
- nTXfault: Número de pacotes que falharam, ou seja, foram transmitidos e não receberam confirmação de recebimento;
- RSL: Intensidade de sinal entre cada dispositivo vizinho.

Os dados obtidos são apresentados na interface do software, vide Figura 46, e ainda registrados em uma planilha Excel para posterior análise, vide Figura 47. Para fins de análise, devido a necessidade do experimento, o software foi modificado para incluir o registro do parâmetro nTXfault na planilha do Excel, pois sem o registro deste parâmetro, não há como coletar as informações necessárias para o experimento.

```

*****SOFTWARE PARA ANALISE DE DISPOSITIVOS WIRELESSHART*****
Conectando com 192.168.1.105... > > > > conectado!!

Verificando dispositivos na rede... ok

Numero de nos: 6

Endereco dos nos:

f982001011
f982001005
f982001015
f982001022
f98200aa32
f98200aa31

Enviando 780
Listando Nos ...
Buscando vizinho ... Addr f982001011 NickName: 2
  Nickname 1: (RSL -82, Flags: 1, nTX: 17115, nRX: 8888, nTXfault 3008)
  Nickname 6: (RSL -75, Flags: 0, nTX: 1234, nRX: 12991, nTXfault 74)
  Nickname 5: (RSL -72, Flags: 1, nTX: 6339, nRX: 2204, nTXfault 251)
Buscando vizinho ... Addr f982001005 NickName: 3
  Nickname 1: (RSL -51, Flags: 1, nTX: 16722, nRX: 8411, nTXfault 30)
  Nickname 4: (RSL -71, Flags: 0, nTX: 358, nRX: 8791, nTXfault 0)
  Nickname 5: (RSL -53, Flags: 0, nTX: 902, nRX: 5698, nTXfault 2)
Buscando vizinho ... Addr f982001015 NickName: 4
  Nickname 1: (RSL -87, Flags: 1, nTX: 11937, nRX: 12188, nTXfault 1973)
  Nickname 3: (RSL -75, Flags: 1, nTX: 7391, nRX: 6199, nTXfault 247)
  Nickname 7: (RSL -83, Flags: 0, nTX: 5094, nRX: 8498, nTXfault 446)
Buscando vizinho ... Addr f982001022 NickName: 5
  Nickname 1: (RSL -57, Flags: 1, nTX: 10994, nRX: 8372, nTXfault 104)
  Nickname 3: (RSL -58, Flags: 1, nTX: 5083, nRX: 7355, nTXfault 11)
  Nickname 2: (RSL -76, Flags: 0, nTX: 721, nRX: 7170, nTXfault 8)
Buscando vizinho ... Addr f98200aa32 NickName: 6
  Nickname 2: (RSL -37, Flags: 1, nTX: 9841, nRX: 7567, nTXfault 465)
  Nickname 7: (RSL -76, Flags: 0, nTX: 2291, nRX: 6037, nTXfault 110)
Buscando vizinho ... Addr f98200aa31 NickName: 7
  Nickname 4: (RSL -45, Flags: 1, nTX: 8287, nRX: 9591, nTXfault 620)
  Nickname 6: (RSL -80, Flags: 1, nTX: 6533, nRX: 4808, nTXfault 491)

```

Figura 46 Dados obtidos na interface do software.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Date	Hour	Nickname from	Nickname destination	RSL	Packets transmitted	Packets received	nTXfault	Neighbor	Ciclo	
2	14/03/2018	18:25:32	2	1	-83	6761	13789	1361	1	0	
3	14/03/2018	18:25:32	2	6	-66	11	113	0	0	0	
4	14/03/2018	18:25:32	2	3	-73	4966	5270	161	1	0	
5	14/03/2018	18:25:41	3	1	-51	8285	16689	42	1	0	
6	14/03/2018	18:25:41	3	5	-50	480	6813	1	0	0	
7	14/03/2018	18:25:41	3	2	-73	680	5653	1	0	0	
8	14/03/2018	18:25:51	5	1	-53	6638	8524	34	1	0	
9	14/03/2018	18:25:51	5	3	-54	3938	5340	9	1	0	
10	14/03/2018	18:25:59	6	1	-61	69	1103	20	1	0	
11	14/03/2018	18:25:59	6	4	-7	3	5	0	0	0	
12	14/03/2018	18:25:59	6	7	-8	1	6	0	0	0	
13	14/03/2018	18:25:59	6	2	-42	26	487	12	1	0	
14	14/03/2018	18:26:10	7	1	-55	37	339	5	1	0	
15	14/03/2018	18:26:10	7	6	-29	0	25	0	1	0	
16	14/03/2018	18:26:22	4	1	-83	39	339	7	1	0	
17	14/03/2018	18:26:22	4	6	-88	3	17	0	1	0	
18	14/03/2018	18:26:32	2	1	-83	6763	13830	1361	1	0	
19	14/03/2018	18:26:32	2	6	-67	12	120	0	0	0	
20	14/03/2018	18:26:32	2	3	-73	4967	5290	161	1	0	
21	14/03/2018	18:26:41	3	1	-51	8291	16737	42	1	0	
22	14/03/2018	18:26:41	3	5	-50	480	6821	1	0	0	
23	14/03/2018	18:26:41	3	2	-73	680	5655	1	0	0	

