

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCOS GAUDIE LEY LINDAU

**SOFTWARE DE ANÁLISE DA QUALIDADE DE
COMUNICAÇÃO DE DISPOSITIVOS SEM FIO**

Porto Alegre

2013

MARCOS GAUDIE LEY LINDAU

**SOFTWARE DE ANÁLISE DA QUALIDADE DE COMUNICAÇÃO DE
DISPOSITIVOS SEM FIO**

Projeto de diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira

Porto Alegre

2013

MARCOS GAUDIE LEY LINDAU

**SOFTWARE DE ANÁLISE DA QUALIDADE DE COMUNICAÇÃO DE
DISPOSITIVOS SEM FIO**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira

Prof. Dr. Altamiro Amadeu Susin

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr João Cesar Netto – UFRGS _____

Prof Dr. Ivan Müller – UFRGS _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho, em especial a minha família.

Ao professor Carlos Eduardo Pereira por ter me dado a oportunidade de participar de seu grupo de pesquisa e por ter me orientado, ao pesquisador Ivan Muller em me ajudar e aconselhar no desenvolvimento deste projeto e ao também pesquisador Jean Winter por ter me auxiliado nas tarefas de laboratório.

RESUMO

Nas décadas passadas, os dispositivos utilizados em processos industriais, como sensores e atuadores, foram controlados predominantemente por meio de cabeamento estruturado. Contudo a utilização do cabeamento acarreta em desvantagens muitas vezes custosas e de difícil solução que prejudicam na eficiência do controle dos processos. A frequente manutenção de cabos e conectores e a inviabilização do controle e/ou monitoramento de processos em determinado local da planta industrial são exemplos de problemas relacionados a sistemas deste tipo. Em contraposição, nos dias de hoje, o uso de dispositivos sem fio vem gradualmente crescendo já se tornando realidade no cotidiano da automação industrial, basicamente por se apresentarem como uma solução de mais baixo custo, menor necessidade de manutenção e maior flexibilidade. Precede-se a etapa de instalação e formação de redes sem fio a análise das características do ambiente no qual ele será operante. A interferência de fontes externas ao sistema, seja devido a barreiras físicas ou a ondas de rádios de mesmo espectro de frequência, é um fator prejudicial na robustez e confiabilidade da transmissão e recepção de pacotes. Com o intuito de dimensionar as interferências e diagnosticar qualidade em um dado ambiente criou-se uma ferramenta de baixo custo para análise do desempenho de redes de comunicação sem fio focando no protocolo *WirelessHART* (mais proeminente padrão adotado pela indústria). Núcleo deste trabalho, esta ferramenta de suporte realiza o monitoramento multicanal de redes através da análise da intensidade da qualidade do link, recebido e transmitido, e do recebimento de pacotes, identificando os pontos mais apropriados para colocação dos dispositivos da rede através da utilização de módulos GPS.

Palavras Chave: Redes sem fio de automação industrial, ferramenta para análise de desempenho da rede, protocolo *WirelessHART*.

ABSTRACT

This work introduces a developed application, that is, a low cost site survey system for *WirelessHART* networks deployment. The purposed approach aims to evaluate the performance of an industrial automation network by measuring the quality of the link (LQI) in different frequency channels and the number of received packets. To take the effect of others networks interferences on the LQI analysis, a fast multichannel scan method is proposed. The performance of the proposed approach is tested in a simulated outdoor industrial environment. The results show that the low cost site survey system is able to estimate interferences by the number of packets received in a *WirelessHART* network. The conclusions are also decisive for planning the insertion of field devices at the automation network, task made with the help of a GPS module implemented in the application.

Keywords: Wireless industrial networks; *WirelessHART* protocol; Wireless Site survey systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação de redes industriais quanto ao grau de complexidade [7].....	17
Figura 2 - Quadro classificatório do modelo OSI com <i>WirelessHART</i>	20
Figura 3 - A norma IEEE 802.15.4 dentro do modelo OSI.	21
Figura 4 - Exemplos de topologias estrela (a) e peer-to-peer (b) [13].	23
Figura 5 - Relação entre os quadros da camada física e de enlace.	24
Figura 6 - Divisão da camada de enlace em controle do enlace e controle de acesso....	26
Figura 7 - Relação entre os dados da camada de enlace (MAC) e física (PHY).	28
Figura 8 - Comunicação entre nós com (a) e sem (b) sinalizadores.....	29
Figura 9 - Exemplo de uma rede <i>WirelessHART</i> [4].	31
Figura 10 - Coexistência espectral entre IEEE 802.15.4 2,4GHz e Wifi [20].....	33
Figura 11 - Exemplo de interface passiva [22].	35
Figura 12 - Exemplo dos resultados obtidos após análise ativa [22].....	36
Figura 13 - Exemplo de interface preditiva realizada por simulador [22].....	37
Figura 14 - Exemplo de estrutura empregada em Survey tipo Onsite [23].	38
Figura 15 - Nó mestre da rede posicionada em tripé.	44
Figura 16 - Dispositivos finais ou nós escravos da rede.	45
Figura 17 - Kit de desenvolvimento da empresa Freescale.	47
Figura 18 - Módulo de comunicação fabricado pela empresa COESTER.	48
Figura 19 - Módulo de comunicação fabricado pela empresa NOVUS.	49
Figura 20 - Topologia da rede e convergência dos dados para PC.....	50
Figura 21 - Janela de monitoramento do LQI_RX e LQI_TX.	51
Figura 22 - Janela de dados recebidos para cada dispositivo.	52
Figura 23 - Software representando o gráfico de amostras por LQI_RX por canal.	53
Figura 24 - Janela de visualização dos dispositivos no plano geográfico.	54
Figura 25 - Janela de contabilização dos pacotes recebidos.....	54
Figura 26 - Janela de ajuda, explicando passo a passo os procedimentos.....	55
Figura 27 - Módulos de GPS utilizados.....	59
Figura 28 Diagrama de estados do rádio mestre.....	61
Figura 29 Fluxograma de comunicação do dispositivo mestre.	62
Figura 30 Diagrama de estados dos rádios escravos.	63
Figura 31 Fluxograma de comunicação do dispositivo escravo.....	63
Figura 32 Diagrama temporal da varredura multicanal.....	65
Figura 33 - Verificação do funcionamento do algoritmo de varredura multicanal.	66

Figura 34 - Representação do esquema de testes montado.	68
Figura 35 - Local do dispositivo interferente em relação ao nó gerenciador da rede.....	69
Figura 36 - Resultado obtido pela ferramenta WiFi Analyzer.	70
Figura 37 - Local dos testes de interferência.	71
Figura 38 - Local de realização dos testes com o sistema de geo-referenciamento.	85
Figura 39 - Gráfico comparativo das medidas obtidas.	87
Figura 40 - Arquivo.kml gerado via software.	88
Figura 41 - Representação dos dispositivos no plano geográfico.	89
Figura 42- Identificação da posição geográfica dos rádios.	90
Figura 43 Posicionamento dos nós para modelo de propagação.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Camadas PHY previstas para o padrão IEEE 802.15.4.....	22
Tabela 2 - Estrutura dos pacotes normatizados pela IEEE 802.15.4.....	25
Tabela 3 - Classificação dos centros de frequência em relação aos canais [4].	25
Tabela 4 - Quadro de camada de enlace da norma IEEE 802.15.4.	28
Tabela 5 - Protocolos <i>wireless</i> na banda ISM.	32
Tabela 6 - Organização da estrutura dos dados de mensagens do SMAC.	57
Tabela 7 - Quadro de envio do nó mestre ao nó escravo utilizando pu8Buffer.	57
Tabela 8 - Quadro de envio do nó escravo ao nó mestre.....	58
Tabela 9 - Quadro de envio do nó mestre ao PC.....	58
Tabela 10 - Distribuição dos bytes de escrita dos dados de GPS.	60
Tabela 11 - Posições geográficas absolutas dos nodos no terreno de testes.	71
Tabela 12 - Média das diferenças dos valores de LQI por dispositivo.....	73
Tabela 13 - Dados de LQI_RX por canal e por dispositivo.	75
Tabela 14 - Tabela ANOVA do experimento LQI_RX sem interferência.....	76
Tabela 15 - Variável de resposta LQI_TX para o cenário sem interferência.	77
Tabela 16 - Tabela ANOVA para LQI_TX cenário sem interferência.	78
Tabela 17 - Dados obtidos de LQI_RX pelos canais no cenário com interferência.....	79
Tabela 18 - Dados obtidos de LQI_TX pelos canais no cenário com interferência.	79
Tabela 19 - Amostras de LQI_RX para cenário sem e com interferência.....	81
Tabela 20 - Tabela ANOVA para variável LQI_RX no teste para interferência.	81
Tabela 21 - Amostras de LQI_TX para cenário sem e com interferência.	82
Tabela 22 - Tabela ANOVA para variável LQI_TX no teste para interferência.	82
Tabela 23 - Valores de pacotes recebidos por minuto no cenário sem interferência	83
Tabela 24 - Valores de pacotes por minuto obtidos no cenário com interferência.	83
Tabela 25 - Valores obtidos com os diferentes equipamentos.	86
Tabela 26 Relação entre LQI e distância entre os nós.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS

ACK – *Acknowledgement*

BER – *Bit Error Rate*

BPSK – *Binary Phase Shift Keying*

CLP – *Controlador Lógico Programável*

CSMA-CA – *Carrier Sense Multiple Access with Collision*

DAGC – *Digital Audio Gain Control*

DSSS – *Direct Sequence Spread Spectrum*

ED – *Energy Detection*

FCS – *Frame Check Sequence*

GTS – *Guaranteed Time Slot*

ISM – *Industrial Scientific and Medical*

LLC – *Logical Link Control*

LNA – *Low Noise Amplifier*

LQI – *Link Quality Indicator*

LR-WPANS – *Low Rate Wireless Personal Area Networks*

MAC – *Media Access Control*

MFR – *MAC Footer*

MPDUs – *MAC Protocol Data Units*

O-QPSK – *O Quadrature Phase Shift Keying*

OSI – *Open Systems Interconnection*

PAN – *Personal Area Network*

PER – *Packet Error Rate*

PDR – *Packet Delivery Ratio*

PHR – *Physical Header*

PPDUs – *Physical Protocol Data Units*

PSDU – *PHY Service Data Unit*

PSK – *Phase Shift Keying*

P2P – *Peer to Peer*

RSSF – *Redes de Sensores sem Fio*

RSSI – *Received Signal Strength Indicator*

SHR – *Synchronization Header*

SINR – *Signal to Noise Ratio*

SFD – *Start of Frame Delimiter*

TDMA – *Time Division Multiple Access*

WH – *Wireless Hart*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. MOTIVAÇÃO	14
1.2. OBJETIVO	15
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2. REDES SEM FIO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS	16
2.1. INTRODUÇÃO A REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL	16
2.2. REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL SEM FIO.....	18
3. SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO	19
3.1. MODELO OSI.....	19
3.2. NORMA IEEE 802.15.4.....	20
3.3. A CAMADA FÍSICA (PHY)	23
3.4. A CAMADA DE ENLACE (LLC, MAC)	26
3.4.1. Sublayer LLC.....	26
3.4.2. Sublayer MAC	27
3.4.3. Redes e Sinalizadores	28
3.5. SIMPLE MEDIA ACCESS CONTROLLER (SMAC)	29
3.6. PROTOCOLO WIRELESSHART	30
4. TRABALHOS RELACIONADOS.....	32
4.1. SISTEMAS WIRELESS SITE SURVEY	33
4.2. CLASSIFICAÇÃO.....	34
4.3. ABORDAGEM PASSIVA.....	34
4.4. ABORDAGEM ATIVA	35
4.5. ABORDAGEM PREDITIVA	36
4.5.1. Uso do Simulador	36
4.5.2. Sistema Onsite	37
5. MÉTRICAS PARA AFERIÇÃO DE QUALIDADE.....	39
5.1. INDICADOR DA POTÊNCIA DO SINAL RECEBIDO (RSSI).....	39
5.2. TAXA DE ERRO DE PACOTES (PER)	40
5.3. TAXA DE PACOTES RECEBIDOS (PDR)	40
5.4. INDICADOR DA QUALIDADE DO ENLACE (LQI)	40
5.5. COMPARAÇÃO LQIXRSSI	41
6. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	43

6.1. OBJETIVO DO PROJETO	43
6.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
6.3. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE.....	49
6.3.1. Janela Qualidade do Link	51
6.3.2. Janela de Dados Recebidos.....	52
6.3.3. Janela Qualidade do Link por Canal.....	52
6.3.4. Janela Mapa da Planta Industrial	53
6.3.5. Janela Pacotes Recebidos.....	54
6.3.6. Janela de Ajuda.....	55
6.4. DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE.....	56
6.4.1. Estrutura de dados do Quadro de troca de Mensagens	56
6.4.2. Envio de dados do nó mestre ao nó escravo	57
6.4.3. Envio de dados dos nós escravos ao nó mestre	58
6.4.4. Envio de dados do nó mestre ao PC	58
6.4.5. Sistema de Geo-referenciamento	59
6.4.6. Descrição da Rede	60
6.4.7. Varredura Multicanal	64
7. TESTES.....	67
7.1. TESTE DE INTERFERÊNCIA UTILIZANDO SISTEMA WIRELESS SITE SURVEY.....	67
7.2. TESTE DOS MÓDULOS GPS E DE LOCALIZAÇÃO	84
7.3. TESTE DE ALCANCE.....	89
7.4. DETERMINAÇÃO DE UM MODELO DE PROPAGAÇÃO.....	90
8. CONCLUSÕES.....	93
8.1. TESTES REALIZADOS	93
8.2. EMPREGABILIDADE DO SISTEMA	94
8.3. POSSÍVEIS MELHORIAS	94
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

O predomínio de padrões como *4-20mA* e *Field Bus* no controle de processos industriais em relação a sistemas sem fio foi e ainda é indiscutível na maioria das aplicações. No entanto, com o passar do tempo, notou-se uma mudança nesta tendência, na medida em que a tecnologia se desenvolveu e propiciou a utilização de equipamentos cada vez mais sofisticados e com maior poder de processamento em menor espaço físico [1]. Com os crescentes avanços na área da eletrônica, os dispositivos de automação industrial tornaram-se mais seguros, robustos e confiáveis, criando uma alternativa ao sistema já existente. O advento de módulos de comunicação sem fio (*Wireless*) no monitoramento e controle de processos industriais demonstrou ser uma opção de menor custo, maior flexibilidade, escalabilidade (pela mobilidade) e praticidade em relação ao antigo, que por utilizar cabeamento entre os dispositivos impõe custos de manutenção e limita o monitoramento de parâmetros em determinados locais [2]. Porém para que a comunicação sem fio seja efetivamente realizada é necessário estabelecer um padrão, um conjunto de especificações objetivas que coordenam a comunicação entre seus módulos, os chamados protocolos de comunicação.

Dentre os muitos protocolos de comunicação que surgiram com a finalidade de proporcionar ao sistema de automação sem fio os requisitos necessários no meio industrial, como segurança, confiabilidade, baixo custo, baixo consumo de energia e compatibilidade com os dispositivos já existentes, foi o padrão *WirelessHART* (WH) que demonstrou ser o mais proeminente. O padrão além de propiciar confiabilidade e segurança na entrega de informação apresenta alta adaptabilidade em relação ao sistema HART, amplamente utilizado na indústria [3]. Todavia, a maneira de utilização do protocolo e da consequente comunicação entre seus dispositivos precisa ser antes analisada, uma vez que o ambiente industrial em que as redes são instaladas pode ser extremamente hostil, devido à presença de alto ruído eletromagnético proveniente de inversores ou bobinas, por exemplo.

1.2. OBJETIVO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta que permite o diagnóstico da qualidade de uma rede sem fio com ênfase no protocolo WH. Utilizando métodos como contabilização de pacotes recebidos e aferição da qualidade do sinal em todos canais, a ferramenta possibilita analisar os fatores do ambiente que interferem na comunicação e conseqüentemente realocar os dispositivos em locais mais apropriados. A ferramenta proposta consiste basicamente em um firmware - a ser embarcado em até cinco rádios que utilizam o padrão IEEE 802.15.4 na topologia estrela – e um software, que faz a interface gráfica com o usuário via PC e, através de um módulo de GPS permite aferir a localização geográfica dos nodos. O sistema proposto implementa na prática um sistema de comunicação sem fio para o levantamento de parâmetros da rede em determinado local, atuando assim como um tipo de *Wireless Site Survey*.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Os capítulos que seguem descrevem os conceitos envolvidos no estudo do trabalho, assim como as etapas do desenvolvimento para posteriormente chegar-se aos testes e resultados práticos. O trabalho encontra-se organizado da seguinte forma:

- Capítulo 02 – Disserta sobre o tema de comunicação sem fio em ambiente industrial, relacionando as diferentes arquiteturas computacionais utilizadas para criar redes de automação e seus protocolos envolvidos.
- Capítulo 03 – detalha a norma IEEE 802.15.4 no contexto do modelo OSI, dando enfoque as camadas PHY e de enlace;
- Capítulo 04 – Explica sobre os trabalhos relacionados com o tema.
- Capítulo 05 – Disserta sobre as métricas utilizadas para aferição da qualidade de redes sem fio;
- Capítulo 06 – Caracteriza o projeto em si, ao reforçar seu objetivo e explicar qual o material e metodologia empregada; justificando cada premissa adotada;
- Capítulo 07 – Descreve a metodologia dos testes realizados e os resultados com eles obtidos.
- Capítulo 08 – Discute sobre as conclusões obtidas e sobre propostas de projetos futuros.

2. REDES SEM FIO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

A crescente tendência - na área de automação industrial - do uso de arquiteturas computacionais distribuídas, onde diferentes dispositivos podem estabelecer comunicação com outros de forma a integrar diversos equipamentos e inclusive de fabricantes distintos (protocolo aberto) causou o crescimento e aprimoramento nos usos das redes de automação. A utilização das redes permite a comunicação rápida e confiável entre equipamentos e o uso de mecanismos padronizados que são, hoje em dia, fatores indispensáveis no conceito de produtividade industrial [4].

2.1. INTRODUÇÃO A REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL

As redes industriais surgiram da necessidade de interligar computadores e controladores lógicos programáveis – CLP - que se proliferavam operando independentemente. Essa interligação em rede permitiu o compartilhamento de recursos e bases de dados, que passou a ser único, o que conferiu mais segurança aos usuários da informação. Assim, o ambiente industrial que outrora era isolado, hoje tem a necessidade de estar interligado com o ambiente corporativo da empresa para que estes possam compartilhar informações e aperfeiçoar o processo de produção, evitando perda de tempo e insumos e mão de obra. [5]. Desta maneira as empresas viram-se obrigadas a buscar tecnologias que conseguissem aumentar a agilidade e a eficiência e passaram a investir cada vez mais em sistemas que fossem capazes de gerenciar, supervisionar, controlar e proteger as redes industriais. Devido as crescentes exigências, o emprego de redes de supervisão e controle baseadas em protocolos de comunicação digital tem crescido nas mais variadas plantas industriais [6]

Com este crescimento, surgiram vários protocolos que hoje tem ampla utilização na indústria. Entre eles podemos citar *ASI, Can, Device Net, Zigbee, HART, WirelessHART* entre tantos outros. A figura 1 ilustra alguns protocolos cabeados quanto ao seu emprego e grau de complexibilidade [7].

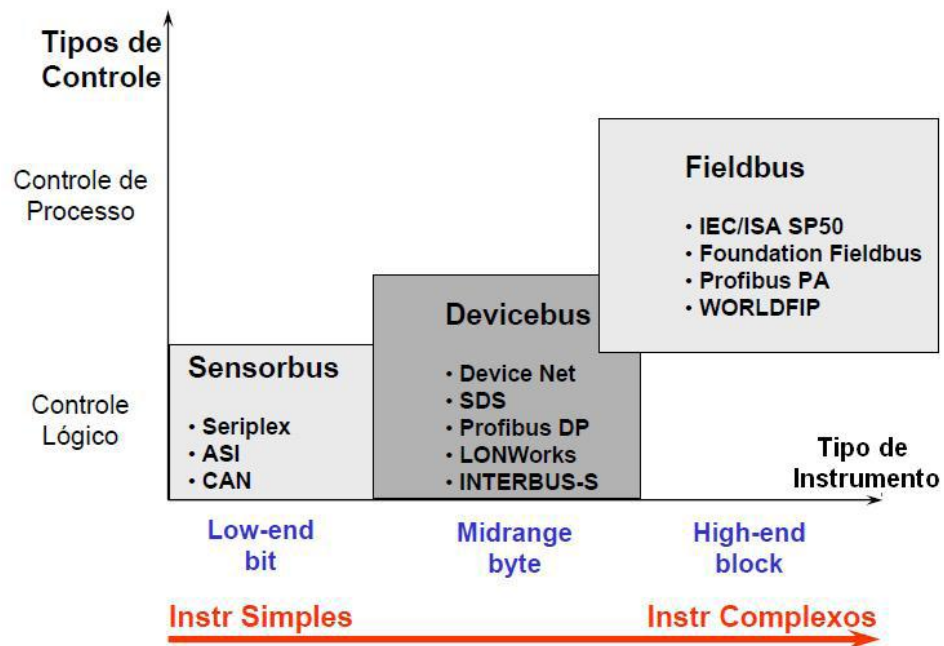


Figura 1 - Classificação de redes industriais quanto ao grau de complexidade [7].

Dentre os protocolos desenvolvidos, vale ressaltar o crescente avanço dos protocolos *Wireless* na área, pois estas soluções sem fio são alternativas viáveis onde é difícil instalar cabos ou fibra ótica. Dentre as técnicas de transmissão de sinais usando redes sem fio têm-se como principal as que utilizam rádio frequência (RF), se destacando os protocolos *Zigbee*, *Bluetooth* e *WirelessHART*. A faixa de frequência utilizada por estes protocolos é a mesma conhecida como ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), que apresenta faixas liberadas para uso geral sem necessidade de licenciamento, o que por um lado facilita seu emprego devido à eliminação da burocracia, porém por outro também obriga a convivência entre esses dispositivos com outras fontes de RF na mesma área, como telefones sem fio e redes WiFi, por exemplo. Esses dispositivos sem fio devem possuir meios de continuar operando em áreas onde outros equipamentos de RF estejam compartilhando a faixa do espectro (2,4 GHz para os padrões IEEE 802.11b/g) frisando a importância da análise do ambiente antes do emprego dos mesmos [8]. O capítulo seguinte detalhará um pouco mais sobre protocolos sem fio dando enfoque ao padrão *WirelessHART*.

2.2. REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL SEM FIO

Com o crescente avanço na área da eletrônica possibilitou-se um significativo desenvolvimento na tecnologia de dispositivos de controle e monitoramento para automação industrial. O surgimento de equipamentos mais robustos, confiáveis e com alta capacidade de processamento permitiram a viabilização de alternativas ao sistema cabeado já existente.

A alternativa em questão foi o uso de tecnologia sem fio para redes de automação industrial. Através da utilização de redes sem fio foi possível terminar com a frequente manutenção dos cabos e conectores na planta, viabilizando assim o controle e/ou monitoramento de processos industriais em qualquer local, por mais difícil que seja seu acesso [9]. Portanto, a fácil instalação e reposição dos dispositivos e o baixo custo de instalação e manutenção são características chaves desta nova alternativa, que coroou o padrão *WirelessHART* como protocolo mais proeminente na área de automação industrial [2].

O protocolo *WH* é o primeiro padrão aberto de comunicação para medidas e controle em processos industriais. Ele utiliza uma rede sem fio do tipo malha entre os dispositivos de campo. O protocolo é empregado em sensores e atuadores e surgiu da necessidade de manter um padrão já consolidado na indústria (*HART*) de forma a proteger os investimentos dos usuários em sua base instalada e da necessidade de usar tecnologia sem fio para reduzir os custos da medição, acesso de informações de diagnóstico avançado e propiciando um melhor acompanhamento do equipamento [4].