Figura 47 Dados registrados na planilha Excel.

De posse dos dados coletados e registrados na planilha do Excel, obtêm-se a Taxa de Falhas de transmissão, através da razão do número dos pacotes transmitidos que falharam

(nTXfault) pelo número de pacotes de dados transmitidos (nTX) para cada transceptor de RF vizinho. A obtenção da Taxa de Falhas de transmissão tem como finalidade realizar um comparativo de desempenho entre os transceptores de RF com e sem diversidade de antena.

Os resultados da Taxa de Falha de transmissão, para os dois transceptores de RF com o algoritmo de diversidade de antena desabilitado, TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT, são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 Taxa de Falhas TX para o TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT.

Rádio Id	TAG 1016 DIV ANT			TAG 1008 DIV ANT		
	Packets TX	nTXfault	Taxa de falhas TX	Packets TX	nTXfault	Taxa de falhas TX
TAG 1005						
TAG 1011						
TAG 1015	981	113	11,5%			
TAG 1022	17	2	12,9%	1219	742	60,9%
TAG 1016 DIV ANT				938	174	18,5%
TAG 1008 DIV ANT	1417	157	11,1%			

Pela tabela acima, pode-se verificar que o transceptor TAG 1008 DIV ANT é par de transmissões dos vizinhos TAG 1022 e TAG 1016 DIV ANT e o transceptor TAG 1016 DIV ANT é par dos vizinhos TAG 1015, TAG 1022 e TAG 1008 DIV ANT, conforme a Figura 48 apresenta.

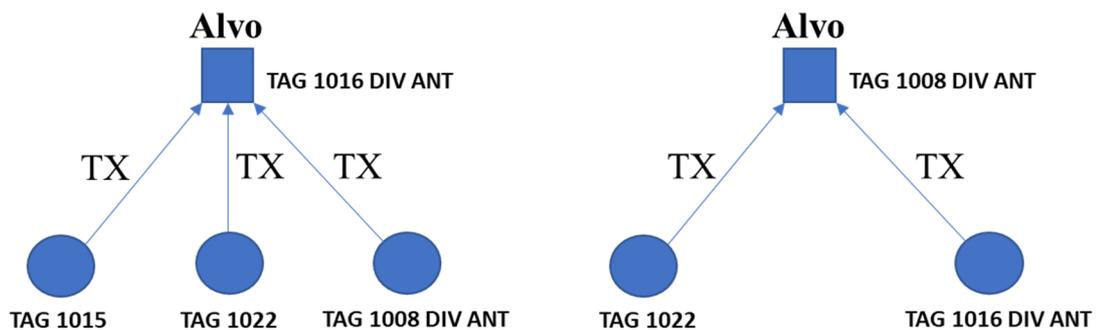


Figura 48 Transceptores TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT pares (alvos), com algoritmo de diversidade de antena desabilitado.

As Figuras 49 e 50 mostram a Taxa de Falhas e a Taxa Média de Falhas de transmissão para os transceptores sem diversidade de antena alvos.