Para o entendimento de como funciona o protocolo *WH* e, conseqüentemente, outros protocolos de comunicação industrial sem fio é necessário entender conceitos básicos da estrutura e sequência de troca de informações entre seus dispositivos. O capítulo que segue fornece o embasamento teórico necessário para o entendimento de tais padrões, possibilitando a introdução da etapa de projeto usando esta tecnologia.

3. SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

Os sistemas de comunicação se referem à transmissão, emissão e recepção de sinais elétricos através do uso de guias de onda ou do espaço livre como meio físico para propagação. Eles são formados basicamente por [10]:

- Fonte;
- Transmissor;
- Canal;
- Receptor;
- Destino.

Com o intuito de se definir uma arquitetura comum para o hardware dos módulos comunicantes, facilitando assim o processo de interconectividade entre máquinas de diferentes fabricantes, foi lançado um padrão denominado Interconexão de Sistemas Abertos, ou modelo OSI.

3.1. MODELO OSI

O modelo de referência OSI (*Open Systems Interconnection*) foi criado em 1979 como uma tentativa de padronizar as funções internas constituintes de um sistema de comunicação [11]. É um modelo conceitual, cuja arquitetura é composta por sete camadas abstratas. O modelo procura agrupar funções de comunicação similares em camadas iguais em que cada camada posicionada abaixo na hierarquia serve a camada posicionada acima [12].

As sete camadas que constituem o modelo são (na ordem de baixo para cima): camada física, de enlace, de rede, de transporte, de sessão, de apresentação e de aplicação. A figura 2, através de um quadro comparativo, ilustra a posição de cada camada e a relaciona com o protocolo WH, como forma de introduzir as principais funções do protocolo em suas devidas etapas. É importante observar que este protocolo industrial não utiliza as camadas cinco e seis; o que nos permite abstrai-las de uma análise pormenorizada.

Modelo OSI				
	Unidade de dados	Camada	Função	WirelessHART
Host Layers	<i>Data</i>	<u>7ª Aplicação</u>	Fornecer aplicações da rede	Comandos orientados procedimentos de aplicações
		<u>6ª Apresentação</u>	Representação dos dados/ Criptografia e Descritografia	
		<u>5ª Sessão</u>	Conexão de serviços de gerenciamento com aplicações	
	<i>Segments</i>	<u>4ª Transporte</u>	Conexões ponta a ponta/ confiabilidade	Transferência e segmentação de dados
Media Layers	<i>Packets</i>	<u>3ª Rede</u>	Determinação de caminhos/ endereçamento lógico	Otimização de energia/ auto-organização da rede.
	<i>Frame</i>	<u>2ª Enlace</u>	Endereçamento físico/ pacote de estrutura de dados	Tempo de Sincronização
	<i>Bit</i>	<u>1ª Física</u>	Conexão elétrica/mecânica Transmissão.	Wireless, baseado em 802.15.4 10dBm.

Figura 2 - Quadro classificatório do modelo OSI com WirelessHART

Basicamente os protocolos empregados em automação industrial utilizam a norma IEEE 802.15.4 como base para sua camada física garantindo, entre outras vantagens, baixo consumo de energia. A seção a seguir detalhará brevemente a norma e suas principais características.

3.2.NORMA IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 especifica a camada física (PHY) e o controle de acesso (*sublayer* MAC) da camada de enlace para as chamadas LR-WPANs. Ela é a base para protocolos amplamente utilizados em automação industrial, como Zigbee, ISA100 e o próprio WirelessHART. Este padrão garante ao transceptor vantagens extremamente relevantes em qualquer fábrica ou indústria, como baixo consumo de energia, alta confiabilidade na recepção de pacotes e baixo custo, isto quando comparada a outros protocolos como o IEEE 802.11 (WiFi) [13]. Este padrão define algumas características para a LR-WPAN, que são:

- Cálculo do indicador da qualidade do sinal (LQI).

- Detecção de Energia (ED);
- Baixo consumo de energia;
- Alta confiança na transmissão e recepção de pacotes;
- Envio de pacote de limpeza do canal - CSMA-CA;
- Operações em topologia estrela ou *peer-to-peer*;
- Operação em três diferentes bandas de frequência: 868 MHz (1 canal), 915 MHz (10 canais) e 2,450 GHz (16 canais) com taxas de 20kb/s, 40kb/s e 250kb/s ou 100kb/s.

A figura 3 ilustra o espaço de atuação da norma dentro do modelo OSI, destacando sua abrangência apenas nas camadas física, em dois blocos de frequências distintas, e de enlace (representada pelas subcamadas MAC e LLC).

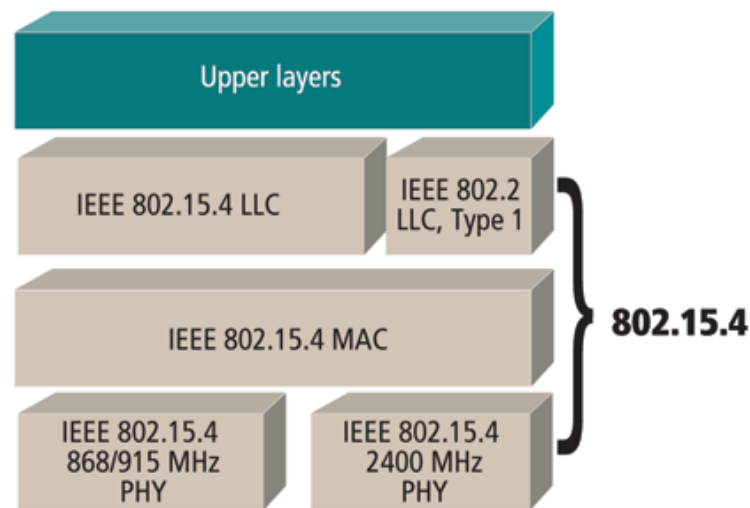


Figura 3 - A norma IEEE 802.15.4 dentro do modelo OSI.

É importante destacar que as bandas frequência permitidas pela norma apresentam tipos de modulação e taxas de transferência de dados diferentes.

A banda de 2,450 GHz, por exemplo, apresenta modulação por mudança na fase da portadora do tipo O-QPSK, na qual um símbolo enviado representa quatro bits de dados. Já as outras duas faixas de frequência utilizam o mesmo tipo de modulação, a BPSK, que é definido por ser o tipo mais simples de PSK, onde cada símbolo representa um bit de dados.

A taxa de transferência de dados brutos (a taxa de dados efetivamente utilizados pode ser diferente) varia conforme a frequência, seguindo uma relação diretamente proporcional. Vale lembrar que apenas o uso da banda de 2,450GHz é permitido no mundo inteiro, fato assegurado por esta faixa de frequência estar dentro da banda ISM.

A tabela 1 resume as diferenças entre as faixas de frequências possíveis para o IEEE 802.15.4 [14].

Tabela 1 - Camadas PHY previstas para o padrão IEEE 802.15.4 [14].

Banda de Frequencia (MHz)	Taxa de Transferência (kbit/s)	Número de Canais	Modulação
868	20	1	BPSK
915	40	10	BPSK
2400	250	16	O-QPSK

Outro fator importante definido pela norma diz respeito às topologias admitidas. Ela admite dois tipos de topologia: estrela e *peer-to-peer*.

Na topologia estrela, a comunicação é estabelecida entre dispositivos escravos e um único controlador central, denominado coordenador PAN. Desta maneira, um dispositivo escravo tem tipicamente uma aplicação associada que consiste em ser um ponto inicial ou um ponto final para rede de comunicação. Ao coordenador PAN, pode também ser atribuído uma aplicação específica como iniciar, terminar ou rotear a comunicação pela rede. Ele é o controlador primário da rede. A comunicação entre ele e os dispositivos escravos se dá de maneira direta. A cada dispositivo escravo é atribuído um valor de endereço que será acessado pelo coordenador. Esta topologia é bastante utilizada em automação residencial, periféricos de PC, brinquedos, jogos e aplicações da área de saúde [13]. Um esquema simplificado da topologia estrela está ilustrado na figura 5(a).

Na topologia *peer-to-peer* também há o coordenador primário, porém ao contrário da topologia anterior os dispositivos podem se comunicar entre si enquanto estiverem a um alcance razoável entre eles; nesta situação o nó coordenador torna-se o dispositivo mestre da rede. A topologia *peer-to-peer* permite formações de rede mais complexas, como a formação da topologia em redes de malha. Aplicações na área de automação industrial, redes de sensores sem fio (RSSF), agricultura inteligente, entre outras, são próprias deste tipo de topologia. É importante destacar que esta topologia pode ser ad hoc, possuir auto-organização e autocorreção [13]. A figura 5(b) esboça a organização desta topologia, indicando para isto os dispositivos escravos (*full function devices* e *reduced function devices*) e o fluxo de comunicação (*communication flow*).

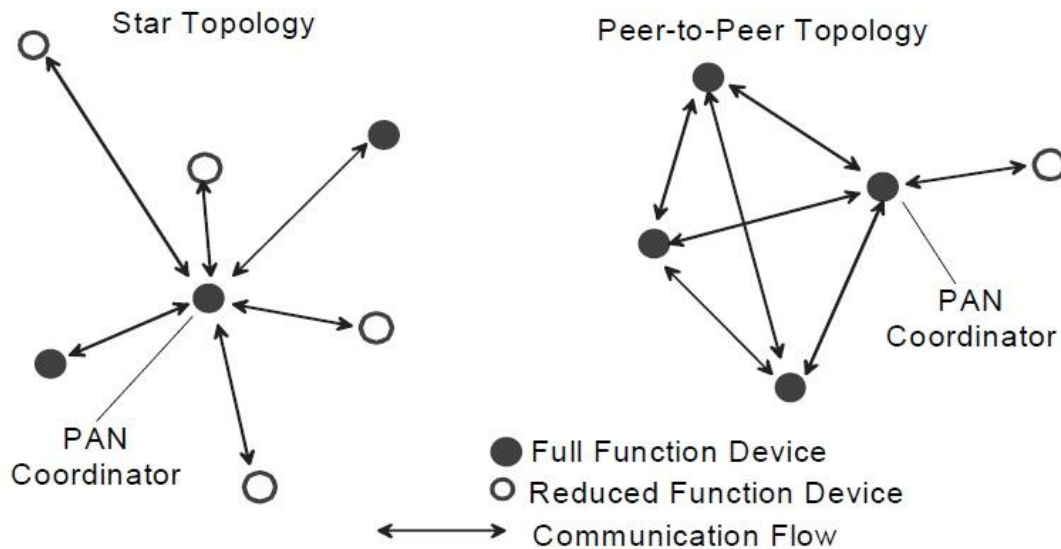


Figura 4 - Exemplos de topologias estrela (a) e peer-to-peer (b) [13].

Como visto na figura 3, o protocolo WH emprega no nível de camada física basicamente os mesmos princípios estabelecidos pela norma IEEE 802.15.4. O subcapítulo seguinte servirá como base para um entendimento mais detalhado de como se dá a comunicação da camada física com as outras camadas e de como as especificações da norma definem o efetivo funcionamento do transceptor.

3.3.A CAMADA FÍSICA (PHY)

A camada física de maneira geral diz respeito à transmissão e recepção do fluxo de bits brutos não estruturados através de um meio físico. Ela descreve as interfaces ópticas, mecânicas e funcionais para o meio físico e transporta sinais para a camada superior (camada de enlace) [15]. Ela fornece:

- Codificação de dados: modifica o padrão sinal digital simples (1s e 0s) usado pelo hardware para melhor acomodar as características do meio físico e para ajudar na sincronização de bits e quadros, definindo qual estado do sinal representa um 1 binário, como a estação de recepção sabe quando inicia um “*bit-time*” e como a estação de recebimento delimita um quadro.

- Técnica de transmissão determinando se os bits codificados serão transmitidos por banda base (digital) ou a sinalização de banda larga (analógico);

- Transmissão de mídia física transmitindo bits como sinais ópticos ou elétricos apropriados para o meio físico, determinando-se então que opções de mídia físicas podem ser

usadas e quantos volts/dB devem ser usados para representar um estado de determinado sinal, usando um determinado meio físico.

Quando especificada pela norma IEEE 802.15.4, estes sinais quando transmitidos e recebidos no transceptor se traduzem para as seguintes tarefas:

- ativação e desativação o rádio transceptor;
- seleção do canal de comunicação a ser utilizado;
- habilitação dos modos de transmissão e recepção dos dispositivos;
- transmissão e recepção de pacotes através do meio físico;
- indicação da qualidade do link de pacotes recebidos (LQI);
- Detecção da energia do canal atual.

O formato do pacote de nível físico PPDU desta camada, consiste em:

- um cabeçalho de sincronização (SHR), que permite a um dispositivo receptor sincronizar com o pacote de recepção do mesmo;
- um cabeçalho físico (PHR), que contém informação do tamanho do quadro;
- um *payload* de tamanho variável, que carrega a informação (*frame*) do *sublayer* MAC.

A figura 6 ilustra a estrutura e divisão de um quadro PPDU, na qual é introduzida a informação da camada superior (quadro azul).

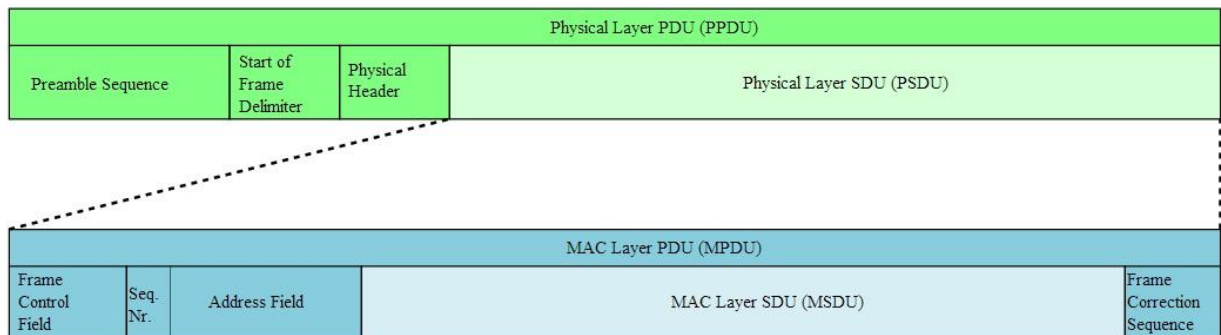


Figura 5 - Relação entre os quadros da camada física e de enlace.

O cabeçalho de sincronização (SHR) é composto pela sequência do preâmbulo (*Preamble Sequence*) e o delimitador do quadro de início (SFD), sendo responsável por fornecer ao hardware o comando de início da leitura do quadro.

O *payload* (os dados da camada superior), na figura representada por PSDU (unidade de dados de serviço), pode assumir um tamanho de no máximo 128 bytes e carrega as informações necessárias para troca de canal, cálculo do LQI, ativação do transceptor, etc. A tabela 2 apresenta o formato do PPDU com o tamanho máximo de cada divisão [13].

Tabela 2 - Estrutura dos pacotes normatizados pela IEEE 802.15.4.

SHR		PHR		Payload
Preâmbulo	SFD – Flag Fixo	Tamanho do Quadro	Reservado	Dados
4 bytes	1 byte	7 bits	1 bits	Variável

Por meio dos PPDU's é possível determinar então, entre outras coisas, a escolha do canal de frequência de operação do rádio. Tomando-se o caso da norma 802.15.4 2,4GHz como exemplo, onde a camada física determina operação somente na banda de 2400-2483,5 MHz composta por canais numerados de 11 a 26, com um intervalo de 5 MHz entre dois canais adjacentes, o centro de frequência dos 16 canais é definido por [13]:

$$F_c = 2405 + 5(k - 11) \text{ em MHz para } k=11,12,\dots,26.$$

Onde k é o número do canal.

A tabela 3 classifica F_c (frequência central) para cada canal.

Tabela 3 - Classificação dos centros de frequência em relação aos canais [4].

Índice	Canal	Frequência	Índice	Canal	Frequência
0	11	2405	8	19	2445
1	12	2410	9	20	2450
2	13	2415	10	21	2455
3	14	2420	11	22	2460
4	15	2425	12	23	2465
5	16	2430	13	24	2470
6	17	2435	14	25	2475
7	18	2440	15	26	2480

3.4.A CAMADA DE ENLACE (LLC, MAC)

A camada de enlace tem como principais funções prover o acesso à camada física do rádio e ser responsável pela comunicação ponto a ponto entre os nós. Esta camada detecta e, opcionalmente, corrige erros que possam acontecer na camada física. Ela é responsável também pela transmissão e recepção (delimitação) de quadros e pelo controle de fluxo, estabelecendo um protocolo de comunicação entre sistemas diretamente conectados [16].

Ela pode ser dividida em dois sublayers: o Controle de Enlace Lógico (LLC) e o Controle de Acesso ao Meio (MAC). A figura 6 ilustra esta divisão dentro do modelo OSI assim como as camadas regidas pela norma.

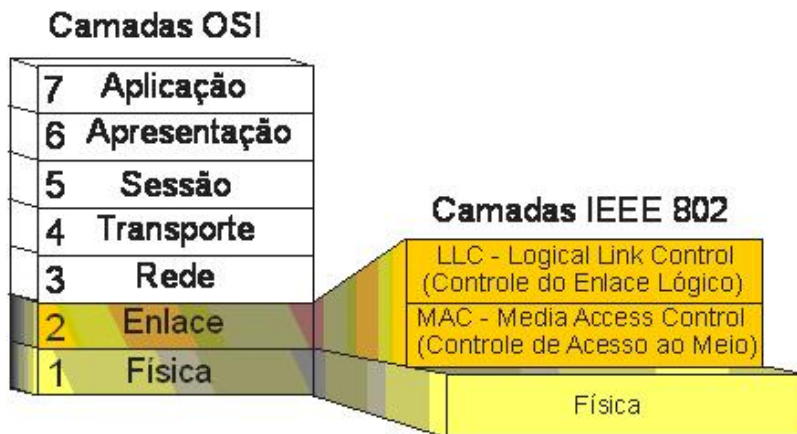


Figura 6 - Divisão da camada de enlace em controle do enlace e controle de acesso.

3.4.1. SUBLAYER LLC

O sublayer LLC realiza o endereçamento e o controle de dados do enlace. Nele são especificados quais mecanismos serão utilizados para endereçamento das estações e para o controle dos dados trocados entre os dispositivos comunicantes. Sua função, portanto, é controlar os erros, controle de fluxo de pacotes, montagem dos frames e endereçamento [4].

3.4.2. SUBLAYER MAC

O *sublayer* MAC tem como principais objetivos: manter o sincronismo entre os *slots*, identificando aqueles que necessitam de serviços, escutar pacotes durante o processo de envio pelos vizinhos e propagar pacotes que vem da camada de rede [16]. Nele é também incluída uma entidade de gerenciamento dos parâmetros da camada física, chamada MLME. Esta entidade fornece as funções de interfaces com a camada física [17]. Esta subcamada possui as seguintes tarefas:

- Gerenciar o uso de sinalizadores (beacons) para a rede
- Prover acesso aos canais;
- Sincronizar com os beacons da rede;
- Prover segurança do dispositivo;
- Empregar o mecanismo de acesso CSMA-CA;
- Empregar o mecanismo de *timeslot* garantido (GTS);

A exemplo dos PPDU's da camada física, o *sublayer* MAC utiliza os chamados MPDU's para transmitir e receber serviços para a camada física. O formato do pacote MPDU consiste em:

- um *payload* de tamanho variável, que contém os dados provindos da camada acima.
- um cabeçalho MAC (MHR), contém as informações sobre o tipo de quadro, o número de sequência (que varia de acordo com o tipo de pacote enviado), as identificações de endereços (da rede PAN destinatária e remetente e o endereço do equipamento destinatário e remetente) e um campo que informa as opções de segurança utilizadas no quadro.
- O MAC *frame* verifica se há erros na sequência do frame através do FCS.

A figura 7 ilustra a estrutura de um sinalizador do tipo *beacon* (*beacon frame*), originada pelo *sublayer* MAC. Nela é possível perceber que o MAC *payload* contém a especificação do *superframe* (frame com período ativo e inativo de recepção), os campos GTS, os campos de endereçamento final e o próprio *beacon payload* (com dados da camada superior). O MAC *payload* é prefixado com o MHR e anexado ao MFR de forma a garantir a autenticidade do quadro.

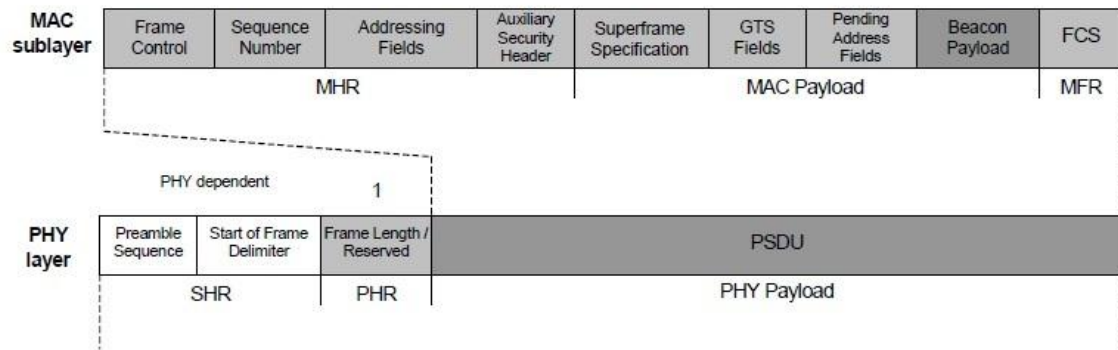


Figura 7 - Relação entre os dados da camada de enlace (MAC) e física (PHY).

Além do sinalizador (*beacon*), a norma define outros dois tipos diferentes de quadro: confirmação (*acknowledgment*) e comando. A tabela 4 apresenta genericamente os tamanhos e a identificação de cada parte de um pacote MAC.

Tabela 4 - Quadro de camada de enlace da norma IEEE 802.15.4.

MHR				<i>Payload</i>	MFR
Controle de Quadro	Número de Sequencia	Campos de Endereço	Segurança Auxiliar	Dados	FCS
2 bytes	1 byte	Até 20 bytes	Até 14 bytes	Variável	2 bytes

A utilização do sinalizador, assim como a dos ACKs e comandos, está relacionada com a topologia da rede a ser formada. Dependendo da topologia estará ou não prevista a utilização destes durante a comunicação entre os dispositivos.

3.4.3. REDES E SINALIZADORES

Para a comunicação dos dispositivos com um nó coordenador - topologia estrela - existem dois modos possíveis definidos pela norma: utilizando ou não os sinalizadores gerados pelo nó coordenador, conforme ilustrado na Figura 8.

No caso de se utilizar o sinalizador, um dispositivo na rede deve esperar o *beacon* vindo do coordenador para então sincronizar com ele utilizando o CSMA-CA, disputando com os outros dispositivos durante o período de tempo CAP (*Contention Access Period*), ou esperando sua vez durante o período de CFP (*Contention Free Period*), no qual existem

timeslots reservados pelo coordenador para cada equipamento na rede. Em ambos os casos, um pacote de *acknowledgement* é opcional.

Existe ainda a possibilidade de comunicação entre dispositivos não coordenadores no modo peer-to-peer, não necessitando sincronização com sinalizadores para a troca de mensagens.