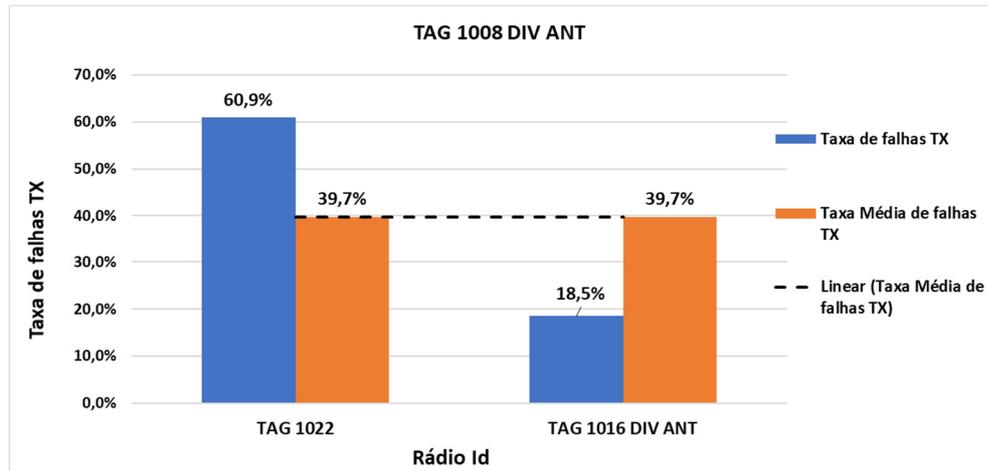


Figura 49 Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o TAG 1008 DIV ANT.

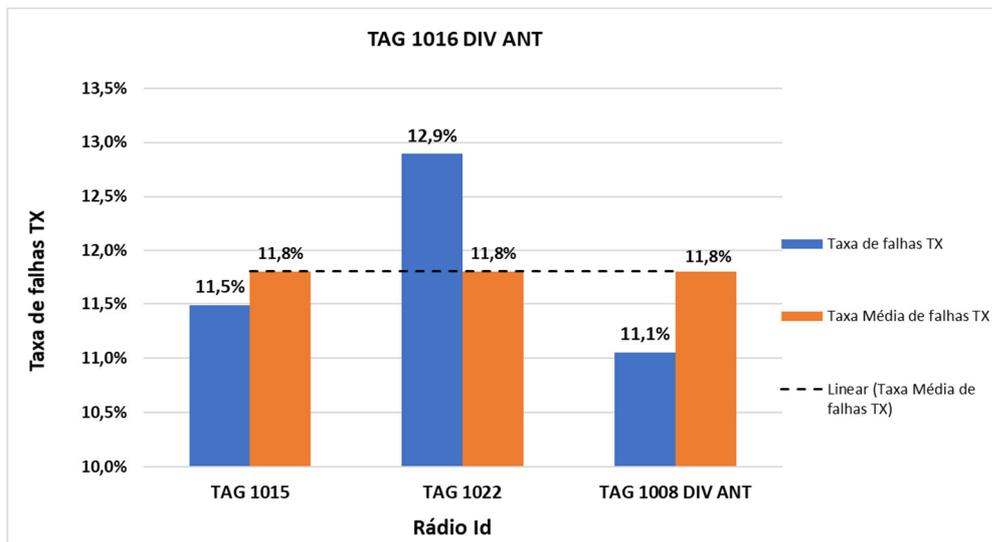


Figura 50 Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o TAG 1016 DIV ANT.

6.2.2 Análise de desempenho do transceptor de RF com diversidade de antena e afastamento entre antenas de 10 cm

Após a etapa de coleta de dados com o algoritmo de diversidade de antena desabilitado nos transceptores com duas antenas, o algoritmo foi novamente habilitado via software. O afastamento inicial entre as antenas dos transceptores é de 10 cm, conforme Figura 51.

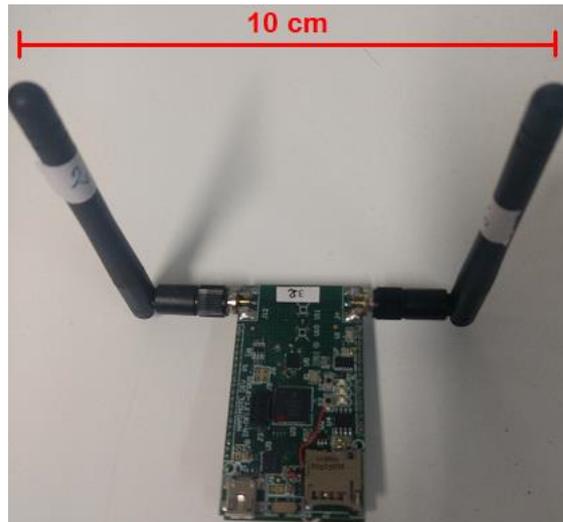


Figura 51 Afastamento entre antenas de 10 cm.

Deste modo, os dados de número de pacotes transmitidos que falharam (nTXfault) e número de pacotes transmitidos, são novamente coletados, e os resultados de Taxa de Falhas de transmissão são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 Taxa de Falhas TX para o TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT.