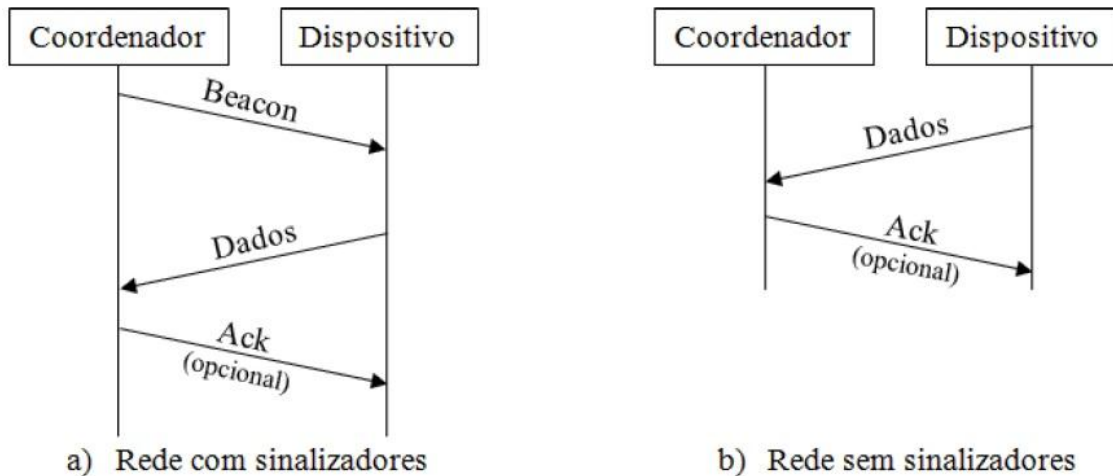


Figura 8 - Comunicação entre nós com (a) e sem (b) sinalizadores

3.5.SIMPLE MEDIA ACCESS CONTROLLER (SMAC)

A fim de propiciar ao projetista uma maneira simples para o acesso das funções básicas realizadas pela camada física, a empresa *Freescale* criou uma pilha de protocolos (*stack*) baseada em linguagem ANSI C, denominando-a SMAC (*Simple MAC*). Utilizando poucos recursos do microcontrolador, como pouco uso da memória *Flash* (apenas 2,5kbit), o SMAC foi projetado para ser uma camada de enlace sobre a camada física (assim como o MAC), sendo composto por várias primitivas que permitem acesso às funcionalidades do rádio, bem como seu gerenciamento.

São alguns exemplos das primitivas acessadas no SMAC [18]:

- *MLMERadioInit()* - Função de configuração de diferentes parâmetros do acelerador MAC e da interface do rádio

- *MLMEPHYXtalAdjust()* - Função de ajuste do *clock* de referência do rádio transceptor (usada na função acima pelo acelerador MAC).

- *MLMSEtWakeupSource()* – Função de configuração da capacidade de mudança automática do estado do transceptor de desligado para ligado (interessante para aplicações onde o baixo de consumo de energia é requerido).

- *MLMEPAOutputAdjust()* – Função de ajuste da potência de saída do amplificador de potência do rádio (*Power Amplifier PA*).

- *MLMSEtChannelRequest()* – Função de troca do canal de comunicação do rádio (valores de zero a 16).

- *MLMERXEnableRequest()* – Função de ativação do transceptor para o modo de recepção de pacotes.

- *MLMELinkQuality()* – Função de cálculo do indicador de qualidade do enlace (LQI – *Link Quality Indicator*).

- *MLMEPhySoftReset()* – Função de reinicialização completa do rádio transceptor.

3.6.PROTOCOLO WIRELESSHART

O protocolo *WirelessHART* é o primeiro padrão aberto de comunicação para medidas e controle em processos industriais. Ele utiliza uma rede sem fio do tipo malha entre os dispositivos de campo. O protocolo é empregado em sensores e atuadores e surgiu da necessidade de manter um padrão já consolidado na indústria (HART) de forma a proteger os investimentos dos usuários em sua base instalada e da necessidade de usar tecnologia wireless para reduzir os custos da medição, acesso de informações de diagnóstico avançado e propiciando um melhor acompanhamento do equipamento [4]. A figura 9 apresenta um exemplo de rede *WirelessHART*. Os dispositivos de campo (*field devices*) por estarem em uma rede tipo malha se comunicam entre si. As informações convergem para os pontos de acesso, que por sua vez passam os dados ao *gateway*

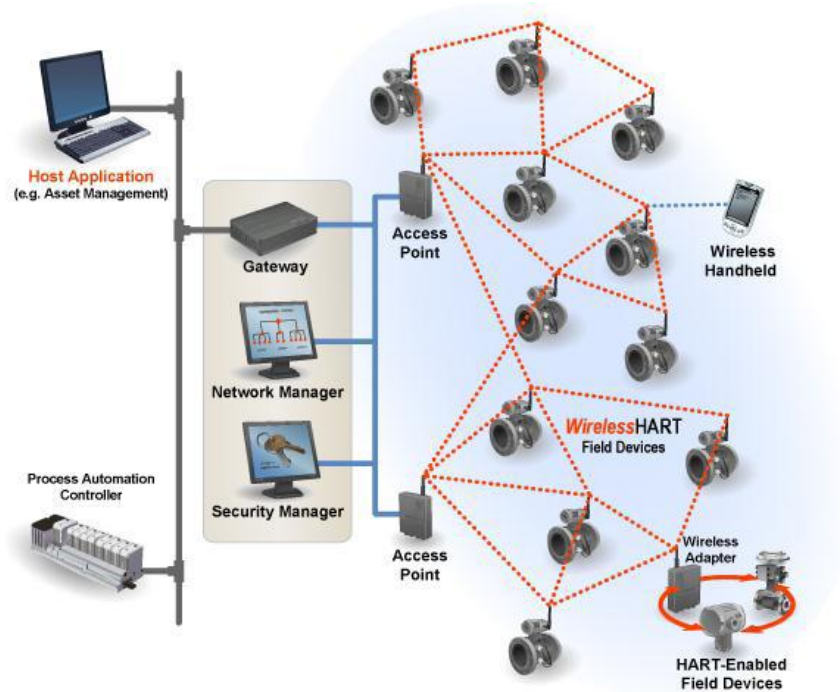


Figura 9 - Exemplo de uma rede *WirelessHART* [4].

A tecnologia apresenta uma rede segura e opera na banda de rádio 2,4GHz ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), não utilizando apenas o canal 26 (ver tabela 3). O padrão utiliza a norma IEEE 802.15.4 (camada física) com sequência direta e espalhamento do espectro, *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS)[4].

A rede WH suporta uma ampla variedade de dispositivos de diversos fabricantes. Incluem-se nesta variedade: dispositivos de campo, como dispositivos básicos realizando funções de sensoriamento ou atuação, dispositivos roteadores e adaptadores dos dispositivos de campo que ligam os equipamentos HART com fio dentro da rede; todos estes dispositivos são utilizados como roteadores das mensagens entre os dispositivos.

O protocolo de comunicação WH é precisamente programado utilizando uma abordagem denominada Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo (TDMA). O agendamento é realizado por um gerenciador da rede centralizado que utiliza as informações sobre a rede em combinação com os requisitos de comunicação fornecidos pelos dispositivos e pelas aplicações. A programação é dividida em slots (espaços de tempo) e transferida a partir do gerenciador de rede para dispositivos individuais. O gerente de rede, de forma contínua, adapta todo o roteamento e programa mudanças na topologia da rede e a demanda de comunicação [4].

4. TRABALHOS RELACIONADOS

O uso de protocolos sem fio que se baseiam na norma IEEE 802.15.4 para a camada física, como WH e o *Zigbee*, incorre em uma imensa gama de aplicações para diversas áreas da tecnologia, como industrial, ambiental, social, médica entre outras. Estes protocolos, baseados na norma IEEE 802.15.4 de frequência 2,4GHz, encaram um grande desafio por operarem na banda aberta ISM, pelo motivo desta estar disponível para vários outros protocolos sem fio, como Bluetooth (IEEE 802.15.1) e as WLANs (IEEE 802.11b/g). A tabela 5 apresenta as tecnologias *wireless* que compartilham a banda de frequência ISM [19].

Tabela 5 - Protocolos *wireless* na banda ISM.

IEEE Standard	802.11b/g	802.15.1	802.15.3	802.15.4
Banda	2,4GHz	2,4GHz	2,4GHz	2,4GHz
Frequência				
Largura de Banda canal	22MHz	1MHz	15MHz	2MHz
Número Canais	11	79	5	16
Máxima taxa (Mbps)	1/54	0,72	55	0,25
Alcance de Transmissão	100m	10m	10m	20m
Aplicações	WLAN	WPAN	HR-WPAN	LR-WPAN

Esta coexistência entre tecnologias nesta banda de frequência pode ocasionar uma severa degradação do desempenho dessas redes. A degradação de desempenho consiste basicamente em uma maior dificuldade de transmissão e recepção da informação entre seus dispositivos durante a comunicação [20]. A figura 10 ilustra o caso de coexistência espectral entre redes com camada física baseada na norma IEEE 802.15.4 e redes Wifi.

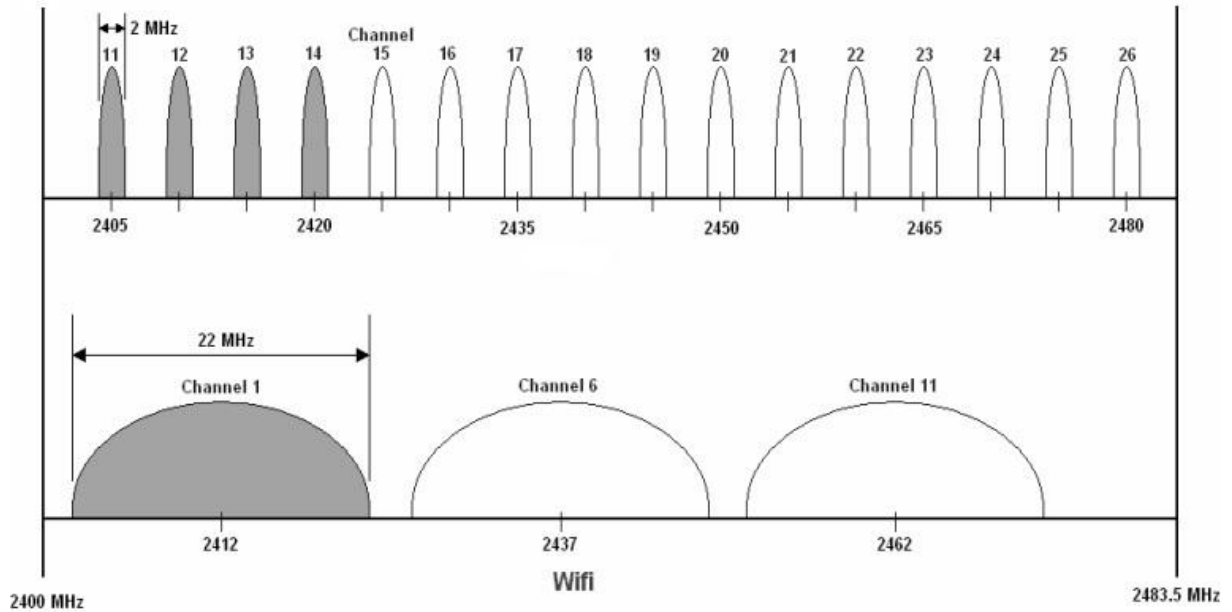


Figura 10 - Coexistência espectral entre IEEE 802.15.4 2,4GHz e Wifi [20].

Soma-se ao problema de coexistência os fatores intrínsecos ao ambiente (seja ele *indoor* ou *outdoor*) onde os dispositivos da rede serão instalados, como obstáculos físicos, condições climáticas variáveis, forte presença de interferência magnética de maquinário elétrico utilizado, entre outros [2].

A fim de medir estes fatores contributivos para degradação do desempenho da rede, várias ferramentas de análise, tanto no meio industrial como acadêmico, foram desenvolvidas. Os sistemas *Wireless Site Survey*, também conhecidos como *RF Site Survey*, ou apenas *Wireless Survey*, são estas ferramentas de análise capazes de obter os dados necessários para o planejamento e projeto de redes Wireless.

Os subcapítulos que seguem detalham e classificam um pouco mais dessas ferramentas operantes atualmente no mercado.

4.1. SISTEMAS WIRELESS SITE SURVEY

O sistema *Wireless Survey* surgiu da grande dificuldade de predição do modo de propagação das ondas de rádio e da necessidade de detecção da presença de interferências externas à rede criada em determinado ambiente. Em decorrência destes fatores, são concedidos ao sistema grande importância e aplicabilidade em diversas áreas da tecnologia que utilizam redes de comunicação sem fio.

Devido a paredes, portas, pessoas e outros obstáculos que oferecem ao sistema graus de atenuação diferentes, tem-se um padrão RF de radiação irregular e imprevisível. Como alternativa na busca do entendimento comportamental das ondas de rádio e sua interação com o ambiente de operação, realizam-se testes da qualidade de comunicação entre os dispositivos, para assim mapear os locais mais adequados para posicionamento dos pontos de acesso e/ou demais dispositivos em determinado local. Esta é uma das principais finalidades do *Wireless Site Survey*; obter dados de enlace para determinar o número e o local de colocação dos dispositivos comunicantes (ou nós da malha) que proporcionam uma cobertura adequada de sinal por uma determinada área. Para a maioria das aplicações interpreta-se como definição de cobertura adequada o alcance de um nível de comunicação a uma taxa mínima de dados pré-estabelecido [21].

4.2. CLASSIFICAÇÃO

As ferramentas tipo *Wireless Survey* podem, de maneira geral, ser classificadas em três abordagens diferentes: passiva, ativa e preditiva [22]. Os subcapítulos a seguir explicam detalhadamente cada abordagem destacando as ocasiões em que cada uma é empregada.

4.3. ABORDAGEM PASSIVA

Durante uma abordagem passiva, a aplicação apenas coleta dados da rede *wireless* em dado ambiente. Informação dos pontos de acesso e suas características, potência do sinal, nível de ruído e interferências são alguns dos tipos de dados a serem coletados. O hardware requerido para tal análise se resume em um adaptador Wireless (podendo este ser o já existente na placa de rede *Wireless* do PC, quando analisados protocolos 802.11g/n) que não se conectará a rede pré-existente e não estará associado com a rede formada a ser analisada. Em outras palavras a ferramenta escuta passivamente o tráfego da rede. Esta abordagem é utilizada em casos de pós-implantação da rede no ambiente servindo para assegurar que o desempenho e a cobertura da rede sejam conforme os especificados [22].

A figura 11 ilustra a interface gráfica de uma aplicação de abordagem passiva desenvolvida para redes Wifi, desenvolvida pela empresa *Tamograph* [22]. Um dispositivo Wireless, ao ser conectado ao PC, coleta informações passivamente da rede; funcionando como uma espécie de analisador de espectro.

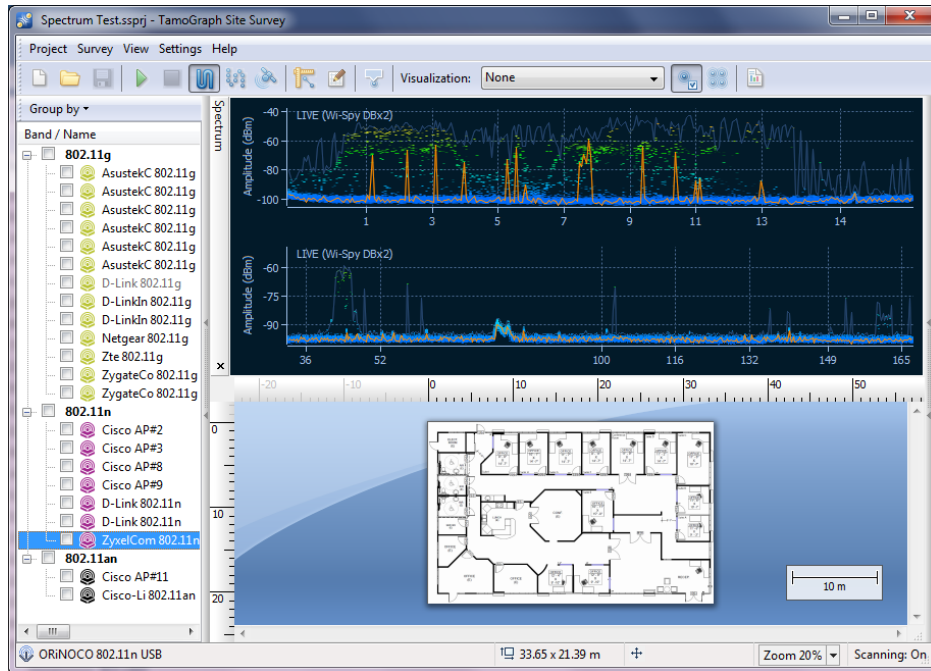


Figura 11 - Exemplo de interface passiva [22].

4.4. ABORDAGEM ATIVA

Durante uma abordagem ativa, o adaptador Wireless ligado ao PC se conecta com a rede formada, associando-se a um ou vários pontos de acesso. A aplicação, então, gera tráfego de rede para medir alguns parâmetros mais complexos como taxas de transferências reais, tempo de ida e volta de pacotes (*round trip time*), perda de pacotes e número de retransmissões. Levantamentos deste tipo são usados quando se é necessário diagnosticar de maneira mais aprofundada a rede já implantada (casos de redes em ambientes industriais complexos) [22].

A figura 12 ilustra a interface gráfica de uma aplicação de abordagem ativa desenvolvida também pela empresa *Tamograph*. Um dispositivo Wireless, ao ser conectado ao PC, coleta informações da rede durante o caminho indicado pelo mapa [22].

É importante destacar a tênue diferença entre as classificações passiva e ativa, uma vez que ela consiste basicamente na diferença dos parâmetros coletados (na abordagem ativa parâmetros mais complexos são coletados do que na passiva).

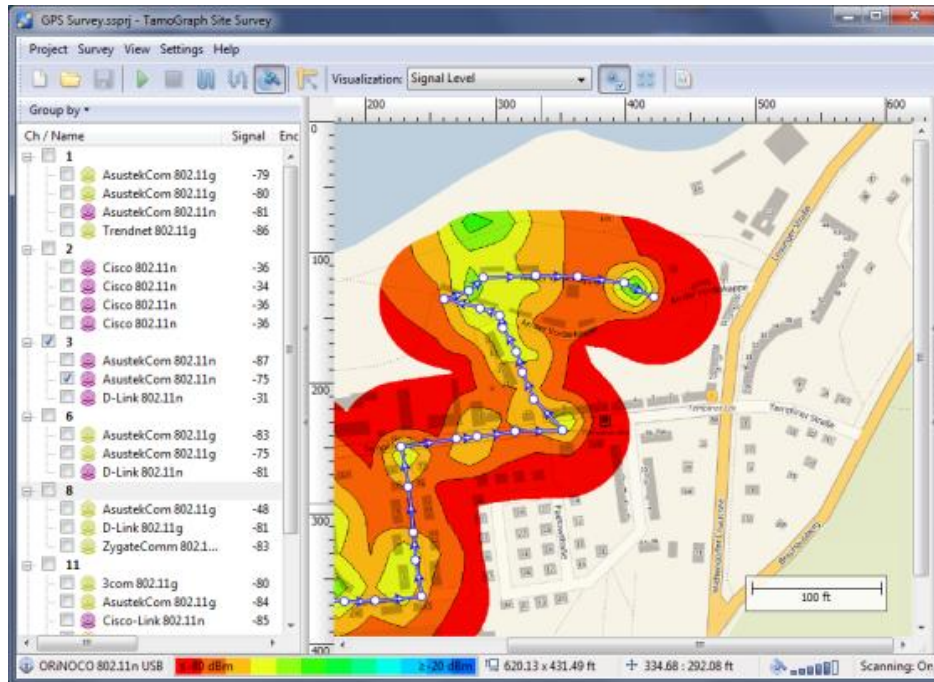


Figura 12 - Exemplo dos resultados obtidos após análise ativa [22].

4.5. ABORDAGEM PREDITIVA

Durante uma abordagem preditiva a aplicação é utilizada para planejar uma rede Wireless que ainda não foi desenvolvida (situação de pré-implantação). Ela pode ser feita de dois tipos: usando um simulador ou mapeando o ambiente diretamente (método *Onsite*).

4.5.1. USO DO SIMULADOR

Através do uso de uma ferramenta de simulação, gera-se um modelo do ambiente de rede capaz de indicar áreas de menor e maior atenuação do sinal. Para tanto, é necessário que os dados inseridos na simulação sejam fiéis à realidade, incluindo a localização e caracterização de quaisquer tipos de barreiras e obstáculos que possam vir a influenciar no desempenho da rede. Informações como planta baixa de prédios (para ambiente indoor) e fotos de satélites (para ambiente outdoor) são carregadas no software de simulação constituindo a base para os cálculos da simulação e posterior modelagem. Pontos de acesso virtuais são inseridos no simulador para estimar a cobertura esperada e ajustar sua quantidade e posição. Parâmetros usualmente levados em consideração por este tipo de abordagem através do simulador são: materiais da estrutura dos obstáculos físicos, área da planta, número

de usuários e de redes Wireless, tipos de aplicações desenvolvidas no ambiente, modelos de antenas e outros [22]. A figura 13 exemplifica este tipo de abordagem.

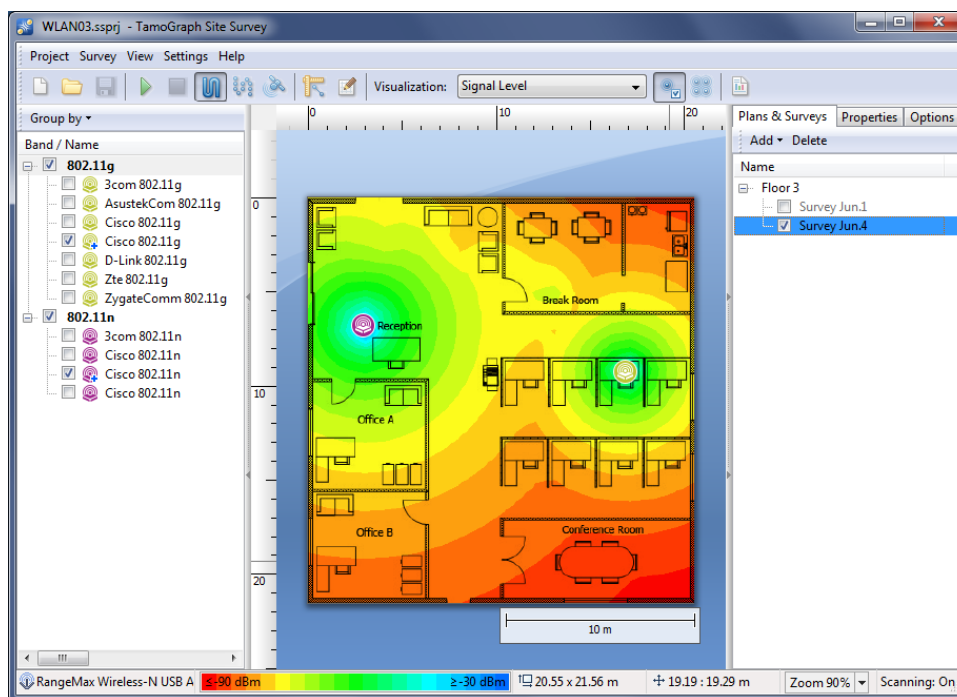


Figura 13 - Exemplo de interface preditiva realizada por simulador [22].

4.5.2. SISTEMA ONSITE

No contexto da rede apresentar alto grau de complexidade (uso constante de transferência de vídeos e imagens) ou apresentar altos níveis de interferência (como em ambientes industriais cuja presença de ruído eletromagnético devido a máquinas é muito intensa), esta abordagem é feita de modo *Onsite*, ou seja, é realizado um mapeamento real do ambiente por um profissional sem o uso de um simulador. No planejamento *Onsite* pontos de acesso reais, inseridos temporariamente no ambiente desejado, fornecerão a base de dados para análise das características de projeto da rede. Isso possibilitará a completa verificação do projeto no ambiente onde ela será inserida. Fatores como interferências, variações climáticas e ruídos (que atuam de forma dinâmica) podem apenas ser medidas de maneira *Onsite*, uma vez que este método pode identificar quaisquer dispositivos que venham a causar interferências [22]. Por outro lado, o simulador preditivo levará em conta as informações da planta no ambiente, identificando como fatores somente as barreiras estáticas; paredes e muros. Através do método *Onsite* um projeto de rede mais adequado poderá ser executado, porém com um custo mais alto. Para se ter uma ideia, o custo de realização deste serviço fica na faixa de

\$2500,00 até \$10000 por edificação, dependendo de fatores como setores a serem analisados, tamanho da mesma e atividade desejada da rede [23]. A figura 14 ilustra a maneira como esta abordagem é feita.



Figura 14 - Exemplo de estrutura empregada em Survey tipo Onsite [23].

De maneira a alcançar um desempenho adequado com a ferramenta e propiciar a rede uma análise da qualidade de serviço desejada, é necessário indicar alguns parâmetros e métricas capazes de traduzir em valores numéricos o real desempenho da rede em determinado local. O estudo das métricas utilizadas pela ferramenta é de suma importância, pois, entre outras coisas, são através delas que se torna possível à detecção e a presença de interferência RF vindo de outras fontes. O próximo capítulo detalha e apresenta as métricas comumente utilizadas para este tipo de diagnóstico.

5. MÉTRICAS PARA AFERIÇÃO DE QUALIDADE

Para a determinação da qualidade de um enlace *Wireless*, deve-se assegurar que funcionalidades como roteamento inteligente, controle de potência, balanceamento de carga e seleção de frequência funcionem corretamente.[24].

Vlavianos sugere em seu trabalho sobre protocolos baseados na norma IEEE 802.11, a determinação da qualidade do enlace através do constante diagnóstico de quatro métricas primárias, que são o *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), o *Signal to Noise Ratio* (SINR), o *Packet Delivery Ratio* (PDR) e o *Bit Error Rate* (BER). Segundo o autor, estas são as métricas primárias de análise, das quais se derivam tantas outras existentes, como EAR, ETX e LQI, por exemplo [24].

Mohamed sugere em seu trabalho sobre protocolos baseados na norma IEEE 802.15.4, a análise de degradação do desempenho da rede por interferência na banda ISM através de três métricas: RSSI, PER e o LQI [20]. Em seu trabalho foi analisado a coexistência de uma rede Wifi com uma rede Zigbee.

Nos subcapítulos seguintes as métricas para diagnóstico de módulos de comunicação baseadas na norma IEEE 802.15.4 são explicadas de maneira mais detalhada, relacionando-as e comparando-as com as outras métricas existentes.

5.1. INDICADOR DA POTÊNCIA DO SINAL RECEBIDO (RSSI)

É a relação de intensidade do sinal recebido. É um valor adimensional, que representa a intensidade do sinal na antena do receptor no momento de recepção de pacotes. O RSSI é função da potência transmitida e da distância entre o transmissor e receptor, sendo que seu valor é diretamente proporcional a potência e inversamente proporcional à distância.

Os valores variam de zero até R_{MAX} ; sendo que o máximo valor depende do chipset do *wireless card*. A especificação de cada *hardware* fornece a fórmula para traduzir o valor de RSSI em valores de potência (dBm).

O RSSI só é medido durante a recepção de um pacote de preâmbulo, que é transmitido apenas a uma taxa mais baixa. Assim, o RSSI é ineficaz em caracterizar a qualidade do enlace a altas taxas de transmissão. Em consequência deste fator esta métrica não consegue capturar flutuações de interferência [24].

5.2. TAXA DE ERRO DE PACOTES (PER)

O padrão IEEE 802.15.4 indica a utilização de pacotes para todos os modos de comunicação existentes, sendo o PER, portanto, uma poderosa métrica de diagnóstico. É uma medição realista do verdadeiro desempenho RF, por refletir o nível do sistema atual e o nível de desempenho do enlace sendo muito empregada em análises de casos de coexistência (ver [25] e [26]).

5.3. TAXA DE PACOTES RECEBIDOS (PDR)

O PDR, taxa de pacotes entregues, consiste basicamente na relação do número de pacotes enviados pela fonte com o número de pacotes recebidos no destinatário. Ele é altamente dependente do tamanho do pacote e da taxa de transmissão [24]. É calculado da seguinte maneira [19]:

$$PDR = \frac{\text{número de pacotes recebidos}}{\text{número de pacotes enviados}}$$

É a métrica mais popularmente utilizada para obter a qualidade do enlace. O produto do PDR com a taxa de transmissão fornece uma estimativa para o rendimento do enlace [24].

5.4. INDICADOR DA QUALIDADE DO ENLACE (LQI)

O LQI é um parâmetro de qualidade do sinal da rede. O seu cálculo é feito por uma primitiva já implementada na memória ROM do hardware utilizado (no caso deste trabalho o MC13224) e consiste na expressão abaixo:

$$\begin{aligned} DAGC\ RSSI = & Cal\ factor_{dB} - LNA_{min}gain_{dB} - lnastate \\ & * (LNA_{max}gain_{dB} - LNA_{min}gain_{dB}) + IFA_{max}gain_{dB} - 3 * ifastate \\ & + rx_dagcgain_{state} \end{aligned}$$

Nesta equação, o lado da igualdade que envolve operações como ganho máximo e ganho mínimo do amplificador de baixo ruído ($LNA_{min}gain_{dB}$ e $LNA_{max}gain_{dB}$), assim como ganho máximo da antena impressa tipo F ($IFA_{max}gain_{dB}$) é igualada ao RSSI com ganho controlado ($DAGC\ RSSI$). Este último parâmetro é utilizado para computar o valor do LQI da última mensagem recebida.

A função *MLMELinkQuality* (ver capítulo 3.5), utilizada na aplicação, lê a indicação de qualidade do enlace para a última mensagem recebida. Ela consiste em um valor inteiro, cuja faixa nominal se encontra entre 0x00 (mínimo) e 0xFF (máximo); onde 0x00 representa -100 dBm e 0xFF representa -15dBm. Para obtenção desta relação em dBm, o valor retornado pela função do SMAC deve ser manipulado da seguinte maneira [27]:

$$LQi(dBm) = \left(\frac{LQI(dec)}{3} \right) - 100$$

Para entender o conceito de LQI, é importante saber suas diferenças e relação com o parâmetro RSSI.

5.5. COMPARAÇÃO LQIXRSSI

Uma coisa a se ter em mente, quando se comparam estas métricas, é que o RSSI funciona apenas como uma indicação da energia RF detectada na porta de entrada da antena. Desta maneira ela poderá ser alta se for incluída à porta a seguinte soma:

$$RSSI = energia\ de\ ruído + interferências + energia\ do\ sinal$$

Portanto, esta situação se torna pior em um ambiente propenso à interferência, onde é possível obter valores consistentemente altos de RSSI apresentando ao mesmo tempo erros de comunicação também comuns em valores baixos de RSSI [28]. Enfim, o RSSI apenas indica a intensidade do sinal, não se preocupando com a correção do mesmo.

O parâmetro LQI, por sua vez, indica se o sinal está correto ou não. Tomando como parâmetro para análise os valores de LQI em dBm, pode-se afirmar que um valor alto deste indicador (próximo de -15dBm) sugere uma maior qualidade do enlace, enquanto um valor baixo (próximo de -100dBm) sugere uma menor qualidade do enlace.

Um sinal de grande intensidade, por exemplo, é comumente menos afetado por ruído e, desta maneira, ele será visto de uma forma mais “limpa” ou mais correta pelo receptor indicando um alto LQI. Esta métrica dá uma estimativa de o quão fácil um sinal recebido pode ser demodulado pela acumulação da magnitude do erro entre constelações ideais e o sinal recebido sobre os 64 símbolos seguidos imediatamente pela palavra *sync*. É importante destacar que este parâmetro é dependente do formato de modulação [29].

Há cinco casos extremos que podem ser citados para ilustrar como o LQI e o RSSI funcionam [30]:

1. Um sinal fraco na presença de ruído indicará um baixo RSSI e baixo LQI.
2. Um sinal fraco em “total” ausência de ruído indicará um baixo RSSI e alto LQI.
3. Um sinal na presença de um ruído muito forte, usualmente vindo de uma fonte de interferência, indicará alto RSSI e baixo LQI.
4. Um sinal forte com pouca presença de ruído indicará alto RSSI e alto LQI.
5. Um sinal muito forte que ocasiona a saturação do receptor indicará um alto RSSI e baixo LQI.

A medição do LQI se dá utilizando um receptor ED (*Energy Detector*), um estimador da relação sinal ruído ou da combinação entre os dois [13]. Os valores mínimos e máximos de LQI devem ser associados com os valores limites dos sinais que podem ser detectados pelo receptor, isto é, devem ser compatíveis com sua sensibilidade; que no caso do MC13224 é -15dBm e -98dBm.

É importante salientar que a métrica LQI deve ser relacionada com o sucesso do recebimento de pacotes em um enlace, ou seja, um valor baixo de LQI indica uma forte tendência de maior número de perdas de pacotes do que um valor alto de LQI.

6. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O projeto pode ser dividido em duas etapas: a de desenvolvimento do firmware dos módulos de comunicação e a de desenvolvimento do software que realiza a interface com o usuário.

Os subcapítulos que seguem explicam o desenrolar do projeto, explicitando sua motivação e seus objetivos, fatores decisivos para escolha do hardware e da metodologia empregada.

6.1. OBJETIVO DO PROJETO

O projeto desenvolvido consiste na criação de uma ferramenta de suporte de baixo custo para redes sem fio (*Wireless Survey*), ao propor o monitoramento da qualidade do sinal enviado e recebido de rádios transceptores na frequência de 2405 a 2480 MHz que utilizam sua camada física baseada na norma IEEE 802.15.4 em 2,4GHz.

Por incumbir ao projeto este objetivo, definiram-se para a ferramenta as seguintes características e funcionalidades:

- contabilização dos pacotes recebidos em determinado ambiente, calculando a taxa destes por minuto;
- cálculo do LQI dos pacotes recebidos pelo nó mestre quando enviados pelo nó escravo e transmitidos pelo nó escravo para o nó mestre em determinado canal de comunicação;
- monitoramento do indicador LQI dos pacotes recebidos para diferentes canais de comunicação ao longo do tempo (função de varredura multicanal);
- controle dos parâmetros taxa de aquisição de pacotes, potência irradiada e canal de comunicação;
- aquisição, em coordenadas geográficas absolutas, da localização dos nós que compõe o sistema;

Uma vez definidos os requisitos do projeto, partiu-se para a etapa de caracterização dos materiais e dos métodos a serem utilizados.

6.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Como maneira eficaz de monitorar a qualidade de comunicação entre rádios de uma rede WH, decidiu-se formar uma topologia em estrela independente da rede de automação industrial existente (ou a existir) utilizando módulos de comunicação reais (abordagem preditiva *Onsite* do ambiente) fabricados exclusivamente para a própria ferramenta desenvolvida. As figuras 15 e 16 ilustram um dos tipos de módulos de comunicação utilizados pela aplicação desenvolvida, destacando a utilização de um nó mestre e de até cinco nós escravos.



Figura 15 - Nó mestre da rede posicionada em tripé.

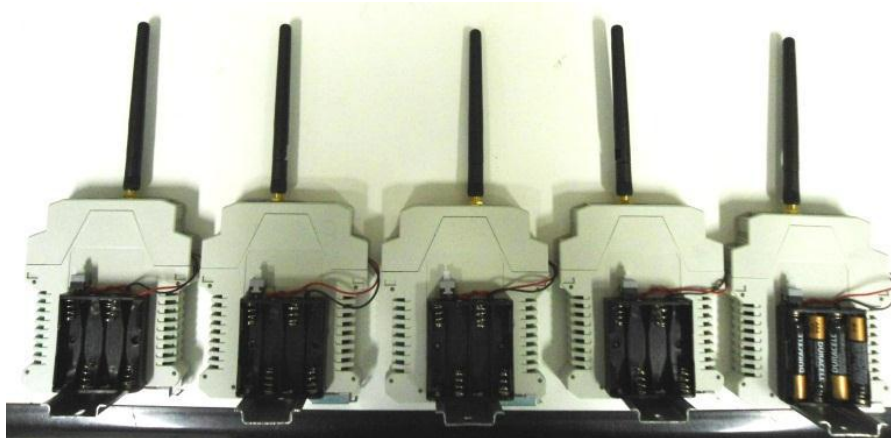


Figura 16 - Dispositivos finais ou nós escravos da rede.

Inserem-se estes módulos no ambiente industrial nas localidades onde se deseja obter a qualidade do sinal. Obtém-se assim o desempenho dos rádios em determinado local através da leitura dos pacotes com informação da qualidade do link e da perda de pacotes. Analisa-se então se determinado ponto é adequado ou não para colocação de um dispositivo de campo, roteador ou ponto de acesso, de acordo com os parâmetros levantados - se o ponto propiciar um alto valor da qualidade do link e alto valor de pacotes recebidos por minuto realiza-se, conseqüentemente, a instalação do dispositivo comercial no local analisado. Se o ponto oferecer má qualidade de comunicação (apresentando obstáculos físicos que bloqueiam o enlace) e, por conseguinte, baixo valor de LQI e baixa taxa de pacotes recebidos realiza-se então a realocação dos roteadores e/ou pontos de acesso e, quando possível, do próprio dispositivo de campo para pontos mais adequados. Destaca-se a necessidade de um estudo posterior para definição de valores adequados de pacotes recebidos por minuto pela metodologia empregada, que não está associada com o PDR e nem com o PER.

Com a metodologia de análise definida partiu-se para a escolha dos materiais a serem utilizados, ou seja, as especificações dos módulos de comunicação que fariam a composição da rede independente a ser inserida nos ambientes industriais.

Por se tratar de uma topologia do tipo estrela, definiu-se para a rede a utilização de quatro módulos escravos somados a um módulo mestre, sendo possível expandir o sistema, se necessário, para até cinco módulos escravos. Desta maneira, torna-se possível o monitoramento da qualidade do sinal de comunicação para até cinco pontos distintos simultaneamente.

Para a escolha do hardware dos módulos, atentou-se para os requerimentos já definidos ao sistema como, por exemplo, a necessidade da frequência ser na faixa de 2,4GHz.

Além disso, por a ferramenta focar na análise do desempenho de redes de automação em ambiente industrial, que utiliza como base para sua camada física o padrão IEEE 802.15.4 2006 2,4GHz DSSS, imprimiu-se a necessidade dos módulos suportarem o mesmo padrão, isto é, de eles possuírem transceptores com camada física IEEE 802.15.4.

Características como potência de transmissão dos rádios programável por pelo menos de -10dBm a 10dBm e da frequência de comunicação ser dividida em 16 canais com intervalo de 5MHz entre dois canais adjacentes com o canal 26 não utilizado, são traços próprios de protocolos de automação industrial (mais especificamente o WH) e, portanto, do sistema desenvolvido.

O projeto foi desenvolvido em um laboratório de pesquisa de redes sem fio, o que possibilitou, por questões de praticidade, a escolha de módulos de comunicação já existentes, uma vez que os mesmos cumpriam com os requisitos estabelecidos. Utilizaram-se três tipos diferentes de módulos para formação de diferentes topologias de rede (conjunto do rádio mestre somado aos rádios escravos), que foram:

1) Kit Freescale MC1322x:

Kit de desenvolvimento que opera no padrão IEEE 802.15.4 e possui um microcontrolador da família ARM (MCU 13224 da Freescale). Para gravação de seu firmware utiliza-se o IDE (Integrated Development Environment) da IAR Systems. Possui conexão de programação e depuração JTAG. Suas principais características são:

- Dispositivo sem fio 2,4GHz.
- Baseado na plataforma MC13224V, possui transceptor IEEE 802.15.4.
- Processador 32 bit ARM7, 128Kbyte Flash, 96Kbyte RAM e 80Kbyte ROM.
- Dois módulos UART dedicados com taxa de 2Mbps e suporte CTS/RTS.
- Cristal Oscilador de 32,768 KHz.
- Sem componentes externos de RF; antena F impressa no circuito.
- Conexão de programação e depuração JTAG;
- Porta USB para interface dos módulos UART com o PC.
- Joystick, botões e leds para monitoramento e demonstração.
- Tensão de operação de 2 a 3,6VDC;
- Faixa de temperatura: -40°C a 105°C;



Figura 17 - Kit de desenvolvimento da empresa Freescale.

2) Rádio Protótipo COESTER:

Módulo de comunicação para válvulas que opera no padrão IEEE 802.15.4 com microcontrolador MCU13224 da Freescale. Principais características:

- Dispositivo sem fio 2.4GHz.
- Baseado na plataforma MC13224V, possui transceptor IEEE 802.15.4.
- Processador 32 bit ARM7, 128Kbyte Flash, 96Kbyte RAM e 80Kbyte ROM.
- Dois módulos UART dedicados com taxa de 2Mbps e suporte CTS/RTS.
- Cristal Oscilador de 32.768 KHz.
- Amplificador de RF 100mW com saída SMA.
- Conexão de programação e depuração JTAG.
- Comunicação RS485 dos módulos UART (necessário conversor RS485-USB para interface com PC).
- Módulo GPS ME1000RW integrado de 3.3 a 6VDC (opcional).
- Leds para monitoramento e demonstração.
- Tensão de operação de 5 a 9VDC (com GPS até 6VDC).
- Faixa de temperatura: -40°C a 105°C;

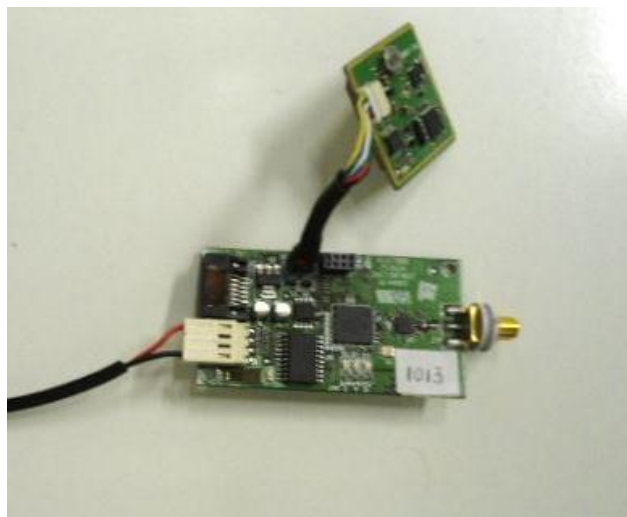


Figura 18 - Módulo de comunicação fabricado pela empresa COESTER.

3) Rádio NOVUS:

Módulo de comunicação para válvulas que opera no padrão IEEE 802.15.4 com microcontrolador MCU13224 da Freescale. Principais características:

- Dispositivo sem fio 2,4GHz.
- Módulo ZFSM-201-1 da CEL, baseado na plataforma MC13224V com transceptor IEEE 802.15.4 combinado com PA (Power Amplifier) de 100mW.
- Processador 32 bit ARM7, 128Kbyte Flash, 96Kbyte RAM e 80Kbyte ROM.
- Dois módulos UART dedicados com taxa de 2Mbps e suporte CTS/RTS.
- Cristal Oscilador de 32.768 KHz.
- Conector opcional MMCX para antena externa de 50 ohms.
- Potência de transmissão 100mW.
- Sensibilidade de recepção de -98dBm.
- Conversor AD de 21 bits.
- Tensão de operação de 2 a 3,6VDC.
- Porta USB para interface dos módulos UART com o PC.
- Leds para monitoramento e demonstração.



Figura 19 - Módulo de comunicação fabricado pela empresa NOVUS.

Todos os módulos de comunicação utilizados possuem o microcontrolador MC13224V da fabricante *Freescale Semiconductors* em comum. O desenvolvimento do firmware foi feito diretamente para este microcontrolador, sendo de grande importância o entendimento do seu funcionamento e suas restrições.

A família MC13224x MCU é uma plataforma que incorpora um transceptor de rádio frequência de baixo consumo na faixa de 2,4GHz. Seu processador é um ARM7TDMI de núcleo 32 bits, possuindo aceleradores de hardware para o padrão IEEE 802.15.4 MAC e AES128 security. O núcleo de processamento opera para valores de até 26MHz. O MCU13224V, destina sua memória FLASH de 128Kbytes espelhada em 96Kbytes de memória RAM a aplicações de alto nível e aplicações de software. Somado a isso, possui memória ROM de 80 kbytes para o software de inicialização e para o software da pilha de comunicação [31].

6.3. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

Para fazer o processamento dos dados recebidos pelos dispositivos finais da rede e também sua posterior visualização desenvolveu-se uma interface gráfica utilizando a linguagem de programação C++ e o software de desenvolvimento *C++Builder 6*. Este ambiente de desenvolvimento possui programação orientada a objetos e a utilização de VCLs, bibliotecas de componentes visuais que podem ser adicionadas ao projeto, objetivando o complemento de funcionalidades, como a conexão serial e a biblioteca gráfica [15].

A figura 20 exibe a organização da rede desenvolvida, onde todas as informações convergem para o nó mestre que se comunica com o PC, através de uma interface serial. O programa recebe as informações via comunicação serial pelo nó mestre, que consistem nos valores de LQI medidos, nas coordenadas geográficas de localização dos nodos e no número de pacotes recebidos pelos nós escravos. Esses valores são traçados em tempo de execução pela aplicação gráfica, de forma a se obter curvas, mapas e gráficos para os diferentes nós escravos.

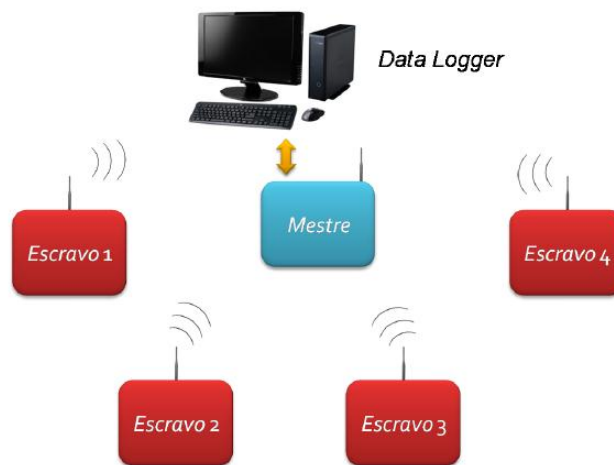


Figura 20 - Topologia da rede e convergência dos dados para PC.

O software possibilita ao usuário controlar e acionar parâmetros dos rádios, como velocidade de aquisição e transmissão de dados, potência de irradiação das antenas e o canal de comunicação (ver quadro *Commands* do software na figura 22); utilizando para isso uma interface de comunicação serial a uma taxa de 115200bps. Ele mostra através de gráficos bidimensionais os valores de LQI de recepção e transmissão de cada dispositivo separadamente para um canal fixado pelo usuário. É possível também monitorar com a funcionalidade de varredura multicanal do software a qualidade do sinal para um dispositivo nos 15 canais diferentes. Para esta finalidade criou-se o gráfico tridimensional, com o eixo x temporal, eixo y LQI e eixo z valores os discretos dos canais. Com o software também é possível localizar os rádios no plano geográfico, utilizando-se para isso o programa *Google Earth* e o módulo GPS acoplado ao rádio.

As funções do aplicativo criado consistem basicamente em analisar o local onde os rádios serão posicionados e verificar a presença de interferências externas à rede criada. Com esta ferramenta é possível através do LQI identificar o real efeito de variação do enlace

devido a obstáculos da rede sem fio, para então, no plano geográfico, buscar o mais adequado local de instalação e canal de comunicação dos pontos de acesso.

Além de utilizar os valores de LQI recebidos e transmitidos como parâmetros de análise, são implementados novas funcionalidades que estão divididas por diferentes janelas ou abas.

6.3.1. Janela Qualidade do Link

Nesta janela é plotado o gráfico de LQI transmitido e recebido para cada dispositivo em função do tempo. A faixa nominal é definida como sendo de -98dBm à -15dBm, limitações estas impostas pela sensibilidade de recepção do microcontrolador MC13224x. A figura 21 ilustra a janela de aquisição de LQI.