Rádio Id	TAG 1016 DIV ANT			TAG 1008 DIV ANT		
	Packets TX	nTXfault	Taxa de falhas TX	Packets TX	nTXfault	Taxa de falhas TX
TAG 1005	621	49	7,9%	1118	77	6,8%
TAG 1011						
TAG 1015						
TAG 1022	1262	65	5,2%	1009	48	4,7%
TAG 1016 DIV ANT						
TAG 1008 DIV ANT						

Pela tabela acima, podemos verificar que o transceptor TAG 1008 DIV ANT é par de transmissões dos vizinhos TAG 1015 e TAG 1016 DIV ANT e o transceptor TAG 1016 DIV ANT é par dos vizinhos TAG 1011 e TAG 1008 DIV ANT, conforme a Figura 52 apresenta.

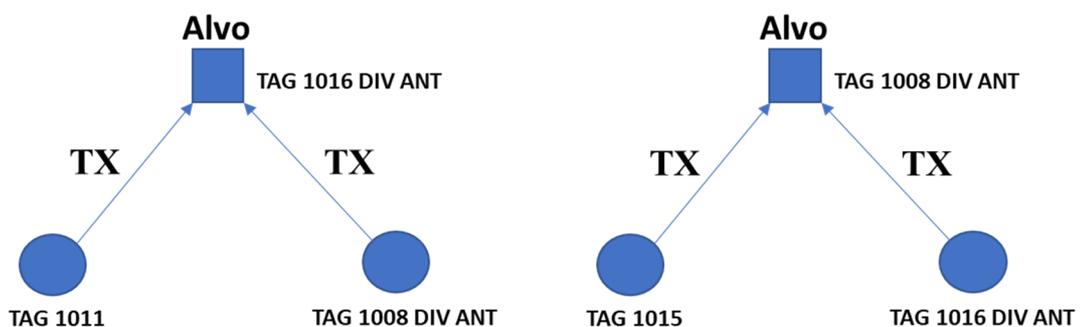


Figura 52 Transceptores TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT pares (alvos), com algoritmo de diversidade de antena habilitado.

As Figuras 53 e 54 mostram a Taxa de Falhas e a Taxa Média de Falhas de transmissão para os transceptores com diversidade de antena alvos.

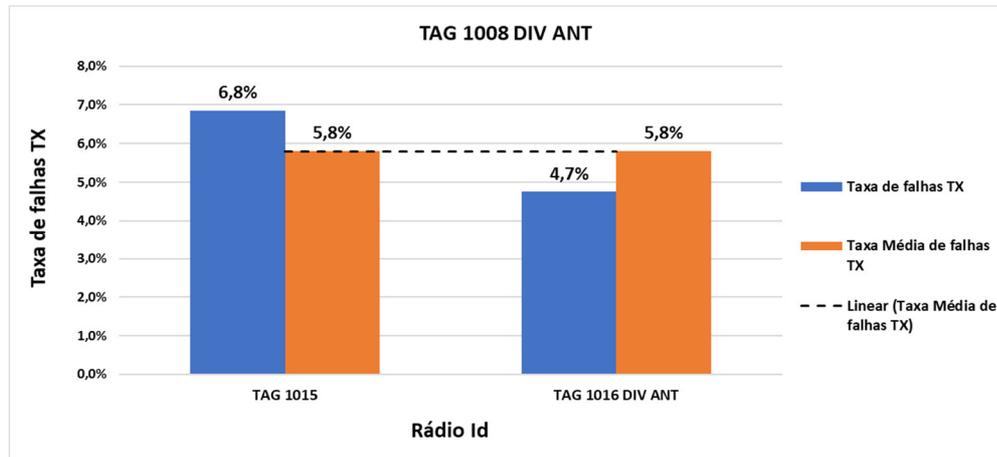


Figura 53 Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o TAG 1008 DIV ANT.