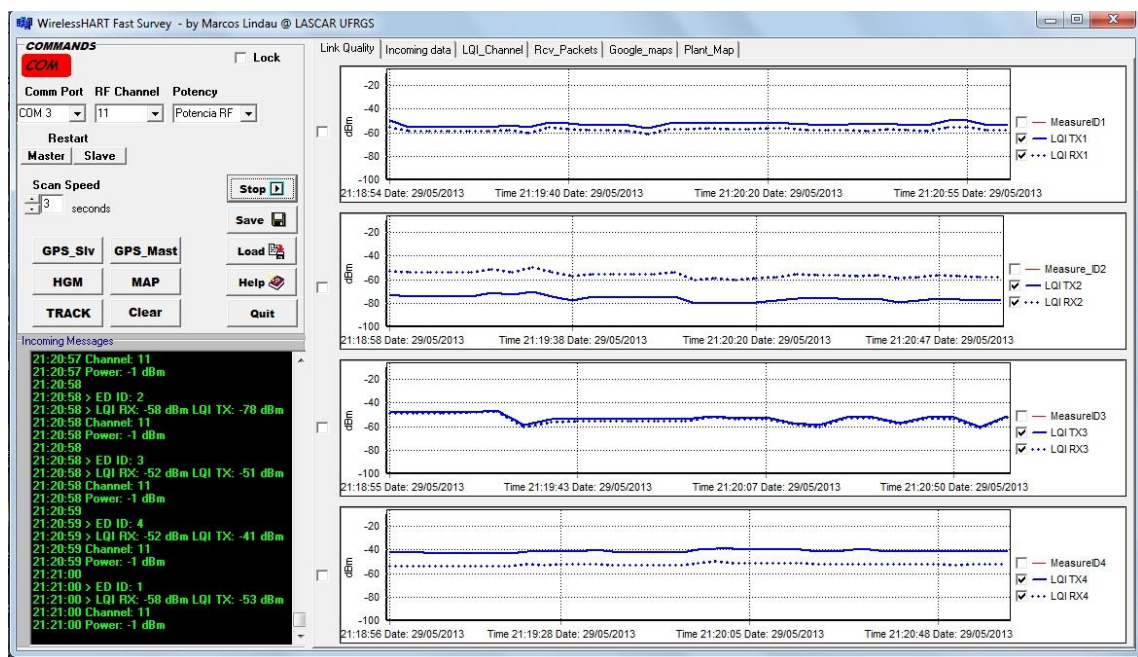


Figura 21 - Janela de monitoramento do LQI_RX e LQI_TX.

Os valores de LQI, nesta aba representada, além de serem úteis no monitoramento da qualidade de redes sem fio encontram aplicação na determinação de modelos do cálculo de perda da intensidade do sinal em função da distância entre os rádios (utilidade na qual o software já foi utilizado).

6.3.2. Janela de Dados Recebidos

Nesta janela todos os dados recebidos (LQIs e taxa de pacotes recebidos) são mostrados separadamente. Desta maneira o usuário poderá visualizar e salvar os dados em arquivos separados e em formato compatível com programas editores numéricos (Excel, *LibreOffice Calc*, etc.) uma vez que cada valor é escrito separado por um identificador (string “/”). A figura 22 ilustra a janela de dados recebidos.

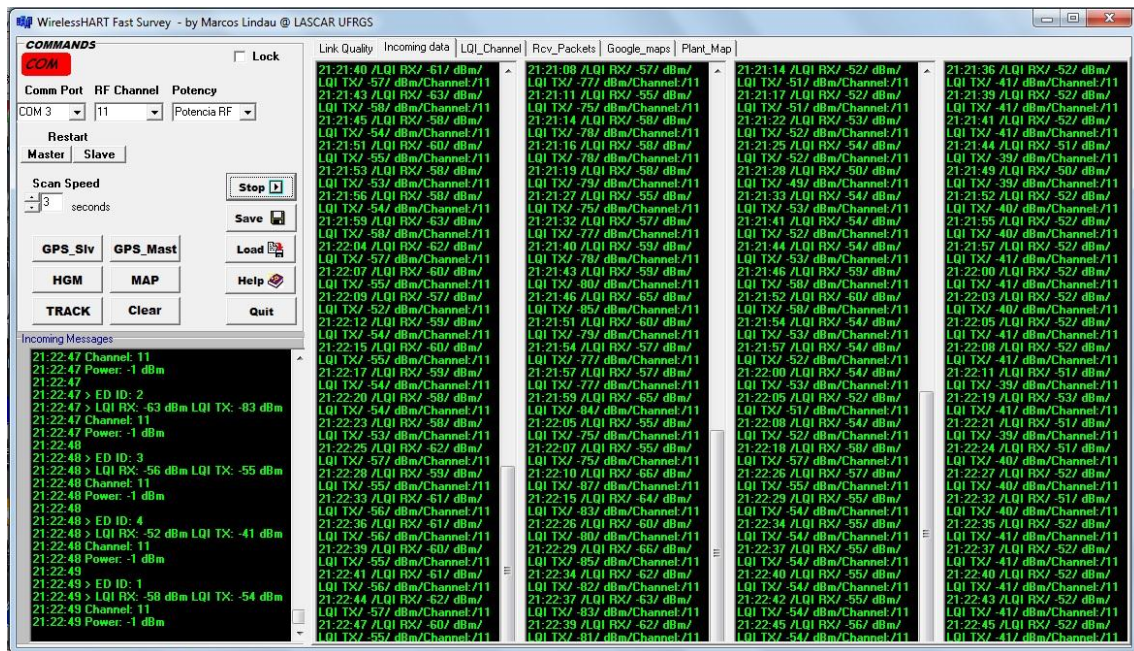


Figura 22 - Janela de dados recebidos para cada dispositivo.

6.3.3. Janela Qualidade do Link por Canal

Nesta janela é plotado um gráfico tridimensional no formato “*WaterFall*”, em que valores baixos de LQI são representados por tonalidades de cores mais próximas do azul e valores altos do módulo de LQI são representados por tonalidades de cores mais próximas do vermelho. O eixo das abscissas corresponde ao número de amostras recebidas, das ordenadas o valor de LQI recebido e o eixo z representa os 15 canais de atuação da rede no espectro. O objetivo desta funcionalidade era, inicialmente, identificar e medir possíveis fontes de interferências à rede. Contudo, como posteriormente será visto nos testes realizados (capítulo 7), verificou-se a inadequação desta métrica para esta finalidade, tornando-a dispensável para versões posteriores do software. A figura 236 ilustra o gráfico obtido. É plotado um gráfico para cada dispositivo escravo.

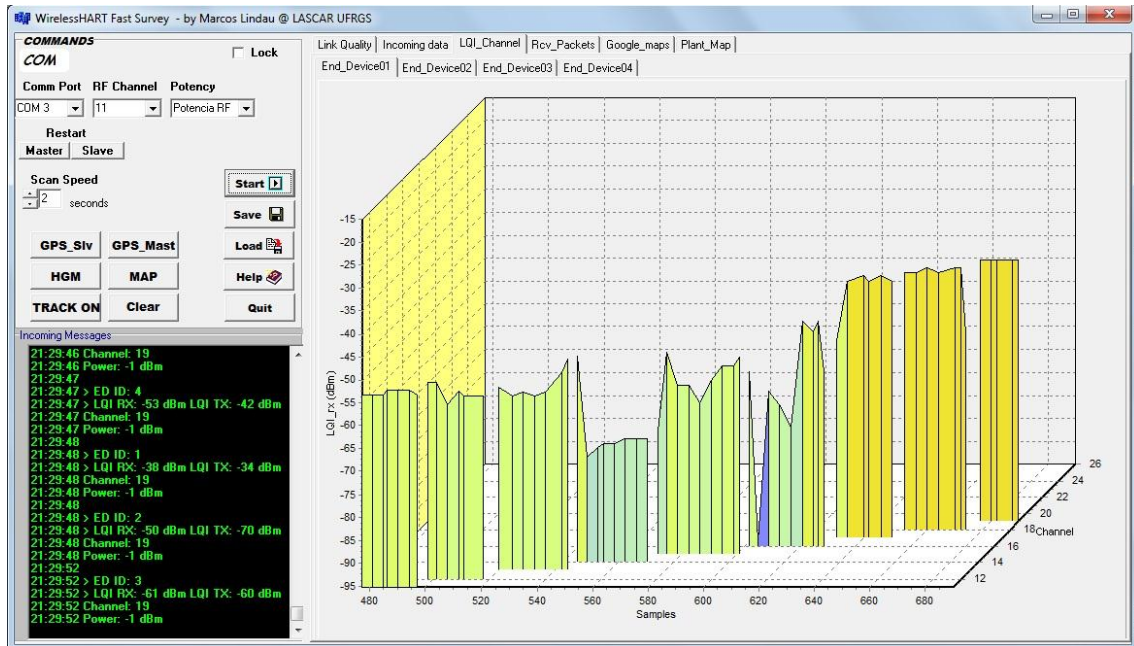


Figura 23 - Software representando o gráfico de amostras por LQI_RX por canal.

6.3.4. Janela Mapa da Planta Industrial

Nesta janela é representada a localização geográfica dos dispositivos no ambiente. Os módulos de GPS acoplados nos rádios informam ao nó mestre sua posição em coordenadas absolutas, este por sua vez gera um arquivo de códigos (.kml) que é lido pelo software *Google Earth*. O resultado é apresentado na figura 24. É importante destacar que esta funcionalidade só funciona em ambientes *outdoors*, uma vez que os módulos dos GPS precisam ter visibilidade para com os satélites.

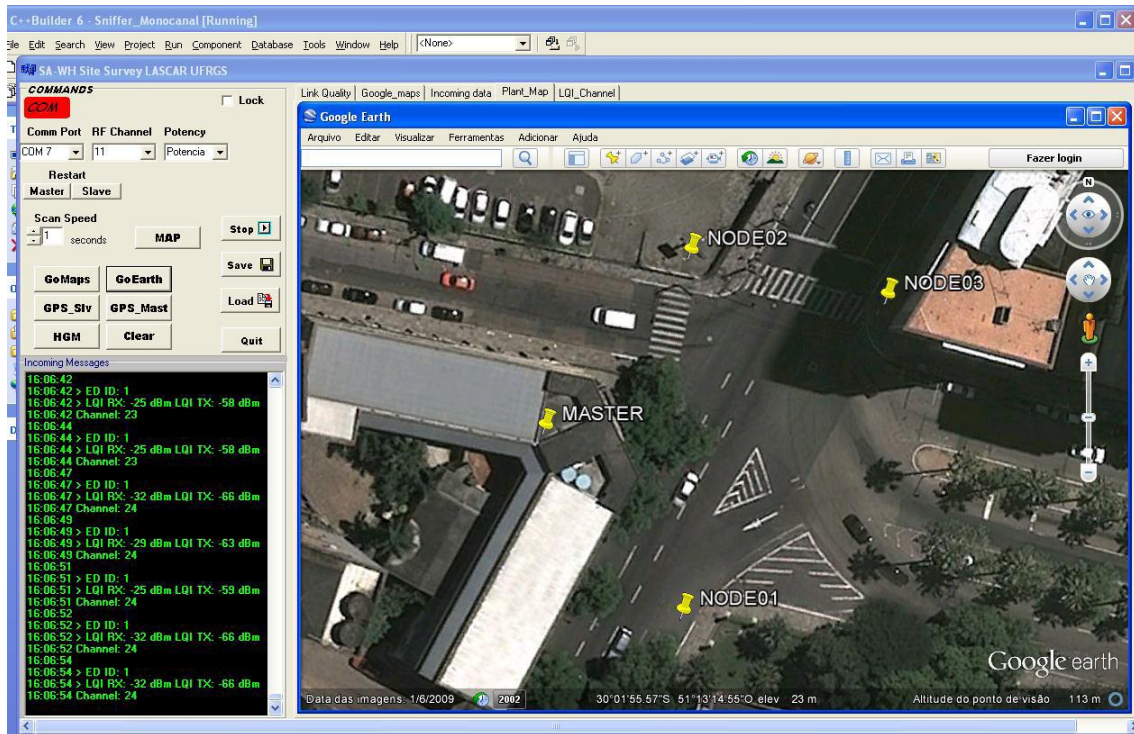


Figura 24 - Janela de visualização dos dispositivos no plano geográfico.

6.3.5. Janela Pacotes Recebidos

Nesta janela são contados os pacotes recebidos por dispositivo. Para cada dispositivo é analisado separadamente o acúmulo de pacotes recebidos por dispositivo em função do tempo, conforme representado na figura 25.

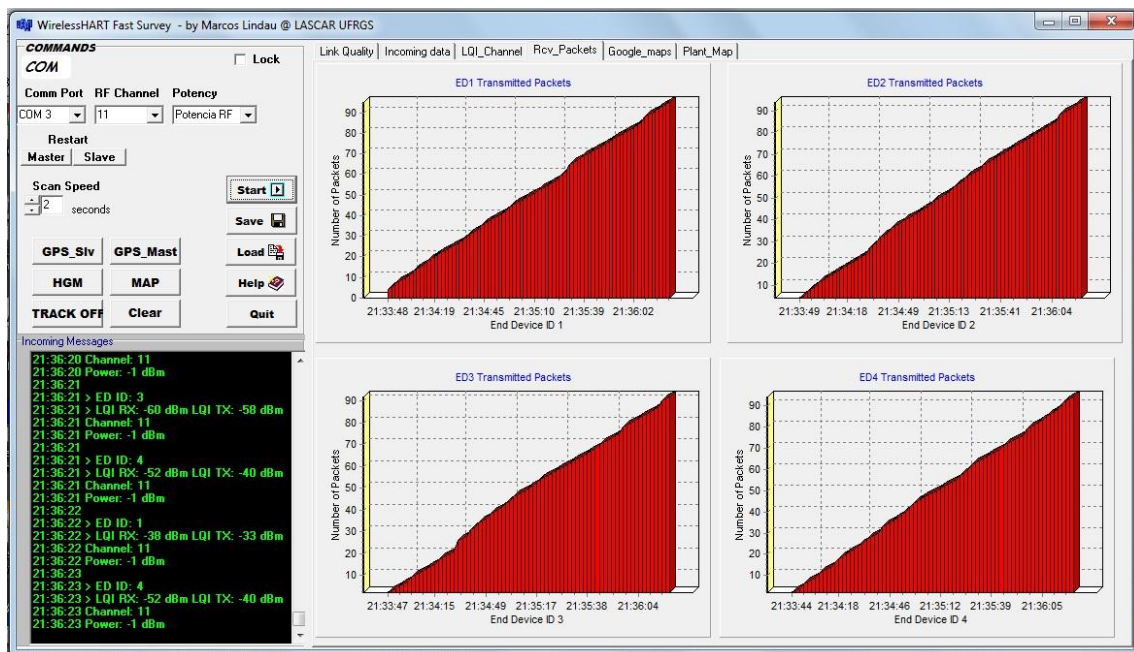


Figura 25 - Janela de contabilização dos pacotes recebidos.

O valor de pacotes recebidos é definido por um limiar máximo definido pelo nó mestre. O preenchimento do registrador, representado em vermelho pelos gráficos, ocorre até que seja alcançado este limiar. Quando isso ocorre este registrador é zerado dando início então a um novo ciclo de contabilização de pacotes. A cada ciclo que se inicia é disparado um cronometro regressivo de 60s, que tem a finalidade de a cada comando de *timeout* capturar a taxa de pacotes recebidos por minuto.

É relevante destacar que esta métrica é provisória (utilizada, como será visto posteriormente, para fins de comparação no teste com interferência), uma vez que não está padronizada como métrica de análise de redes sem fio. Para conclusões mais relevantes sobre desempenho de redes, deverão ser utilizadas futuramente métricas como PER ou PDR.

6.3.6. Janela de Ajuda

Pelo software apresentar um grau de complexibilidade razoável para sua utilização, criou-se um comando *Help* na interface que cria uma janela de instruções gerais para o uso do aplicativo. Ela explica ao usuário os procedimentos necessários a serem tomados passo-a-passo para iniciar a o processo de aquisição dos dados e rodar a aplicação. A janela é representada na figura 26.



Figura 26 - Janela de ajuda, explicando passo a passo os procedimentos.

6.4. DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE

Para implementação das instruções do funcionamento dos módulos de comunicação utilizou-se o IDE (Integrated Development Environment) da IAR Systems, o programa *IAR Embedded Workbench*. Este software é um compilador e depurador C/C++ de alto desempenho baseado em aplicações para microcontroladores de 8-, 16-e 32- bits. A ferramenta permite ao usuário desenvolver aplicações para novos produtos. No caso do projeto desenvolvido, utilizou-se o software para a arquitetura de chips ARM, pois o microcontrolador dos hardwares utilizados é um ARM7 de 32 bits.

Para desenvolvimento do firmware a ser gravado no SoC foi utilizada a linguagem de programação ANSI C na plataforma de desenvolvimento do software *IAR Embedded Workbench*, que permite carregar os comandos no circuito integrado (embarcar o software no dispositivo) e utilizar funcionalidades de depuração do código com a interface física JTAG.

Partiu-se de um firmware de referência fornecido pela própria *Freescale*, que disponibiliza o código base com as bibliotecas e premissas necessárias para acessar e editar as funcionalidades dos rádios.

6.4.1. Estrutura de dados do Quadro de troca de Mensagens

A comunicação da rede formada se dá de três maneiras:

- Envio de dados do nó mestre aos nós escravos;
- Envio de informações dos nós escravos ao nó mestre;
- Envio de informações do nó mestre ao PC via UART2 (rádio COESTER).

Todos os pacotes são enviados e transmitidos dentro do campo de *payload* do quadro da camada física, apresentado na Tabela 2. Quando a aplicação requisitar (como no uso dos módulos de GPS) o tamanho do pacote pode ser aumentado, adicionando-se mais informações após o byte de número.

O envio e recebimento de pacotes entre os módulos de comunicação seguem a organização definida pela tabela 6.

Tabela 6 - Organização da estrutura dos dados de mensagens do SMAC.

Instruções para uso da estrutura de mensagens				
	TX	RX	ED	TO
U8Status	Tipo de mensagem e estado			
pu8Buffer	Local dos dados a serem transmitidos	Local dos dados a serem recebidos	Endereço que guarda o valor do ED	Valor de Timeout
u8BufSize	Tamanho em bytes do Buffer a ser transmitido	Número de bytes recebidos	Canal para acesso do ED	
cbDataIndication	Callback a ser executado quando a ação de requisição termina			

Todos dados a serem transmitidos, seja do nó mestre aos nós escravos ou dos nós escravos ao nó mestre, são previamente guardados no *buffer* de transmissão indicado por *TX_msg.pu8Buffer*. Guardar dados neste *buffer* significa deixá-los pronto para o envio, uma vez que para iniciar a transmissão dos pacotes utiliza-se a macro pré-definida pelo SMAC denominada *MCPSDataRequest*. Da mesma maneira, todos os dados a serem recebidos devem estar indicados por *RX_msg.pu8Buffer*, que é seguido pelo comando de início da recepção de pacotes, pré-definida pela macro *MLMERXEnableRequest*. Os subcapítulos a seguir detalham qual o conteúdo das mensagens nas três modalidades de comunicação existentes.

6.4.2. Envio de dados do nó mestre ao nó escravo

A tabela 7 mostra como o funcionamento do buffer de transmissão e recepção do nó mestre (transmissor) para o nó escravo (receptor).

Tabela 7 - Quadro de envio do nó mestre ao nó escravo utilizando pu8Buffer.

0	1	2	3	4	5	6
NET_ID	ID do destino/remetente	Indicador Gateway	Próximo Canal	Canal Atual	Air Command	Nível de Potência

O byte 0 do quadro representa o identificador de rede sendo utilizado para a troca de pacotes. Para o correto funcionamento da aplicação todos os dispositivos devem estar configurados com o mesmo identificador de rede. O byte 1 contém o identificador único do rádio de destino da mensagem enviada, sendo um número inteiro de 1 a 5. O byte 2 contém o indicador da origem da mensagem, que pode ser de dois tipos: G (Gateway ou nó mestre) ou

E (dispositivo final ou escravo), neste caso ele será sempre G (pois o rádio mestre é o transmissor). Os bytes 3 e 6 são definidos pelo usuário via software, pois realizam as mudanças de canal de comunicação e a mudança da potência irradiada pelos rádios. O byte 5 é reservado para o envio de comandos aos rádios escravos, como renicialização e trocas de parâmetros, sendo esta a maneira pela qual o nó mestre controla a rede.

6.4.3. Envio de dados dos nós escravos ao nó mestre

A tabela 8 mostra o quadro enviado pelo nó escravo e recebido pelo nó mestre.

Tabela 8 - Quadro de envio do nó escravo ao nó mestre.

0	1	2	3	4	5	6	7...47
NET_ID	ID do destino/Remetente	Indicador End_device	Estado atual ED	Comando multicanal	Buffer LQI_Rx	Slave GPS	Buffer do GPS slave

O byte 2, desta vez, contém o indicador da origem da mensagem, que agora será sempre E (pois o rádio escravo é o transmissor). O byte 3 indica o estado atual do dispositivo escravo na máquina de estados e o byte 4 o canal atual de comunicação.

O byte 5 é reservado para o envio do resultado do cálculo de LQI pelo nó escravo, definido aqui como LQI_RX. Os outros bytes estão reservados para o envio de informações provenientes do módulo de GPS.

6.4.4. Envio de dados do nó mestre ao PC

A tabela 9 mostra o quadro enviado pelo nó mestre ao PC, destacando agora a utilização do quadro u8SerialFrame e da UART2 para transmissão dos dados (nos rádios da COESTER).

Tabela 9 - Quadro de envio do nó mestre ao PC

0	1	2	3	4	8-11	12	13
Start_of_data Frame	ID do destino/Remetente	LQI_TX	LQI_RX	Estado atual do ED	Pacotes Válidos ED(1-4)	Nível Potência	Canal Atual

São enviados ao PC pelo byte 2 e 3 os valores de LQI. O valor de LQI_TX é calculado pelo nó mestre sempre que este recebe um pacote do nó escravo sendo ele guardado no byte 2;

já o valor de LQI_RX corresponde a qualidade do pacote enviado pelo nó mestre na recepção do nó escravo. Do byte 8 ao 11 são guardadas o número de indicações de pacotes válidos que o nó mestre recebeu por cada escravo separadamente. Os valores de nível de potência e canal atual também são enviados ao software para fins de monitoramento.

6.4.5. Sistema de Geo-referenciamento

O módulo de GPS utilizado para o rádio da COESTER foi o ME-1000RW (figura 27). Este módulo é um receptor GPS com antena acoplada. A antena é conectada ao receptor através de um LNA. O receptor tem 51 canais de aquisição e 14 canais de rastreamento que são capazes de receber sinais de até 65 satélites GPS e informar a posição e o tempo precisos para serem lidos nas portas UART ou RS232 serial. O equipamento tem baixo consumo e a faixa de tensão suportada vai de 3,3V~6,0V. O conector possibilita a saída tanto em nível LVTTTL quanto em nível RS232 [32].

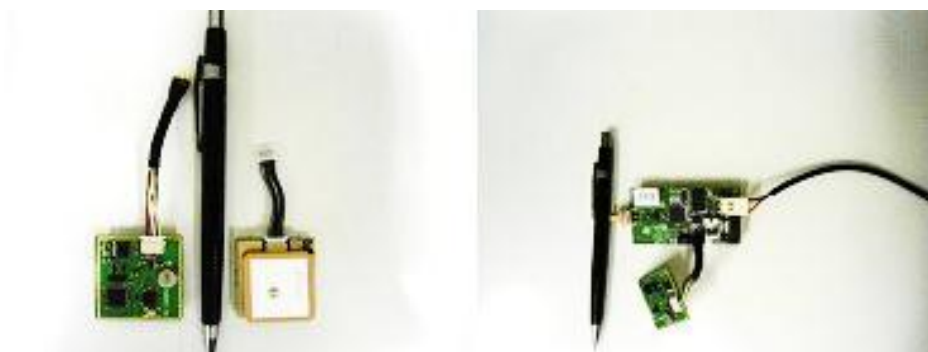


Figura 27 - Módulos de GPS utilizados.