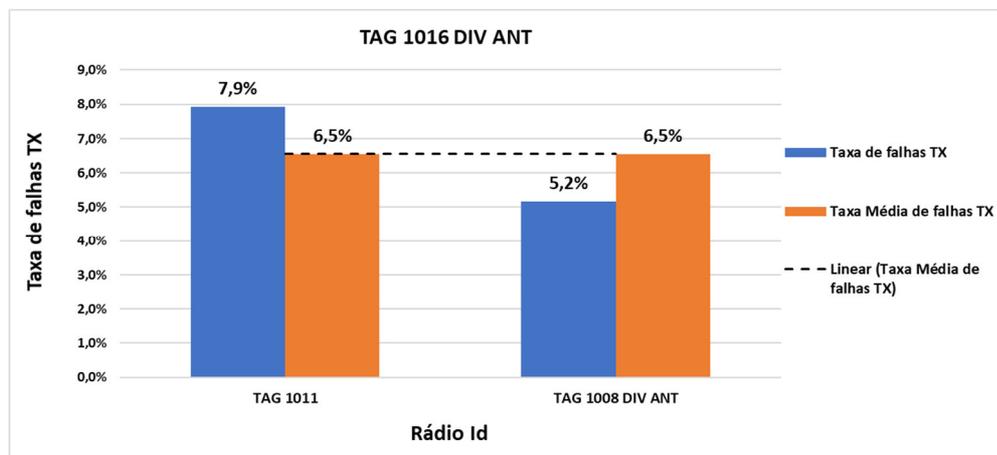


Figura 54 Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o TAG 1016 DIV ANT.

6.2.3 Análise de desempenho do transceptor de RF com diversidade de antena e afastamento entre antenas de 20 cm

Neste experimento, o afastamento entre as antenas dos transceptores TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT é aumentado para 20 cm, conforme Figura 55.

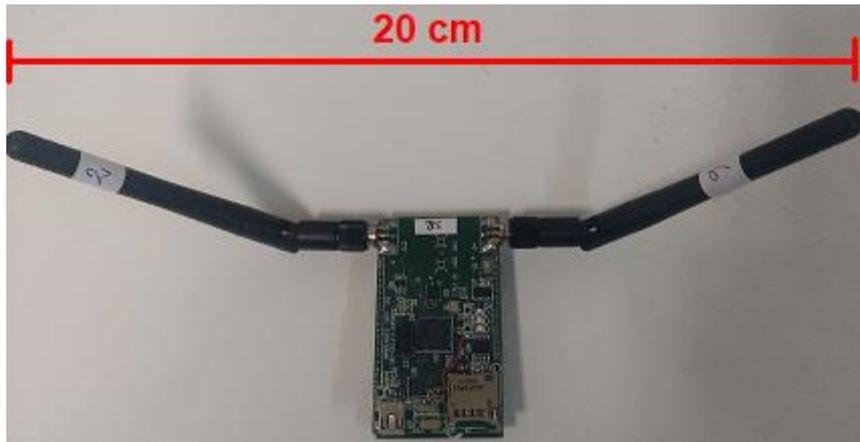


Figura 55 Afastamento entre antenas de 20 cm.

Após, é realizada uma nova coleta de dados, cujos dados podem ser vistos na Tabela 13.

Tabela 13 Taxa de Falhas TX para o TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT.

Rádio Id	TAG 1016 DIV ANT			TAG 1008 DIV ANT		
	Packets TX	nTXfault	Taxa de falha TX	Packets TX	nTXfault	Taxa de falhas TX
TAG 1005	1071	68	6,4%	3699	303	8,2%
TAG 1011						
TAG 1015						
TAG 1022	1912	83	4,4%	1912	83	4,4%
TAG 1016 DIV ANT						
TAG 1008 DIV ANT	4576	289	6,3%			

Pela tabela acima, pode-se verificar que o transceptor TAG 1008 DIV ANT é par de transmissões dos vizinhos TAG 1015 e TAG 1016 DIV ANT e o transceptor TAG 1016 DIV ANT é par dos vizinhos TAG 1011 e TAG 1008 DIV ANT, conforme a Figura 56 apresenta.

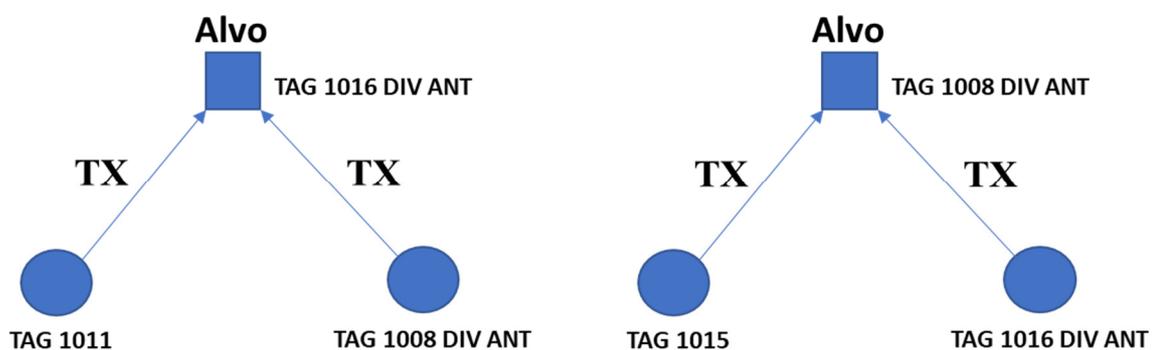


Figura 56 Transceptores TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT pares (alvos), com algoritmo de diversidade de antena habilitado.