O protocolo transmitido pela interface serial é baseado na especificação da interface da *National Marine Electronics Association's* NMEA 0183 ASCII. O padrão é definido na “NMEA 0183, Version 3.01” e pode ser obtido no site da NMEA. É importante observar, neste padrão, que as sentenças de localização transmitidas começam pelo símbolo ‘\$’ e são precedidas por sequencias como GPGGA, por exemplo. Por se tratar de uma estrutura fixa que se repete cada vez que o módulo transmite uma informação válida, pode-se usá-la como comando de início de leitura.

Abaixo é demonstrado um exemplo de estrutura NMEA:

- \$GPGGA,060932.448,2447.0959,N,12100.5204,E

Com a finalidade de precisar a posição geográfica de cada rádio em coordenadas absolutas modificou-se o firmware dos rádios para que os mesmos transmitissem via porta serial ao PC a sua localização quando requisitado. Isto foi feito criando funções específicas para leitura e escrita dos dados do GPS

Os dados dos módulos de GPS são transmitidos aos módulos de comunicação via UART1. Para o correto funcionamento do sistema de geo-referenciamento é necessário que os módulos de GPS estejam em ambiente aberto.

A tabela 10 detalha o quadro de envio de dados de latitude e longitude ao PC.

Tabela 10 - Distribuição dos bytes de escrita dos dados de GPS.

0	1	15-17	18-29	30-41
Start_of_data Frame	READ_GPS	Indicador de Posição	Latitude em graus Decimais	Longitude em graus Decimais

6.4.6. Descrição da Rede

Como já dito anteriormente a rede formada é do tipo estrela, onde o nó central inicia a comunicação e os nós remotos (escravos) respondem. As mensagens são produzidas em sequencia, iniciando pelo identificador um até os cinco, valores que correspondem ao número de cada nó escravo. Destaca-se o fato de a comunicação ser feita de forma direta, do nó central aos escravos, sem uso de repetidores.

Fez-se para tanto, dois firmwares distintos a serem embarcados nos rádios: um para o dispositivo mestre e outro para o dispositivo escravo. Nos parágrafos seguintes serão explicadas as etapas de comunicação para cada dispositivo.

O rádio mestre, por ser o coordenador da rede, possui estados distintos do rádio escravo e conseqüentemente condições diferentes para a transição dos estados. Ele inicia seu processo de comunicação no estado INIT_ST, onde são carregados no buffer de transmissão todos dados que no estado sucessor serão transmitidos. Após carregar as informações já citadas na tabela 7, o dispositivo pula para o próximo estado denominado TRANSMIT_ST. Este estado realiza basicamente uma requisição ao dispositivo para ele enviar um pacote ao nó escravo com o conteúdo carregado no estado anterior. O estado seguinte é o LISTEN_ST em que basicamente é feito uma requisição de recebimento de pacote, que deverá ocorrer como resposta imediata ao pacote previamente enviado no estado anterior. O estado subsequente é o WAITING_ST, estado no qual há diferentes possibilidades para transição. Se o rádio mestre

recebeu um pacote válido ele prossegue a máquina de estados indo para o estado WRITE_DATA. Caso ele não receba um pacote válido, ou seja, o valor de LQI for menor que -98 dBm, ele permanece no estado WAITING_ST e prossegue o teste, testando os pacotes para ver se algum deles recebidos será válido. Caso isso ocorra mais de 5 vezes (vir um pacote inválido) ele retorna ao estado TRANSMIT_ST, justamente para forçar o rádio escravo a fornecer uma resposta válida. A máquina de estados termina depois que o dispositivo mestre recebe um pacote válido do nó escravo ele então processa as informações do pacote; se ele não receber mesmo depois das tentativas ele desiste e reinicia a máquina de estados.

A figura 28 ilustra através de um diagrama de estados o funcionamento do dispositivo.

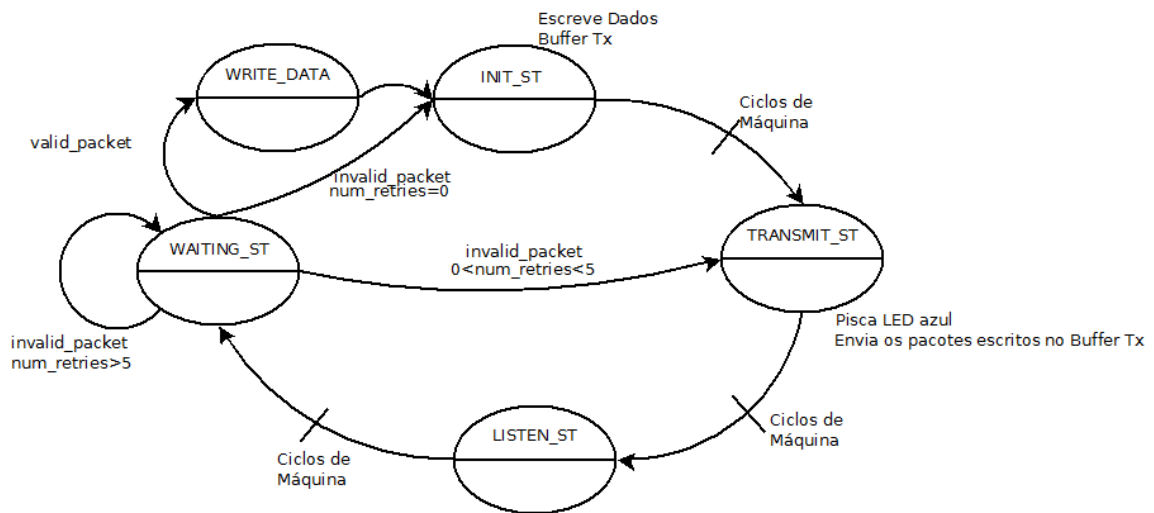


Figura 28 Diagrama de estados do rádio mestre.

Os ciclos de máquina, representados na figura como condição de troca de estados, nada mais são que o conjunto de pulsos de *clock* necessários para executar todos os comandos presentes em determinado estado (este que é variável para cada estado). O ciclo completo de envio de mensagens (até estado TRANSMIT) é realizado em até 250ms para cada dispositivo escravo (sendo este parâmetro controlável via software).

A figura 29 apresenta, através de um fluxograma, a lógica desenvolvida para a atuação do nó mestre.

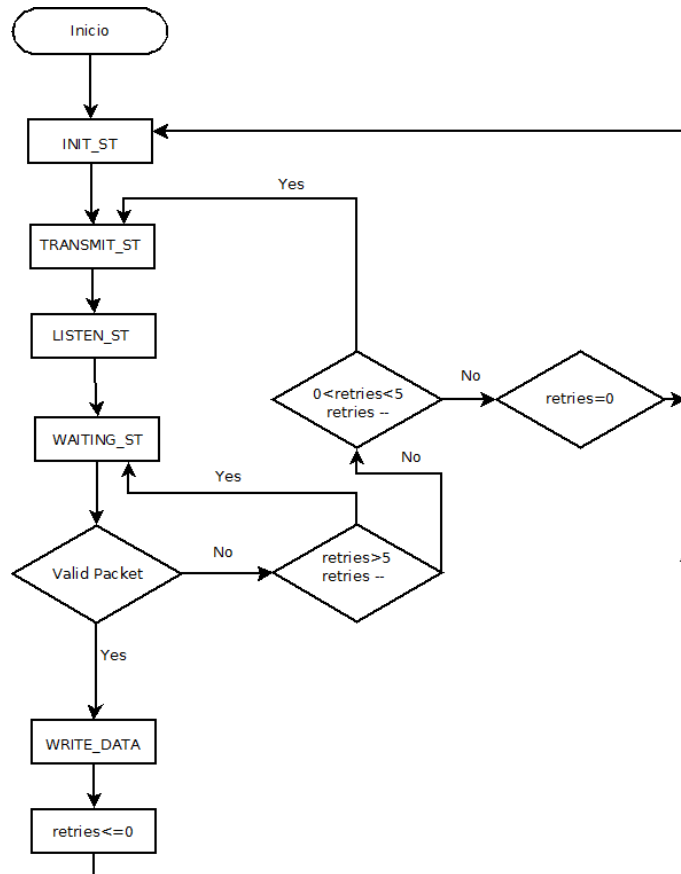


Figura 29 Fluxograma de comunicação do dispositivo mestre.

O rádio escravo tem uma máquina de estados muito similar. Ele inicia no estado IDLE_ST, estado no qual é indicado que a mensagem transmitida e recebida está completa, ou seja, que o dispositivo pode reiniciar o processo. Destaca-se nesta máquina de estado o tempo no qual o rádio escravo mantém-se ativo para recepção de pacotes (definido como 245,76 ms). Se dentro desta janela de tempo o pacote do rádio mestre não chegar, o processo de comunicação dará a este pacote o status de inválido, mesmo que ele não o seja. A figura 30 ilustra através de um diagrama de estados o funcionamento do dispositivo.

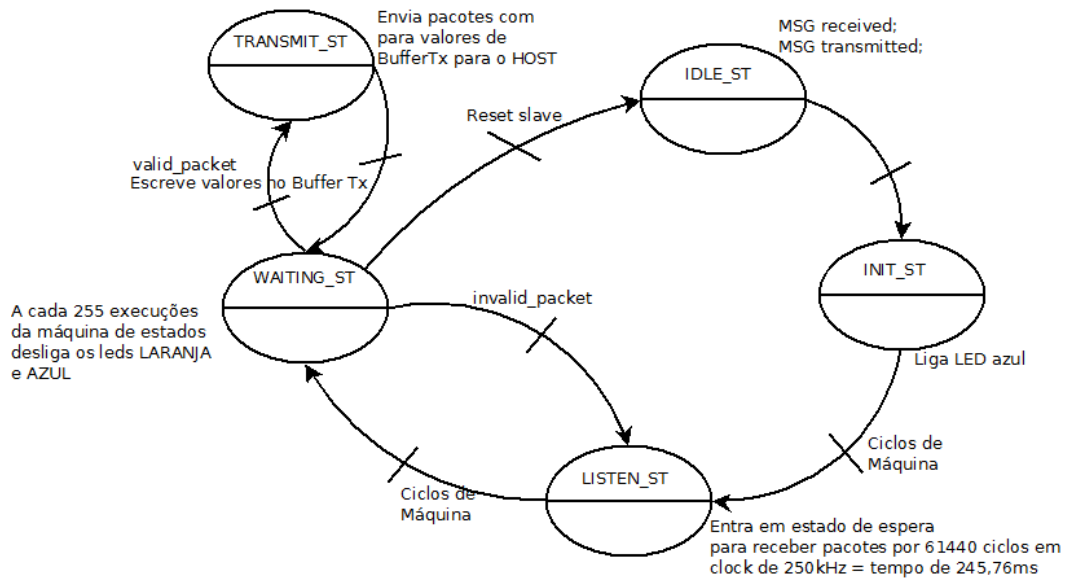


Figura 30 Diagrama de estados dos rádios escravos.

A figura 31 apresenta, através de um fluxograma, a lógica desenvolvida para a atuação do nó escravo.

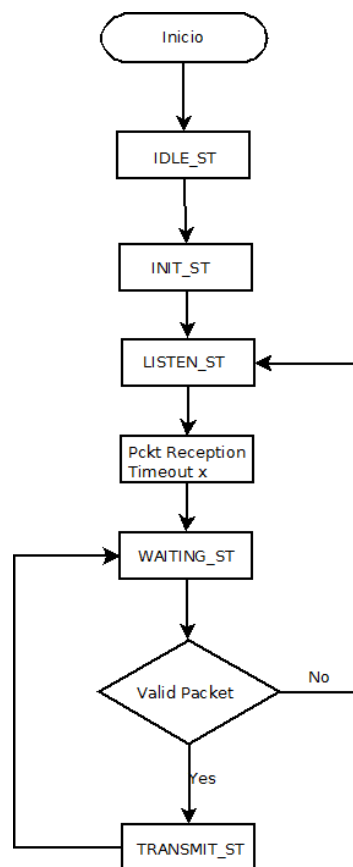


Figura 31 Fluxograma de comunicação do dispositivo escravo.

6.4.7. Varredura Multicanal

Com a finalidade de realizar uma análise dinâmica por todo espectro de frequência de redes LR-WPANs, implementou-se ao firmware a funcionalidade de varredura multicanal, esta ativada e desativada via software.

Esta análise rápida dos parâmetros pelos 15 canais da uma rede LR-WPANs permite ao usuário coletar informações de LQI_RX da rede de maneira automática e contínua. É um algoritmo adequado para ser utilizados em testes de longa duração (escala de semanas). O funcionamento da varredura multicanal se dá passo-a-passo da seguinte maneira:

1) O rádio mestre envia um comando aos rádios escravos para início do processo de troca de canais através do byte *Air_command*;

2) Os nós escravos acusam o recebimento deste comando enviando ao nó mestre o byte 4 (comando multicanal) com a informação de recebido.

3) O nó mestre, ao receber a resposta positiva dos escravos, inicia um processo de contagem, que terá como timeout a troca de seu próprio canal de comunicação.

4) Durante esta contagem o nó mestre envia novamente um comando ao nós escravos, só que desta vez para incremento do canal de frequência. Os dispositivos escravos incrementam o canal de comunicação.

5) A comunicação entre os dispositivos cessa, pois o canal de comunicação do rádio mestre não é mais o mesmo que o dos escravos. No evento *timeout* da contagem que ocorre, o nó mestre incrementa o seu próprio canal, reestabelecendo a comunicação com a rede.

O tempo no qual a rede permanece em cada canal pode ser configurado via firmware (pois este dependerá do contexto no qual o teste será realizado). O seguinte diagrama temporal, apresentado na figura 32, ilustra o processo executado entre os rádios.

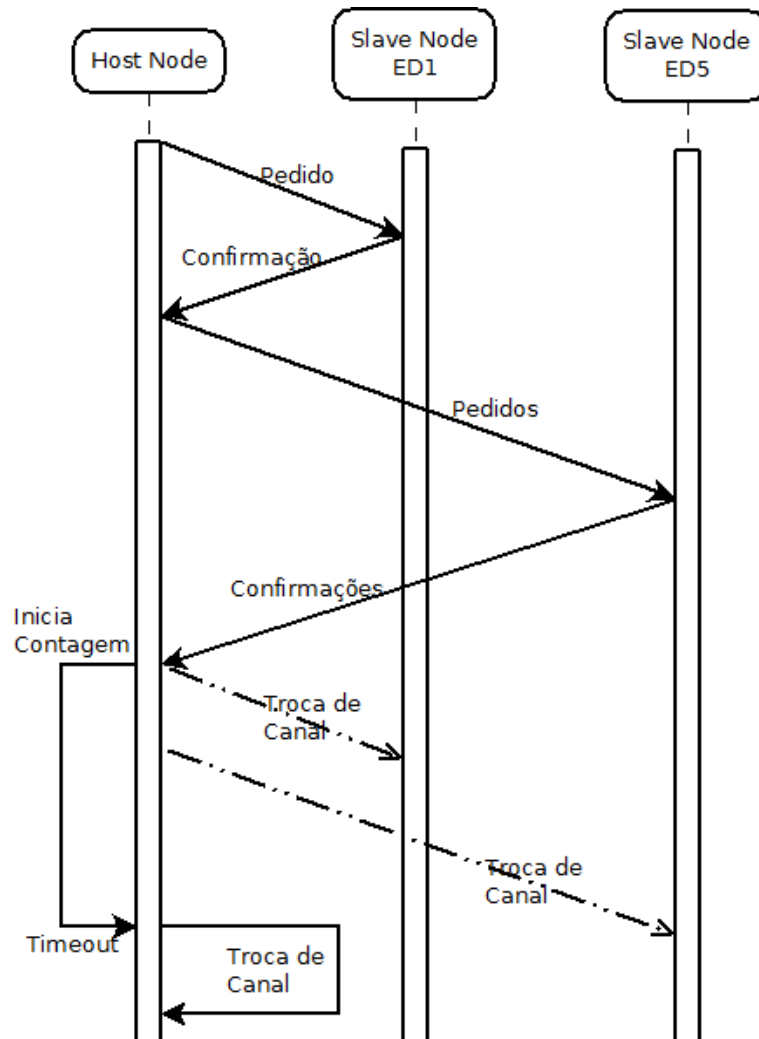


Figura 32 Diagrama temporal da varredura multicanal.

Se o nó mestre perder a comunicação com todos nós escravos ele entra no estado de procura, onde ele passa por todos os canais enviando um comando de reinicialização. No fim do ciclo, todos dispositivos se encontrarão no canal 11, definido como valor inicial desta variável.

Se ele perder a comunicação com um nó apenas, ele mantém a varredura, ignorando-o desde que ele não seja o único nó escravo da rede.

Com o intuito de verificar o real funcionamento do algoritmo desenvolvido, foi realizada uma análise espectral do enlace quando executada a varredura. Utilizou-se para tal um rádio mestre e um rádio escravo apenas; o equipamento utilizado para a verificação foi o Agilent FieldFox RF Analyzer [33]. O resultado é mostrado na figura 33, onde se podem observar os 16 picos de onda no espectro da frequência correspondentes aos 16 canais utilizados para comunicação na função de varredura espectral. O eixo x é a faixa de frequência analisada (de 2,400 GHz até 2,485 GHz) e o eixo y é potência do sinal em dBm.

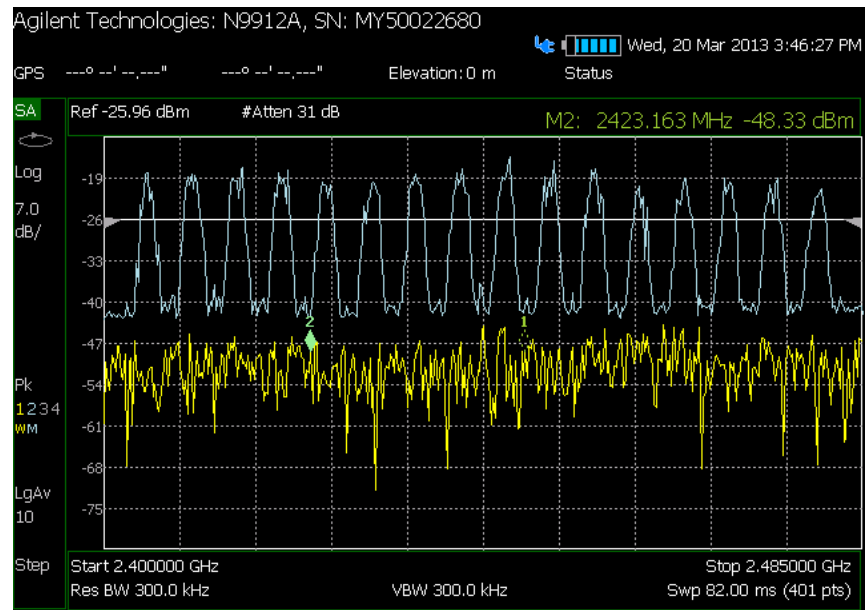


Figura 33 - Verificação do funcionamento do algoritmo de varredura multicanal.

7. TESTES

Buscando obter resultados práticos da aplicação Site Survey RF desenvolvida foram realizados diversos testes. Não somente testou-se a ferramenta em diferentes ambientes como também em diferentes situações, a fim de levantar a real influência de fatores externos na qualidade da comunicação.

A propagação de ondas eletromagnéticas pode sofrer diferentes atenuações de acordo com o ambiente e com os obstáculos que nele se encontram. Além disso, a interferência de fontes externas ao sistema é outro fator significativo a ser considerado. Assim, o primeiro conjunto de testes consistiu em analisar o efeito da interferência na qualidade da comunicação entre os rádios, monitorando para tal o número de pacotes recebidos por minuto e o LQI em dois cenários distintos: com interferência (controlada por fonte externa) e sem interferência. Já o segundo conjunto de testes consistiu em levantar parâmetros geográficos da posição dos rádios, como o alcance máximo e a localização absoluta dos nós no plano geográfico; utilizando para isso os comandos desenvolvidos via software e os módulos de GPS. Na realização dos testes buscou-se um local isolado de fontes de interferência não controladas (roteadores e demais sinais na banda de frequência de 2,4GHz) e longe de obstáculos físicos que pudessem alterar os resultados por meio do fenômeno de reflexão de onda.

Para todos os testes buscaram-se sempre as melhores condições de realização, sempre lembrando algumas características básicas de propagação de ondas, como altura mínima que o nó deve estar do chão (a fim de não haver reflexões na primeira zona de Fresnel) e, portanto, acarretar em variações na obtenção dos valores de LQI.

7.1. TESTE DE INTERFERÊNCIA UTILIZANDO SISTEMA WIRELESS SITE SURVEY.

O local escolhido para realização do teste de interferência foi uma propriedade rural longe de centros urbanos e, portanto, menos suscetível a interferências não controladas. No local não há presença de sinal de rede Wi-Fi sendo que a única forma de radiação eletromagnética é dada pelo sinal de telefonia móvel (banda de frequência de até 2100 MHz, abaixo da frequência em questão). Os testes foram realizados em local não coberto e sem obstáculos, ou seja, no campo. Para o experimento utilizou-se os seguintes materiais:

- 04 rádios (fabricante COESTER) com antenas acopladas;
- 01 conversor RS485 e uma fonte DC de 5V 1A ;

- 03 baterias 9V tipo G6F22M com 04 cabos de conexão entre a bateria e o rádio;
- 01 roteador wireless N 150Mbps modelo TL-WR740N;
- 02 Notebooks com placa de rede wireless;

O sinal de interferência estimulada foi gerado através de uma rede Wifi formada entre dois computadores; um ligado a um roteador wireless (modelo TP-Link N150bps) e o outro com, sua placa de rede *wireless* ligada. O que foi ligado ao roteador ficou como transmissor, encarregado então de enviar os pacotes para o outro, o receptor. A Figura 34 ilustra o esquema montado.



Figura 34 - Representação do esquema de testes montado.

Para gerar o sinal interferente de maneira controlada, utilizou-se o software D-ITG 2.6 versão beta [34]. Escolheu-se como parâmetros para o sinal interferente uma taxa de transmissão de 4000 pacotes por segundo com cada pacote tendo 1400 bytes de tamanho. A figura 35 ilustra a posição adotada para o roteador transmissor do sinal interferente; destacando-se a proximidade deste com o nó mestre.



Figura 35 - Local do dispositivo interferente em relação ao nó gerenciador da rede.

Esta distância (entre a fonte interferente 802.11 e o receptor 802.15.4) foi baseada no fato de a rede - analisada através da taxa de perda de pacotes - não sofrer interferência quando esta distância for maior que 4 metros [37].

Para a escolha do canal e conseqüentemente da frequência de operação do sinal interferente, tomou-se como base a figura 11, que ilustra a coexistência entre redes IEEE 802.15.4 e Wifi. Escolheu-se, portanto, fixar o canal 6 como canal de operação para a rede Wifi interferente. Como maneira de verificar o canal de atuação da rede, assim como sua colocação no espectro de frequência juntamente com outras possíveis redes, utilizou-se o aplicativo para *Android* denominado *WiFi Analyzer* [35]. A figura 36 ilustra o resultado obtido ao monitorar-se a interferência nas proximidades do dispositivo mestre; destaca-se a intensidade do sinal (-30 dBm) e sua posição no espectro (frequência central no canal 6).

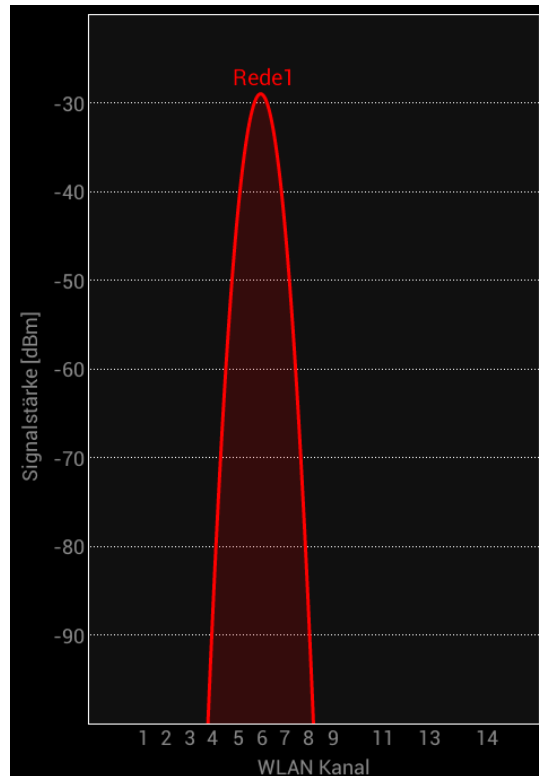


Figura 36 - Resultado obtido pela ferramenta WiFi Analyzer.