As Figuras 57 e 58 mostram a Taxa de Falhas e a Taxa Média de Falhas de transmissão para os transceptores com diversidade de antena alvos.

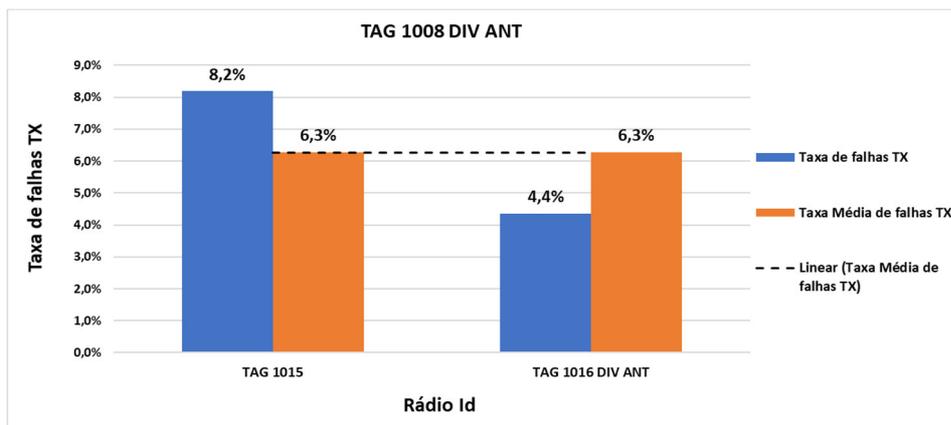


Figura 57 Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o TAG 1008 DIV ANT.

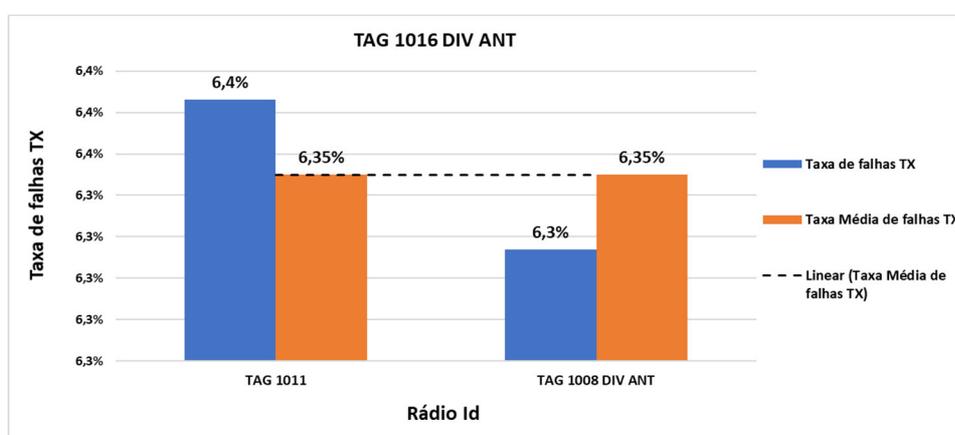


Figura 58 Taxa de Falhas e Taxa Média de Falhas TX para o TAG 1016 DIV ANT.

6.2.4 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Observa-se, primeiramente, que na análise de desempenho dos transceptores sem diversidade, que o TAG 1008 DIV ANT apresentou a maior Taxa Média de falhas na transmissão, em relação ao TAG 1016 DIV ANT. Isso deve-se ao fato (considerando-se as análises um processo estocástico) do transceptor estar geograficamente mais afastado do par de transmissões TAG 1022, também devido a obstáculos (passagem de pessoas) ver Figura 36 e coexistência da rede WH.

Pelos resultados verificou-se também, que os transceptores TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT, com o algoritmo de diversidade de antena habilitado durante a análise de desempenho, apresentaram uma redução considerável na Taxa Média de Falhas na transmissão

em relação a eles mesmos quando atuando com algoritmo de diversidade de antena desabilitado. Os resultados mostraram uma redução na Taxa Média de Falhas na transmissão de 33,9% para o TAG 1008 DIV ANT e 5,3% para o TAG 1016 DIV ANT para o afastamento entre antenas de 10 cm. Nota-se que, com algoritmo de diversidade habilitado, ambos os transceptores TAG 1008 DIV ANT e TAG 1016 DIV ANT obtiveram Taxa Média de falhas menores e equivalentes, comprovando a eficiência do algoritmo de diversidade.

Para o afastamento entre antenas de 20 cm nos transceptores com o algoritmo de diversidade habilitado, os resultados apresentaram redução de 33,4% e 5,5% na Taxa Média de Falhas de transmissão para o TAG 1008 DIV ANT e o TAG 1016 DIV ANT, respectivamente. Um resumo dos resultados pode ser melhor visualizado na Tabela 14.

Tabela 14 Resumo: Taxa Média de Falhas na transmissão.

Taxa Média de falhas na transmissão					
		Afastamento de 10 cm		Afastamento de 20 cm	
	Sem diversidade	Com diversidade	Redução Taxa Média de falhas TX	Com diversidade	Redução Taxa Média de falhas TX
TAG 1008 DIV ANT	39,7%	5,8%	33,9%	6,3%	33,4%
TAG 1016 DIV ANT	11,8%	6,5%	5,3%	6,35%	5,5%

7 CONCLUSÃO

O uso da técnica de diversidade espacial de antena na recepção, melhora consideravelmente a confiabilidade das implementações de redes sem fio. Isto é conseguido sem um grande aumento do custo do transceptor de RF. Em comparação, usar uma maior potência de transmissão (PA) ou pré-amplificação adicional (LNA) durante a recepção acarreta, como consequência, o maior consumo de energia do transceptor, aumentando o consumo da bateria e reduzindo o tempo de carga da mesma.

Como desvantagem, a diversidade de antena eleva o custo do transceptor de RF por necessitar de duas portas de chaveamento de RF e uma antena extra. Por outro lado, o consumo de energia pode ser reduzido, uma vez que a robustez dos enlaces é aumentada. O uso de potência de RF maior, num rádio de uma porta somente, causa não somente o aumento do consumo, como uma ocupação maior do espectro, em termos de magnitude e de distorções que poderão ocorrer. A utilização de um amplificador de baixo ruído (LNA) na recepção, não é, muitas vezes, vantajosa, uma vez que no limite de sensibilidade do rádio o LNA amplifica o ruído do canal, degradando a relação sinal-ruído.

O primeiro experimento, com o algoritmo de diversidade de antena operando em um ambiente de desvanecimento multipercursos dinâmico, forneceu um ganho de diversidade de até 6 dB no desempenho do transceptor (semelhante às simulações de correlações espaciais realizadas neste trabalho), quando comparado com o transceptor de RF sem a diversidade de antena.

No segundo experimento, utilizando a ferramenta de análise de desempenho dos transceptores com diversidade de antena em uma rede real, os resultados mostraram uma redução considerável na Taxa Média de Falhas na transmissão para os transceptores com diversidade, o que corrobora com o experimento anterior, destacando a eficiência da

diversidade espacial de antenas na recepção, proporcionando assim, maior confiabilidade à rede.

Para ambos os experimentos, é possível aumentar ainda mais o desempenho com a diversidade espacial de antena na recepção, uma vez que a separação espacial entre as antenas foi a mínima recomendada, em função de limitações físicas. Espera-se, que os transceptores de RF com maior separação espacial entre as antenas, possam aumentar ainda mais o ganho de diversidade, e como consequência, uma redução ainda maior na Taxa Média de Falhas na transmissão.

A diversidade da antena proporciona maior benefício quando as condições do sinal estão próximas dos níveis de sensibilidade mínima. Nesse cenário, a diversidade de antena proporciona um enlace com maior robustez à taxa de erros. Sob condições de sinais mais fortes, a seleção de qualquer antena oferece um bom desempenho de recepção. Nesse contexto, o desempenho da diversidade de antena é tão bom quanto o desempenho sem diversidade antena. Porém, situações adversas, como coexistência e bloqueios temporários no canal de comunicação, justificam a diversidade de antena como técnica acessória.

8 REFERÊNCIAS

ALENCAR, M. S. **Telefonia Celular Digital**. Érica, 2004.

BILGIÇ, Mustafa; YEGIN, Korkut. Diversity Antenna Design for Wireless Alarm Networks. In: Springer Science, 2014. **Proceedings...** New York: Springer, 2014. p. 12.