Após preparada esta primeira parte, partiu-se para a distribuição dos rádios escravos no ambiente de análise, formando assim a rede em topologia estrela. A figura 37 ilustra o local com os rádios inseridos no ambiente. Na figura são identificados os números dos dispositivos e a respectiva distância de cada em relação ao nó mestre (posicionado em frente à casa).

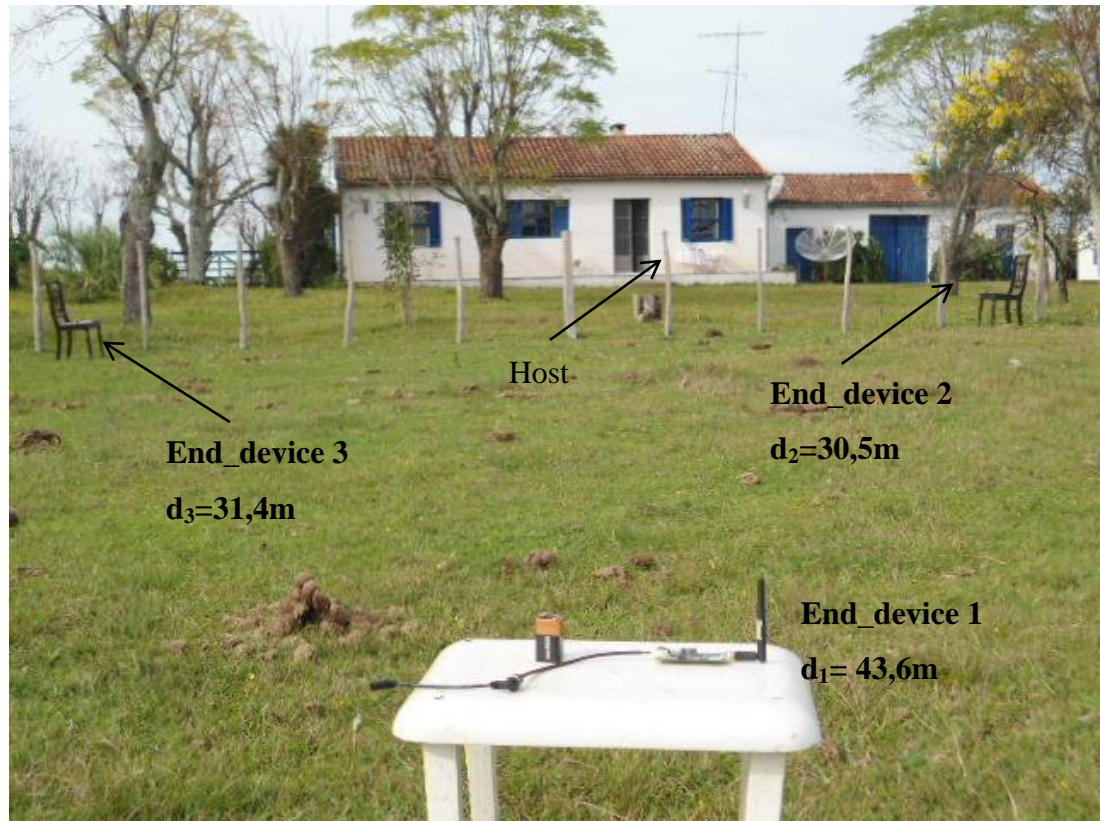


Figura 37 - Local dos testes de interferência.

Foram determinadas as coordenadas geográficas para cada um dos nós posicionados no terreno. Para isso, utilizou-se um aparelho comercial de GPS modelo Etrex da empresa Garmin [36]. A incerteza da medida no momento de aquisição das coordenadas era de 11 metros (esta calculada pelo próprio aparelho de GPS). A tabela 11 apresenta as coordenadas para cada dispositivo. Na tabela também estão representadas as distâncias, determinadas para cada nó escravo em relação ao nó mestre, ao ligarem-se os pontos geográficos adquiridos entre um nó escravo e o nó mestre por uma linha reta.

Tabela 11 - Posições geográficas absolutas dos nodos no terreno de testes.

Dispositivo	Localização Geográfica	Distância do nó HOST (m)
HOST	S30°41'58,6'' W53°48'42,6''	0
End_device 01	S30°S41'57,5'' W53°48'43,6''	43,6
End_device 02	S30°41'57,9'' W53°48'43,4''	30,5

End_device 03	S30°41'57,7'' W53°48'43,1''	31,4
---------------	--------------------------------	------

Uma vez posicionados os rádios no ambiente partiu-se para a próxima etapa: a coleta dos dados. A coleta de dados ocorreu em dois testes iguais feitos em dois dias diferentes. Para repetir o experimento no segundo dia utilizaram-se as posições marcadas no GPS (atentar para incerteza do GPS de 11 metros que insere um fator de erro nos valores de LQI obtidos).

A fim de realizar-se um experimento bem planejado, seguiu-se o roteiro sugerido por [38], que consiste em definir uma metodologia respondendo as seguintes questões:

- Qual a finalidade da medida? Por que medir?

1) A medida tem como objetivo identificar o efeito da interferência na qualidade comunicação da rede sem fio formada, monitorando para isso as métricas LQI e pacotes recebidos.

- Quais as hipóteses?

2) Verificar se a métrica LQI varia com as mudanças dos canais de comunicação, varia com as mudanças dos dispositivos comunicantes, varia com a mudança do canal e do dispositivo e, por fim, se varia com a mudança do cenário sem interferência para o com interferência

- Qual o método estatístico a ser utilizado para validar os dados?

3) O método será a análise de variância de classificação simples e classificação dupla, cujos fatores controláveis serão os canais de comunicação, o cenário de interferência e os dispositivos utilizados. Será utilizado para todos os testes um nível de significância de 5% a uma distribuição normal – uma vez que serão realizadas medições seguindo rigoroso procedimento experimental e com diversas classes.

- Qual a quantidade de ensaios e de amostras a serem utilizadas?

4) O número de amostras adquiridas foi de 40 por canal para cada dispositivo, ou seja, para o end_device01 foram obtidas 40 amostras de LQI_rx no canal 11, 40 amostras de LQI_tx no canal 11 e assim por diante até o canal 25 e até o end_device03. Esse número foi obtido pela observação empírica da variabilidade dos valores de LQI em função do tempo. Foram obtidas 40 amostras em um dia e 40 noutro.

- Quais as variáveis de resposta?

5) As variáveis de resposta são o LQI_rx, o LQI_tx e os pacotes recebidos.

Com estas questões respondidas iniciou-se a coleta dos dados de LQI e de pacotes recebidos, atentando para que os valores de LQI não ficassem abaixo de -90dBm (tais valores dificultariam na recepção de pacotes mesmo sem interferência).

O teste consiste em duas etapas: a aquisição dos dados de LQI e pacotes recebidos no cenário sem interferência do canal 11 ao canal 25; e aquisição destes no cenário com interferência também por estes canais (que são os de atuação do protocolo WH). Já nas primeiras medidas foram observados valores muito diferentes de LQI recebido com o transmitido pelo dispositivo end_device02.

Desta maneira, a fim de levantar a magnitude desta discrepância, pegaram-se os valores no cenário sem interferência da diferença de 40 amostras do LQI_RX com 40 do LQI_TX para cada dispositivo. Calculou-se então a média aritmética destes 40 resultados obtidos. É importante destacar que os valores de LQI para o cálculo das diferenças foram pegos aleatoriamente pelos canais. A tabela 12 mostra os valores médios obtidos para cada dispositivo.

Tabela 12 - Média das diferenças dos valores de LQI por dispositivo.

Dispositivo	Diferença média entre valores LQI_RX e LQI_TX
end_device01	4,282 dB
end_device02	18,432 dB
end_device03	0,721 dB

Desta tabela conclui-se que o rádio end_device02 apresenta diferenças grandes (maiores que 6dB que é quatro vezes o valor da potência) entre o valor de LQI recebido e o valor de LQI transmitido; o que indica um provável problema de funcionamento (o LQI remete ao enlace e não ao dispositivo separadamente). Além disso, seu consumo também demonstrou ser muito mais alto que o dos outros rádios, uma vez que nos dois dias do experimento utilizaram-se 3 baterias diferentes para alimentá-lo, enquanto que para os outros dispositivos foi utilizada apenas uma. O dispositivo escravo 2, portanto, foi retirado da análise numérica por apresentar os problemas citados.

Com a rede em funcionamento e as questões de LQI resolvidas partiu-se para a calibração do sistema de cálculo da taxa de pacotes por minuto. Para a coleta dos pacotes seguiu-se a seguinte metodologia:

- Cada dispositivo envia ininterruptamente pacotes ao nó mestre. Este contabiliza os recebidos por cada nó escravo separadamente, até que este número de pacotes ultrapasse um valor limiar. Este valor, definido para este teste como sendo de 30 pacotes, foi obtido pela

observação do máximo número de pacotes que o nó mestre (na velocidade de *scan* definida) obtém por minuto.

Cada vez que o nó mestre contabiliza um valor de pacotes de um nó escravo maior que 30 ele zera o registrador (que guarda o número de pacotes) e inicia a contagem novamente a partir do zero. A cada início de contagem (cada saída do zero) é disparado um cronometro de 1 minuto pelo software. O rádio mestre, então, vai recebendo pacotes e contando o número destes recebidos até o fim de 1 minuto. No caso dos testes realizados este valor nunca passou de 25 (por isso somada uma margem de segurança escolheu-se limiar de 30). Em exatamente 1 minuto este valor é apresentando e adquirido como o valor de taxa de pacotes recebidos por minuto. O ciclo se repete novamente quando o registrador for zerado.

Com esta metodologia possibilitou-se pegar o número de pacotes por minuto e por canal, uma vez que para cada canal deixou-se os módulos comunicando tempo suficiente para ocorrer às situações de “reset” do registrador e aquisição do seu valor depois de 1 minuto. Se fosse escolhido um valor maior que 30, o tempo de espera do sistema de contabilização de pacotes seria maior, aumentando assim o tempo de aquisição de dados por canal.

Os dados adquiridos foram organizados em tabelas para análise das hipóteses a serem respondidas. Primeiramente empregaram-se as variáveis de resposta LQI_RX e LQI_TX para os resultados do cenário sem interferência. Para cada dispositivo em cada canal, foi calculada a média aritmética das 40 amostras obtidas no primeiro dia e das 40 amostras obtidas no segundo dia, ou seja, em cada célula de tratamento estão representados estes valores médios.

A tabela 13 organiza os dados do cenário sem interferência para a variável de resposta LQI_RX. As hipóteses a serem validadas para esta variável de resposta seguem no rodapé da tabela.

Tabela 13 - Dados de LQI_RX por canal e por dispositivo.

Canal	LQI_RX	
	end_device 01	end_device 03
11	-80	-62,26
	-77,74	-62,42
12	-74,35	-62,94
	-77,20	-62,39
13	-74,97	-65,91
	-73,82	-61,25
14	-74	-66,81
	-73,74	-61,45
15	-72,96	-64,62
	-74,27	-62,36
16	-77,9	-62,32
	-72,44	-63
17	-77,13	-64,13
	-72,47	-63,18
18	-74,41	-63,13
	-73,10	-63,4
19	-73,62	-61,18
	-73,14	-64,56
20	-74,82	-60,23
	-71,44	-65,54
21	-73,43	-60,87
	-70,92	-63,14
22	-72,07	-60,76
	-68,34	-63,14
23	-71,36	-60,98
	-68,61	-63,41
24	-71,75	-59,85
	-69,77	-64,29
25	-74,89	-58,61
	-70,71	-66,23
H1-> LQI_RX varia com o canal?		
H2-> LQI_RX varia com o dispositivo?		
H3-> LQI_RX varia com o canal e o dispositivo?		

De posse dos dados realizou-se a análise de variância de classificação dupla das amostras obtidas. A tabela ANOVA é representada na tabela 14.

Tabela 14 - Tabela ANOVA do experimento LQI_RX sem interferência.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Médias Quadradas	Fator F	Prob>F
Colunas	1717,46	1	1717,46	320,18	0
Linhas	94,47	14	6,75	1,26	0,2886
Interação	63,69	14	4,55	0,85	0,6164
Erro	160,92	30	5,36		

Da tabela é possível chegar as seguintes conclusões:

- ✓ $F_{30,1,0,05} = 4,17$; como 320 é maior que 4,17 o fator dispositivo de comunicação (end_device) é significativo para variação dos valores de LQI_RX.
- ✓ $F_{30,14,0,05} = 2,01$; como 1,26 é menor que 2,01 o fator canal de comunicação não é significativo para variação dos valores de LQI_RX.
- ✓ $F_{30,14,0,05} = 2,01$; como 0,85 é menor que 2,01 a combinação dos fatores dispositivo e canal de comunicação não é significativo para variação dos valores de LQI_RX.

A tabela 15 organiza os dados do cenário sem interferência para a variável de resposta LQI_TX. As hipóteses a serem validadas para esta variável de resposta seguem no rodapé da tabela.

Tabela 15 - Variável de resposta LQI_TX para o cenário sem interferência.

canal	LQI_TX	
	end_device 01	end_device 03
11	-75.6	-61.51
	-84.91	-60.46
12	-69.96	-62.15
	-84.51	-60.43
13	-70.55	-65.31
	-81.2	-59.51
14	-69.65	-66.09
	-81.13	-59.59
15	-68.88	-63.95
	-81.46	-60.42
16	-73.84	-61.54
	-79.98	-61.1
17	-72.9	-63.39
	-80.01	-61.14
18	-70.07	-62.49
	-80.72	-61.43
19	-69.48	-60.48
	-80.56	-62.62
20	-70.48	-59.92
	-78.79	-63.54
21	-69.22	-60
	-78.23	-61.33
22	-67.98	-60.04
	-75.48	-61.21
23	-66.93	-60.23
	-75.97	-61.45
24	-67.23	-58.89
	-77.13	-62.49
25	-70.66	-57.8
	-78	-64.25
H1-> LQI_TX varia com o canal?		
H2-> LQI_TX varia com o dispositivo?		
H3-> LQI_TX varia com o canal e o dispositivo?		

De posse dos dados realizou-se a análise de variância de classificação dupla das amostras obtidas. A tabela ANOVA é representada na tabela 16.

Tabela 16 - Tabela ANOVA para LQI_TX cenário sem interferência.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Médias Quadradas	Fator F	Prob>F
Colunas	2757,43	1	2757,43	100,18	0
Linhas	95,97	14	6,86	0,25	0,9958
Interação	63,95	14	4,57	0,17	0,9995
Erro	821,02	30	27,37		

- ✓ $F_{30,1,0,05} = 4,17$; como 100,18 é maior que 4,17 o fator dispositivo de comunicação (end_device) é significativo para variação dos valores de LQI_TX.
- ✓ $F_{30,14,0,05} = 2,01$; como 0,25 é menor que 2,01 o fator canal de comunicação não é significativo para variação dos valores de LQI_TX.
- ✓ $F_{30,14,0,05} = 2,01$; como 0,17 é menor que 2,01 a combinação dos fatores dispositivo e canal de comunicação não é significativo para variação dos valores de LQI_TX.

Uma vez realizada a análise estatística no cenário sem interferência, parte-se para a etapa de análise do cenário com interferência. As variáveis de resposta nesta análise continuam sendo as métricas LQI_RX e LQI_TX. É importante destacar que, como a métrica LQI é uma medida digital que necessita recebimento do pacote para ser calculada, alguns canais não apresentaram valores de LQI no cenário com interferência. Isso deve-se ao fato de o sinal interferente ter impedido o recebimento de pacotes pelo nó mestre em determinados canais. Importante destacar também que cada dispositivo apresentou um comportamento diferente quanto à recepção de pacotes nos diferentes canais de comunicação. O mesmo cálculo foi utilizado por célula de tratamento (média dos 40 valores). Para esta análise utilizou-se o end_device02, pois não está sendo analisada a magnitude dos valores de LQI. As tabelas 17 e 18 mostram este fenômeno, onde os espaços não preenchidos representam a ausência de dados adquiridos.

Tabela 17 - Dados obtidos de LQI_RX pelos canais no cenário com interferência.

Com Interferência			
	End_device 01	End_device 02	End_device 03
canal	LQI_RX	LQI_RX	LQI_RX
11	-79,23	-66,92	-62,29
12			-63,21
13	-77,33		-64,5
14			-66
15	-75,08		-66,07
16	-78	-66,77	-62,71
17	-77,083	-65,79	-63,55
18	-75,58	-63,85	-65,23
19	-74	-65,23	-64,53
20	-75,23		-63,63
21			
22			
23			
24			
25			

Tabela 18 - Dados obtidos de LQI_TX pelos canais no cenário com interferência.

Com Interferência			
	End_device 01	End_device 02	End_device 03
canal	LQI_TX	LQI_TX	LQI_TX
11	-74,42	-85,68	-61,43
12			-62,29
13	-72,47		-63,67
14			-65,33
15	-70,87		-65,14
16	-73,69	-85,13	-61,73
17	-72,78	-84,11	-62,76
18	-71,08	-82,19	-64,44
19	-69,54	-83,37	-63,63
20	-70,86		-62,67
21			
22			
23			
24			
25			

Destas tabelas (17 e 18) é possível tirar as seguintes conclusões:

- No canal 11 não houve problemas na aquisição de dados; todos dispositivos escravos de comunicaram.

- No canal 12 apenas o dispositivo escravo 3 (end_device03) apresentou valores de LQI, ou seja, o nó mestre recebeu pacotes apenas deste dispositivo. Uma possível perda de comunicação por falha de sincronização na troca de canais foi descartada, pois o nó escravo 1 (end_device01) voltou a aparecer posteriormente no canal 13, sem que se houvesse reiniciado o sistema. O mesmo ocorre para dispositivo escravo 2, que restabeleceu sua comunicação no canal 16.

- No canal 13 a comunicação com o dispositivo escravo 1 é reestabelecida.

- No canal 14 apenas o dispositivo 03 estabelece comunicação.

- No canal 15 é reestabelecida a comunicação com o dispositivo escravo 01.

- Do canal 16 ao canal 19 todos os dispositivos comunicam, parecendo que a interferência não exerce influencia alguma nestes canais.

- No canal 20 perde-se a comunicação com o dispositivo escravo 02.

- Do canal 21 em diante cessa a comunicação de maneira geral, dando a impressão de que é nestes canais que a interferência exerce sua maior influência.

Devido a estas variações nos canais, fez-se a análise de variância de classificação simples apenas para o dispositivo 03, que além de apresentar maior estabilidade em seu comportamento, apresentou valores de LQI_RX e LQI_TX bem mais próximos que os outros rádios; o que é, novamente, um indicativo de boa qualidade do dispositivo.

Para a análise de variância o dispositivo 03 nos dois cenários, pegam-se 10 repetições, sendo que cada uma das repetições é o valor médio de 40 valores obtidos aleatoriamente pelos canais de LQI_RX. A tabela 19 mostra os valores do ensaio e o respectivo teste de hipótese desejado.

Tabela 19 - Amostras de LQI_RX para cenário sem e com interferência.

repetições	End_device 03 LQI RX	
	sem interferência	com interferência
1	-62.26	-62.29
2	-62.94	-63.21
3	-65.91	-64.5
4	-66.81	-66
5	-64.62	-66.07
6	-62.32	-62.71
7	-64.13	-63.55
8	-63.13	-65.23
9	-61.18	-64.53
10	-60.23	-63.63
H1-> LQI_RX varia com a interferência?		

De posse dos dados realizou-se a análise de variância de classificação simples das amostras obtidas. A tabela ANOVA é representada na tabela 20.

Tabela 20 - Tabela ANOVA para variável LQI_RX no teste para interferência.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Médias Quadradas	Fator F	Prob>F
Colunas	3,3538	1	3,35	1,13	0,301
Erro	53,2398	18	2,96		
Total	56,5936	19			

✓ $F_{18,1,0,05}=4,41$; como 1,13 é menor que 4,41 a hipótese de que o valor de LQI_RX varia com a interferência não é significativa.

A tabela 21 organiza os dados do cenário com interferência para a variável de resposta LQI_TX. A hipótese a ser validada para esta variável de resposta segue no rodapé da tabela.

Tabela 21 - Amostras de LQI_TX para cenário sem e com interferência.

repetições	end_device 03 LQI TX	
	sem interferência	com interferência
1	-61,51	-61,43
2	-62,15	-62,29
3	-65,31	-63,67
4	-66,09	-65,33
5	-63,95	-65,14
6	-61,54	-61,73
7	-63,39	-62,76
8	-62,49	-64,44
9	-60,48	-63,63
10	-59,92	-62,67
H1-> LQI_TX varia com a interferência?		

De posse dos dados realizou-se a análise de variância de classificação simples das amostras obtidas. A tabela ANOVA é representada na tabela 22.

Tabela 22 - Tabela ANOVA para variável LQI_TX no teste para interferência.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Médias Quadradas	Fator F	Prob>F
Colunas	1,96	1	1,96	0,67	0,4246
Erro	52,83	18	2,93		
Total	54,79	19			

- ✓ $F_{18,1,0,05}=4,41$ como 0,67 é menor que 4,41 a hipótese de que LQI_TX varia com a interferência não é significativa.

Depois de feita a análise do parâmetro LQI parte-se para análise dos pacotes recebidos por minuto pelo nó mestre. A tabela 23 mostra os valores adquiridos no cenário sem interferência. Cada célula da tabela apresenta o último (na escala temporal) valor recebido de pacotes por minuto em determinado canal, de forma a garantir a contagem de pacotes depois que o registrador fosse zerado. Todas as amostras foram retiradas do segundo dia de testes.

Tabela 23 - Valores de pacotes recebidos por minuto no cenário sem interferência

canal	pacotes/minuto		
	end_device01	end_device02	end_device03
11	16	22	23
12	18	22	23
13	19	23	23
14	19	23	23
15	16	24	22
16	17	21	23
17	21	23	23
18	15	21	23
19	23	22	23
20	21	23	23
21	23	23	24
22	22	23	22
23	23	23	24
24	20	23	23
25	19	24	23

A tabela 24 mostra os valores adquiridos no cenário com interferência seguindo o mesmo método realizado no cenário sem interferência.

Tabela 24 - Valores de pacotes por minuto obtidos no cenário com interferência.

canal	pacotes/minuto		
	end_device01	end_device02	end_device03
11	20	18	20
12	0	0	10
13	4	0	4
14	0	0	2
15	18	0	16
16	16	10	15
17	19	14	16
18	14	23	17
19	15	15	14
20	20	0	19
21	0	0	0
22	0	0	0
23	0	0	0
24	0	0	0
25	0	0	0

Os valores indicados por zero na realidade correspondem a uma ausência de informação, uma vez que não foram adquiridos pacotes suficientes para zerar o registrador de contabilização de pacotes e assim disparar o cronometro da contagem.

Destaca-se a ausência de pacotes recebidos dos três dispositivos do canal 20 ao canal 25, sugerindo uma atuação destacada da interferência nesta faixa de frequência.

7.2. TESTE DOS MÓDULOS GPS E DE LOCALIZAÇÃO

O segundo grupo de testes realizados objetivou verificar o funcionamento do sistema de geo-referenciamento implementado nos rádios.

Para tanto os seguintes materiais foram utilizados:

- 02 rádios (fabricante COESTER) com antenas acopladas e módulos de GPS implementados;

- 02 módulos de GPS modelo ME-1000RW;

-01 aparelho de GPS comercial;

- 01 conversor RS485 e uma fonte DC de 5V 1A ;

- 01 conjunto de pilhas totalizando 5V com cabo de conexão;

A metodologia empregada no teste consiste em comparar os valores obtidos pelo GPS comercial com os obtidos pela ferramenta desenvolvida.

Pegaram-se para análise quatro pontos geográficos distribuídos aleatoriamente pelo terreno. O ambiente dos testes está ilustrado na figura 38.



Figura 38 - Local de realização dos testes com o sistema de geo-referenciamento.

Para cada ponto foi obtida a coordenada geográfica absoluta através do aparelho comercial GPS *Etrex*. Na ocasião, este indicou uma incerteza da medição de 11 metros. Em seguida, para estes mesmos pontos foram adquiridos as posições em coordenadas geográficas, só que agora utilizando o sistema de geo-referenciamento desenvolvido. A tabela 25 mostra os valores obtidos.

Tabela 25 - Valores obtidos com os diferentes equipamentos.

Ponto Geográfico	GPS Etrex	GPS ME1000RW
Local01	S30° 41' 55,8''S W53°41' 55,8''	S30°41'55,95'' W53°48'44,53''
Local02	S30° 41' 57,5'' W53° 48' 45,5''	S30°41'57,4'' W53°48'45,45''
Local03	S30° 41' 56,7'' W53°48'42,8''	S30°41'56,77'' W53°48'42,84''
Local04	S30°41'58,0'' W53°48'43,2''	S30°41'58,16'' W53°48'43,16''
Local05 (HOST)	S30°41'58,5'' W53°48'42,8''	S30°41'58,62'' W53°48'42,66''

Os valores obtidos pelo sistema, como podem ser vistos na tabela, se aproximam dos obtidos pelo aparelho comercial havendo na maioria dos casos diferenças apenas na casa dos segundos. O gráfico da figura 39 compara os valores obtidos entre os dois aparelhos de GPS (ignorando o Local01 da análise). Nota-se que a maior diferença entre as medidas dos dois equipamentos para a latitude foi de $4,5 \times 10^{-5}$ graus (Local04) e para longitude de $3,9 \times 10^{-5}$ graus, inserindo um erro máximo de medição desprezível para a finalidade proposta.

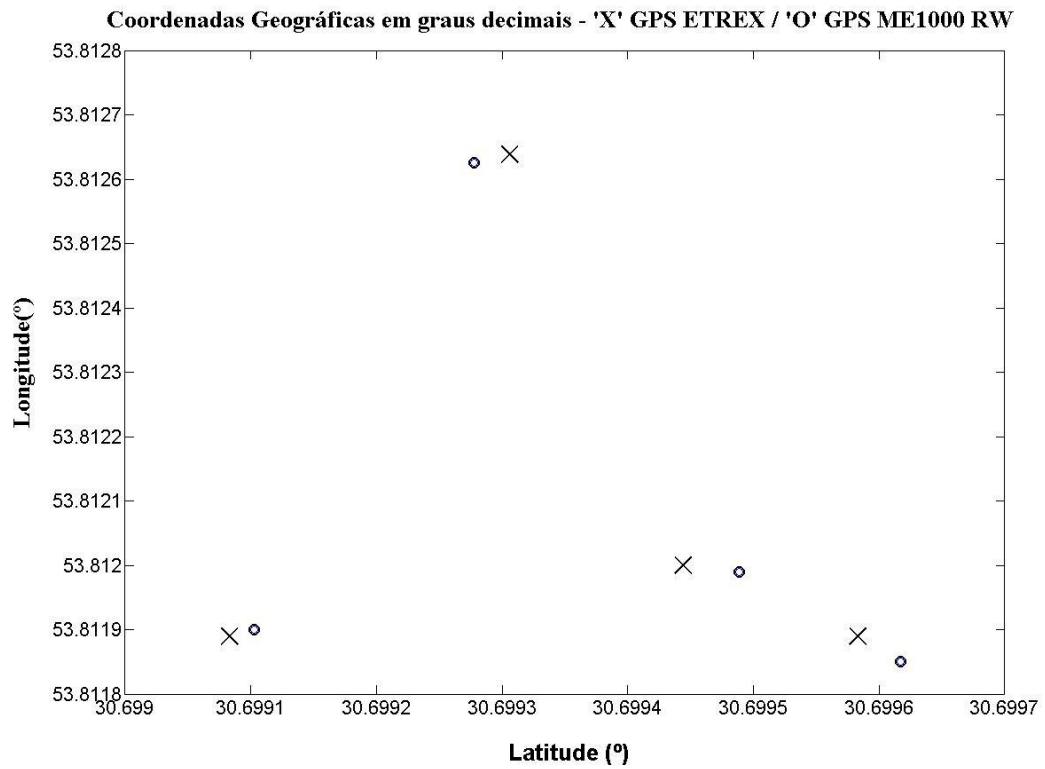


Figura 39 - Gráfico comparativo das medidas obtidas.

Escrevem-se as coordenadas obtidas pelos módulos em um arquivo de extensão kml. Este arquivo, por sua vez, é gerado e aberto pelo software *Google Earth*. As posições dos rádios são mostradas então automaticamente no mapa. As figuras 40 e 41 ilustram este procedimento.

```

<?xml version="1.0" encoding=" UTF-8"?>
  <kml xmlns="http://www.opengis.net/kml/2.2">
    <Document><name>Plant Map </name>
    <description>Referencias diferentes points from the notes</description>
    <Style id="rangecolour">
      <LineStyle> <color>660000FF</color><width>0.1</width></LineStyle>
      <PolyStyle> <color>660000FF</color></PolyStyle>
    </Style>
    <Style id="linecolour">
      <LineStyle> <color>FFFF0000</color><width>4</width></LineStyle>
    </Style>
    <Placemark> <name>NODE01</name>
    <description></description>
    <Point>
      <coordinates>-53.811840057373,-30.6996440887451</coordinates>
    </Point>
    </Placemark>
    <Placemark> <name>NODE02</name>
    <description></description>
    <Point>
      <coordinates>-53.8119888305664,-30.6994895935059</coordinates>
    </Point>
    </Placemark>
  </Document>
</kml>

```

Figura 40 - Arquivo.kml gerado via software.

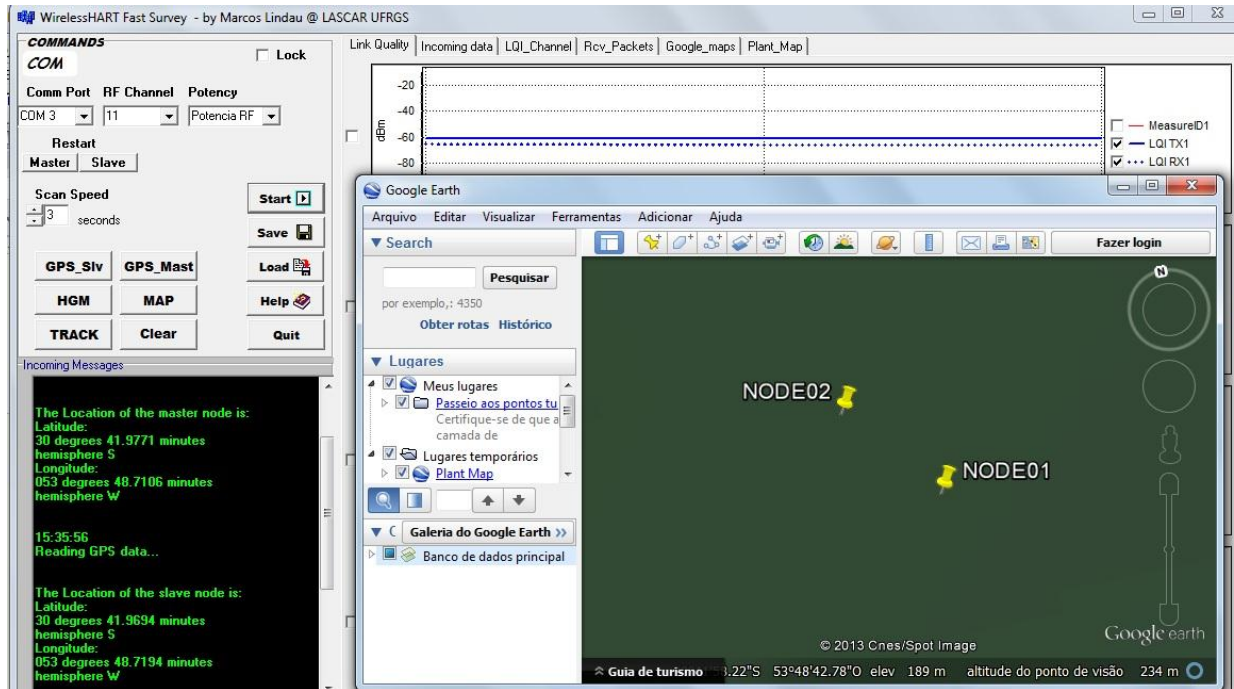


Figura 41 - Representação dos dispositivos no plano geográfico.

Foi realizado também, utilizando o sistema de geo-referenciamento, um teste de alcance entre um dispositivo mestre e um dispositivo escravo, como será descrito no próximo capítulo.

7.3. TESTE DE ALCANCE

Para realizar o teste de alcance entre os rádios utilizaram-se os seguintes materiais:

- 01 rádio fabricado pela empresa NOVUS com antena acoplada e cabo USB para interface com PC.
- 01 rádio fabricado pela empresa COESTER com antena acoplada e bateria 9V com conector para alimentação.
- 01 aparelho GPS Etrex.

Posicionou-se o rádio mestre em local a uma altura de pelo menos um metro e meio do solo. Buscou-se orientar o rádio para uma direção que não apresentasse obstáculos no relevo. Configurou-se a potência de saída do PA dos rádios para o valor máximo.

A posição geográfica do rádio mestre foi marcada pelo GPS como sendo $30^{\circ}41'58,7''S$ e $53^{\circ}48'43,0''W$ com uma incerteza de 5 metros. Partindo deste ponto, levou-se o nó escravo pelo terreno, chegando-se até a coordenada de $30^{\circ}41'40,0''S$ e $53^{\circ}49'53,7''W$, também com uma incerteza de 5 metros.

Considerando um modelo cartográfico plano traçou-se uma reta entre estes dois pontos, aferindo-se assim o comprimento da mesma, que corresponde à distância alcançada entre os dois rádios. A distância foi de 1967,56 metros, apresentando neste ponto valores de LQI de RX:- 96dbm e TX:- 91dbm. Foi escolhido o canal 11 para comunicação entre os rádios. A figura 42 ilustra as posições do nó mestre e nó escravo no mapa.



Figura 42- Identificação da posição geográfica dos rádios.

7.4. DETERMINAÇÃO DE UM MODELO DE PROPAGAÇÃO

Utilizou-se a ferramenta *Site Survey* para determinar um modelo de propagação de ondas eletromagnéticas no meio. Para tal, foram tomados valores de LQI para diferentes posições de um nó escravo em relação ao nó mestre. A rede foi formada em área litorânea, onde se procurou posicionar os dispositivos em local sem interferência proveniente de obstáculos físicos, conforme ilustrado na figura 43. Destaca-se a completa visibilidade entre os nós, uma vez que o nó mestre foi posicionado em um trapiche (balão verde) e o escravo em diferentes pontos da costa.



Figura 43 Posicionamento dos nós para modelo de propagação.

Os resultados são apresentados na tabela 26. Para cada distância foram medidos em torno de 60 valores dos quais se calculou a média aritmética. A saída do PA foi ajustada em 10dBm e os rádios utilizados foram os módulos da fabricante NOVUS.

Tabela 26 Relação entre LQI e distância entre os nós.

LQI (dBm)	Distância (m)
-15	0
-20	1
-30	3,9
-40	10,75
-50	53
-60	120

-70	331
-75	535
-80	690
-85	1230
-90	1420

Com esta relação é possível, portanto, obter uma tendência da influência do meio na atenuação de ondas eletromagnéticas. A determinação de um modelo de propagação pode também ser obtida com base nestes dados.

8. CONCLUSÕES

As redes de automação industrial evoluíram muito nos últimos anos devido ao rápido avanço tecnológico dos dispositivos eletrônicos; permitindo a formação de redes sem fio com grande número de dispositivos participantes, de pequeno tamanho e fácil instalação.

Da crescente utilização de redes sem fio em ambiente industrial surgiu a necessidade de um estudo prévio das condições inerentes ao ambiente de instalação, a fim de assegurar um desempenho adequado para a rede. Com este estudo, se ganha tempo e dinheiro, uma vez que é possível conhecer-se as características do local previamente.

Neste trabalho foi elaborado um sistema *Wireless Site Survey*. Para sua implementação foram utilizados microcontroladores da família MC1322x da Freescale, que possuem um microprocessador ARM-7 e um rádio padrão IEEE 802.15.4 encapsulados. O desenvolvimento do projeto tomou como base as métricas LQI e pacotes recebidos como métodos de diagnóstico do enlace de RF.

8.1. TESTES REALIZADOS

Com a utilização das métricas LQI e pacotes recebidos nos ensaios de interferência realizados, chegaram-se as seguintes conclusões (tiradas dos testes de hipóteses feitos):

- Os valores de LQI, tanto recebidos como transmitidos, não variam com a inserção de interferência na rede;
- Os valores de LQI não variam com a variação dos canais de comunicação entre os dispositivos;
- Os valores de pacotes recebidos por minuto variam com a inserção de interferência Wifi e mudança de canais na rede formada;

É importante destacar que os testes neste trabalho realizados, não foram suficientes para determinar, no cenário com interferência, como se dá esta variação do número de pacotes recebidos pelos diferentes canais do espectro. Contudo, foi observado pela mudança dos canais no espectro o total bloqueio na comunicação do canal 20 ao canal 25 quando a rede Wifi foi submetida à interferência no canal 6. A figura 11 ilustra uma incoerência com a teoria, uma vez que não há sobreposição de canais entre as duas redes nesta faixa do espectro. A sobreposição ocorreria se o canal configurado para rede Wifi fosse o canal 11, e não o canal 6, como realmente o foi.

Dos testes de hipóteses e suas conclusões, é possível traçar as reais possibilidades de atuação desta aplicação.

8.2. EMPREGABILIDADE DO SISTEMA

A aplicação demonstrou, pelos resultados obtidos através dos testes realizados, ser capaz de:

- Identificar uma fonte de interferência inserida na rede através da análise do número de pacotes recebidos por canal;
- Verificar previamente a qualidade de um enlace *wireless* simultaneamente em múltiplos pontos de determinado ambiente;
- Adquirir o posicionamento geográfico dos rádios em ambientes outdoor;
- Auxiliar em estudos de modelos de propagação eletromagnética.

Com estes resultados, pode-se concluir que a ferramenta é útil para análises preditivas do tipo *Onsite*. Seu emprego no planejamento de novas redes *wireless* permite reduzir fatores como tempo e custo no planejamento e implantação de uma rede de automação industrial; tornando o estágio de projeto da rede mais fácil e eficiente.

Por se tratar de uma versão inicial, a aplicação encontra-se ainda em desenvolvimento, principalmente no quesito de métricas empregadas para análise da qualidade da rede.

8.3. POSSÍVEIS MELHORIAS

Através dos testes realizados, pode-se concluir que o LQI não varia com o sinal interferente e também não varia com a mudança do canal de comunicação mesmo quando há presença de interferência. Desta maneira, a funcionalidade de varredura multicanal do parâmetro LQI poderia ser substituída pela varredura do parâmetro RSSI, que ao contrário do utilizado, identifica sim fontes de interferência. O LQI deve ser mantido, porém sua análise pode ser restrita a um canal de comunicação apenas. Por o LQI apresentar-se como métrica de qualidade do sinal, um teste que medisse seus valores em relação ao número de pacotes recebidos por minuto seria de grande valia para o melhor entendimento e utilização desta métrica para fins de *Site Survey*.

Pode-se observar também, que para reconhecer o fenômeno de coexistência entre redes é necessário monitorar do número de pacotes recebidos e transmitidos. Métricas como

PER ou PDR implicariam ao sistema em grande melhoria, ao fornecer uma análise não somente de identificação de coexistência (se ela acontece ou não) como também de dimensionamento de sua magnitude.

Através do uso destas métricas propostas (LQI, RSSI, PER ou PDR) novos testes devem ser feitos, a fim de comprovar o fenômeno de sobreposição de canais de duas redes distintas e caracterizar e interferência inserida.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Winter, J.M.; Lima, C.; Muller, I.; Pereira, C.E.; Netto, J.C., "WirelessHART Routing Analysis Software," *Computing System Engineering (SBESC), 2011 Brazilian Symposium on*, vol., no., pp.96,98, 7-11 Nov. 2011
- [2] Muller, I.; Pereira, C.E.; Netto, J.C.; Fabris, E.E.; Allgayer, R., "Development of a WirelessHART compatible field device," *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2010 IEEE*, vol., no., pp.1430,1434, 3-6 May 2010
- [3] MULLER, I.; PEREIRA, C.E.; NETTO, J.C.; "Practical aspects in *WirelessHART* protocol usage," *Computing System Engineering (SBESC), 2011 Brazilian Symposium on*, vol., no., pp.96,98, 7-11 Nov. 2011
- [4] WINTER, J.M.;PEREIRA, C.E.; "Software de Análise de Roteamento de Dispositivos *WirelessHART*," Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), UFRGS, Dez 2010
- [5] AUGUSTO, T.N.; PIMENTA, K.B.; "Redes de Comunicação para Sistemas de Automação Industrial," Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação), UFOP, Agosto 2009
- [6] CHEN, D.; MOK, A. K.; "Developing New Generation of Process Control Systems." In: IEEE Real-Time Embedded System Workshop, 2001, San Diego, USA
- [7] GUEDES, L.A. Classificação das redes para automação industrial. 2005. Disponível em: < http://www.dca.ufrn.br/~affonso/DCA0447/aulas/rai_cap3_part1.pdf > Acesso em 24 mai.2013
- [8] CUNHA,R. L. R. Redes Wireless em chão de fábrica. Revista Mecatrônica Atual - Ano 4 - Edição 31 - Dez/Jan/2006/2007
- [9] Willig, A.; Matheus, K.; Wolisz, A., "Wireless Technology in Industrial Networks," *Proceedings of the IEEE*, vol.93, no.6, pp.1130,1151, Jun 2005
- [10] Página da UNIVASF da disciplina de Principios de Comunicação [Online] Acessado em Maio de 2013. <http://www.univasf.edu.br/~edmar.nascimento>

- [11] Pardue, Mark D., "Fine-Tuning the OSI Model: Layer Functions and Services," *Military Communications Conference - Crisis Communications: The Promise and Reality, 1987. MILCOM 1987. IEEE* , vol.1, no., pp.0199,0203, 19-22 Oct. 1987
- [12] Yadong Li; Wenqiang Cui; Danlan Li; Rui Zhang, "Research based on OSI model," *Communication Software and Networks (ICCSN), 2011 IEEE 3rd International Conference on* , vol., no., pp.554,557, 27-29 May 2011
- [13] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," *IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)* , vol., no., pp.1,314, Sept. 5 2011
- [14] MOTTER, P.F.; PEREIRA, C.E.; "Sistema de Localização de Objetos Alvo Utilizando Redes de Sensores Sem Fio," Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), UFRGS, Julho 2010
- [15] MICROSOFT Corp.; Página de suporte técnico da Microsoft. [Online] Acessado em Maio de 2013. <http://support.microsoft.com/kb/103884/pt-br>
- [16] WIKIPEDIA; Enciclopédia Virtual [Online] Acessado em Maio de 2013. http://en.wikipedia.org/wiki/Data_link_layer
- [17] Crow, B.P.; Widjaja, I.; Kim, J.G.; Sakai, P., "Investigation of the IEEE 802.11 medium access control (MAC) sublayer functions," *INFOCOM '97. Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Driving the Information Revolution., Proceedings IEEE* , vol.1, no., pp.126,133 vol.1, 7-12 Apr 1997
- [18] FREESCALE;"Simple Media Access Controller" – User's Guide. 2008
- [19] Tamilselvan, G. M.; Shanmugam, A., "Probability of channel collision and PER analysis of coexistence heterogeneous networks for various topologies," *Control, Automation, Communication and Energy Conservation, 2009. INCACEC 2009. 2009 International Conference on* , vol., no., pp.1,7, 4-6 June 2009
- [20] Rihan, M.; El-Khamy, M.; El-Sharkawy, M., "On ZigBee coexistence in the ISM band: Measurements and simulations," *Wireless Communications in Unusual and Confined Areas (ICWCUCA), 2012 International Conference on* , vol., no., pp.1,6, 28-30 Aug. 2012

- [12] Página de tutoriais da empresa WirelessNets Solutions [Online]. Acessado em Jun 2013: www.wireless-nets.com/resources/tutorials/conduct_wireless_site_survey.html
- [22] TAMOGRAPH Networks.; Página da web de suporte técnico da empresa Tamograph solutions [Online] Acessado em Maio de 2013. <http://www.tamos.com/htmlhelp/tg/>
- [23] SECUREDGE Networks.; Web page of technical support IT solutions blog [Online] Acessado em Maio de 2013. <http://www.securedgenetworks.com/secure-edge-networks-blog/bid/53242/How-much-does-a-wireless-site-survey-cost>
- [24] Vlavianos, A.; Law, L.K.; Broustis, I.; Krishnamurthy, S.V.; Faloutsos, Michalis, "Assessing link quality in IEEE 802.11 Wireless Networks: Which is the right metric?," *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on*, vol., no., pp.1,6, 15-18 Sept. 2008
- [25] Lavric, A.; Popa, V.; Finis, I.; Gaitan, A.; Petrariu, A., "Packet Error Rate analysis of IEEE 802.15.4 under 802.11g and Bluetooth interferences," *Communications (COMM), 2012 9th International Conference on*, vol., no., pp.259,262, 21-23 June 2012
- [26] Azimi-Sadjadi, Babak, et al. "Interference effect on IEEE 802.15. 4 performance." *Proceedings of 3rd International Conference on Networked Sensing Systems (INNS)*, Chicago, IL. 2006.
- [27] MC1322x SMAC Reference Manual
- [28] Digi Company; Página de suporte técnico da Digi. [Online] Acessado em Maio de 2013. <http://www.digi.com/support/kbase/kbaseresultdetl?id=2084>
- [29] TEXAS INSTRUMENTS; "RSSI" - Application Note AN042. 2006.
- [30] e2e Company; Página de suporte técnico da e2e. [Online] Acessado em Maio de 2013. http://e2e.ti.com/support/low_power_rf/w/design_notes/calculation-and-usage-of-lqi-and-rssi.aspx
- [31] Freescale MC13224x Datasheet, Technical Data. Revision 1.3,2010.
- [32] "GPS ME-1000RW datasheet", ME Componentes e Equipamentos Eletrônicos <http://www.meocomp.com.br>. Acessado em Julho de 2013.

[33] Aglient FieldFox RF Analyzer N9912A Manual do Usuário.

[34] “D-ITG 2.6 GUI 0.91.1 beta ”, Página de Volker Semken [Online] Acessado em Julho de 2013.
<http://www.semken.com/projekte/>

[35] “Wifi Spectrum Analyzer”, Aplicativo disponível no Google Store [Online]
https://play.google.com/store/apps/details?id=com.farproc.wifi.analyzer&hl=pt_BR Acessado em Julho de 2013.

[36] Etrex Garmin.GPS Manual do Usuário.

[37] Tamilselvan, G. M.; Shanmugam, A., "Probability of channel collision and PER analysis of coexistence heterogeneous networks for various topologies," Control, Automation, Communication and Energy Conservation, 2009. INCACEC 2009. 2009 International Conference on , vol., no., pp.1,7, 4-6 Junho de 2009.

[38] Instrumentação e fundamentos de medidas, volume 1 / Alexandre Balbinot, Valner João Brusamarello. – 2.ed. – [Reimpr.]. – Rio de Janeiro: LTC, 2011.