BURATTI, C. et al. **Sensor Networks with IEEE 802.15.4: Systems Distributed Processing, MAC, and Connectivity**. Springer, 2011. p. 8-15

EMERSON **Process Management, Gateway Smart Wireless**, Folha de dados do produto, Revisão FA, abril de 2013, Disponível em:

<<https://www.emerson.com/documents/automation/smart-wireless-gateway-pt-75812.pdf>>

FERRARI, P. et al. Performance Assessment of a WirelessHART network in a real-world testbed. In: IEEE INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2012, Graz. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2012. p. 953-957.

FREESCALE, **MC 1322X: Advanced ZigBee - Compliant Soc Platform for the 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Standard Reference Manual**, Rev. 1.6. 01/2012.

Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/reference-manual/MC1322xRM.pdf>>

FREESCALE SEMICONDUCTOR, **MC1322x Simple Media Access Controller Demonstration Applications, User's Guide**, Document Number: 22xSMACDAUG Rev. 1.3 09/2011, Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/22xSMACDAUG.pdf>>

GISLASON, Drew. **ZigBee Wireless Networking**. London: Newnes, 2008. p. 427.

HAMDOUN, Safa; RACHEDI, Abderrezak; BENSLIMANE, Abderrahim. Comparative Analysis of RSSI-based Indoor Localization when using Multiple Antennas in Wireless Sensor Networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SELECTED TOPICS IN MOBILE AND WIRELESS NETWORKING, 2013, **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2013. p. 146-151.

HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF SPEC-065, Rev. 1.0**. Austin: HCF 2007. Parte da norma.

HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF SPEC-075, Rev. 1.1**. Austin: HCF, 2008. Parte da norma.

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

HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF SPEC-155, Rev. 1.1**. Austin: HCF, 2008. Parte da norma.

HART COMMUNICATION FOUNDATION. **HCF SPEC-290, Rev. 1.1**. Austin: HCF, 2008. Parte da norma.

HAYKIN, S. **An Introduction to Analog and Digital Communications** - 6th ed., John Wiley & Sons, 2010. p. 227-236

HAYKIN, S.; MOHER, M. **Sistemas Modernos de Comunicações Wireless**. Porto Alegre: Bookman, 2008.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Part 15.4 Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)**. New York: IEEE Computer Society, 2006.

KAZIMIERZ, S.; YASAMAN, B. **Radiowave Propagation and Antennas for Personal Communications** - 3rd ed., Artech House Inc, 2007.

KUSY, B. et al., **Radio Diversity for Reliable Communication in WSNs**. CSIRO ICT Centre, Australia, 2011.

LABIOD, Houda; AFIFI, Hossam; SANTIS, Costantino de. **WiFi Bluetooth ZigBee and WiMax**. Paris: Springer, 2007. p. 327.

LATHI, B. P.; DING, Z. **Modern Digital and Analog Communication Systems** – 4th ed., Oxford University Press, 2010.

MACHADO, Tatiana. **Analisador de Redes WirelessHart com Capacidade de Detecção de Coexistência**. 2014. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MULLER, I; NETTO, J. C.; PEREIRA, C. E. WirelessHart field devices. **Journal IEEE INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT**, [S.1.], v.14, p. 20-25, 2011.

MULLER, I. et al. Development of a WirelessHART Compatible Field Device. In: IEEE INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2010, Austin. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2010. p. 1430-1434.

RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications** – Principles & Practice. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

SEBALD, Johannes; TATI, Divya; KLAUE, Jirka. **Reliable real-time wireless sensor networks using spatial diversity**. In: IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments, 2016. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2016. p. 167-172.

SILICON LABS, **Antenna Diversity with Ezradiopro**. AN379, Silicon Laboratories Inc, Rev. 0.2 2010. Disponível em: <<https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/AN379.pdf>>

TEXAS INSTRUMENTS, **CC2591 2.4-GHz RF Front End**. Texas Instruments Incorporated. March 2008 – Revised September 2014. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2591.pdf>

W. C. JAKES, **Microwave Mobile Communications**, Wiley, New York, 1974.

WEI, L. et. al. Application of antenna diversity technique on Wireless Sensor Network localization. In: IEEE CHINESE CONTROL AND DECISION CONFERENCE, 2010, China. **Proceedings...** New York: IEEE Press, 2010. p. 1412-1416.

WINTER, Jean. **Análise de coexistência em redes WirelessHART**. 2013. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013

WINTER, J. et. al. **WirelessHART Routing Analysis Software**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS COMPUTACIONAIS (SBESC), 2011, Florianópolis. **Anais...** [S.l: s.n.], 2011. p. 96-98.