

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ATUALIZAÇÃO DO LABORATÓRIO DE ANTENAS DO
ENE/UNB PARA MEDIÇÃO DE SINAIS EM AMBIENTE
WIRELESS OPERANDO ATÉ 6GHZ**

MAURICIO DE ALMEIDA SILVA

**ORIENTADOR: MARCO ANTONIO BRASIL TERADA
CO-ORIENTADOR: FRANKLIN COSTA DA SILVA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM – 434/2011

BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2011

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ATUALIZAÇÃO DO LABORATÓRIO DE ANTENAS DO ENE/UNB
PARA MEDIÇÃO DE SINAIS EM AMBIENTE WIRELESS OPERANDO
ATÉ 6GHZ**

MAURICIO DE ALMEIDA SILVA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**MARCO ANTONIO BRASIL TERADA, PhD, Virginia Tech – EUA
(ORIENTADOR)**

**PLINIO RICARDO GANIME ALVES - Doutor, ENE - UnB
(EXAMINADOR INTERNO)**

**SIDNEY CERQUEIRA BISPO DOS SANTOS – Doutor – Faculdade Michelangelo
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA / DF, 15 de março de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, MAURICIO DE ALMEIDA
ATUALIZAÇÃO DO LABORATÓRIO DE ANTENAS DO ENE/UNB PARA MEDIÇÃO
DE SINAIS EM AMBIENTE WIRELESS OPERANDO ATÉ 6GHZ

xvi, 81p., 210 mm x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2011).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Antenas 2. Predição de sinais 3. Medição de sinais 4. WiMAX

I. ENE/FT/UnB. II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, M. A. (2011). ATUALIZAÇÃO DO LABORATÓRIO DE ANTENAS DO ENE/UNB PARA MEDIÇÃO DE SINAIS EM AMBIENTE WIRELESS OPERANDO ATÉ 6GHZ. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-434/2011, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: MAURICIO DE ALMEIDA SILVA

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ATUALIZAÇÃO DO LABORATÓRIO DE ANTENAS DO ENE/UNB PARA MEDIÇÃO DE SINAIS EM AMBIENTE WIRELESS OPERANDO ATÉ 6GHZ.

GRAU: Mestre ANO: 2011.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

MAURICIO DE ALMEIDA SILVA
SHCES Quadra 1105 Bloco H Aptº 103 – Cruzeiro Novo
70.658-158 – Brasília - DF

Este trabalho é dedicado especialmente a minha mãe,
por sempre me incentivar a estudar e me apoiar em todos os meus planos.
Dedico também a minha namorada Ana Luiza, pelo apoio
e por toda a compreensão que teve comigo durante o período desse curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente ao professor Marco Antônio Brasil Terada, por ter me orientado durante todo o período deste curso, bem como ao professor Franklin Costa da Silva, por toda a ajuda com relação ao laboratório de antenas e à co-orientação sempre presente.

Agradeço ao colega Paulo Henrique Sales Wanderley, pela ajuda e parceria constante durante o desenvolvimento e execução deste trabalho.

Agradeço também à empresa Wixx (Pablo), pela disponibilidade de repassar as informações referentes à sua infraestrutura, sinal transmitido e pela disponibilização de seus equipamentos, o que possibilitou a realização das medidas do sinal utilizando a tecnologia WiMAX e, posteriormente, a análise mais detalhada dos resultados obtidos. Agradeço ainda ao professor Ugo Dias e ao colega Diogo, pela ajuda com os equipamentos disponibilizados pela empresa Wixx e utilizados nos experimentos do laboratório de antenas do ENE/UnB.

RESUMO

ATUALIZAÇÃO DO LABORATÓRIO DE ANTENAS DO ENE/UNB PARA MEDIÇÃO DE SINAIS EM AMBIENTE WIRELESS OPERANDO ATÉ 6GHZ

Autor: MAURICIO DE ALMEIDA SILVA

Orientador: Marco Antônio Brasil Terada

Co-orientador: Franklin Costa da Silva

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, Março de 2011

Atualmente, as pessoas estão usufruindo de acesso à internet wireless por meio de serviços de telefonia, rádio e televisão. O rápido crescimento da internet wireless proporciona uma demanda por meios de acesso com cada vez mais velocidade. Para atender a esta demanda por acesso à internet a qualquer momento e garantindo qualidade do serviço, o grupo de trabalho IEEE 802.16 definiu uma nova tecnologia de banda larga para acesso wireless chamada de WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access).

Desde o início da implantação do primeiro sistema de telecomunicação móvel, existe o interesse em se ter uma previsão de como tais sinais se comportariam, quais os fatores seriam significantes neste comportamento. Outra preocupação crescente foi o modo de realizar as medidas destes mesmos sinais e quais seriam os passos a seguir e os padrões a serem observados.

Foi a partir destes fatores de motivação, que vários pesquisadores dedicaram parte do seu tempo na realização de estudos com base empírica e determinísticas para obtenção de modelos que forneçam uma boa previsão dos comportamentos dos sinais que estavam sendo transmitidos.

Desta forma, para permitir a realização de estudos envolvendo sinais gerados na faixa de frequência da tecnologia WiMAX (2,5 GHz, 3,5 GHz e 5,8 GHz), foi realizada prospecção de equipamentos que poderiam ser adquiridos para atualização do laboratório de antenas e consequente realização de experimentos didáticos envolvendo frequências de até 6GHz. Tendo sido adquirido o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A e GPS (eTrexH da Garmin), bem como cabos e antenas que viabilizassem a realização de experimentos

didáticos no laboratório de antenas.

Foram realizados testes com os equipamentos adquiridos e executados experimentos didáticos no laboratório de antenas (validação de diagrama de radiação de uma das antena e da fórmula de Friis para perda no espaço livre). Foi realizado ainda contato com empresa de Brasília que está operando com a tecnologia WiMAX em 5,8 GHz, objetivando realizar experimentos de medida do sinal gerado por esta empresa e posterior comparação dos resultados obtidos com alguns modelos de predição.

ABSTRACT

UPDATE OF THE ENE/UNB LABORATORY OF ANTENNAS FOR MEASUREMENT OF SIGNALS IN WIRELESS ENVIROMENTS OPERATING UP TO 6GHz

Author: MAURICIO DE ALMEIDA SILVA

Supervisor: Marco Antônio Brasil Terada

Co-Supervisor: Franklin Costa da Silva

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Brasilia, March 2011

Nowadays, people are using wireless internet access for telephony, radio and television services. The rapid growth of wireless internet causes a demand for high speed ways of access. In order to serve the demand for access to the internet and to ensure quality of service, the IEEE 802.16 working group introduced a new broadband wireless access technology referred to as WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access).

Since the beginning of the implementation of the first mobile telecommunication system, it is useful to predict how is the behavior of such signals and which factors could determine this behavior. Another increasing concern was the way to perform the measurements of these same signals and which steps are required, as well as the standards that needed to be observed.

Within this context, many researchers conducted empirical and deterministic studies to obtain models that provide a good prediction of the electrical behavior of the signals that are being transmitted.

In order to investigate signal in the frequency range of WiMAX (2.5 GHz, 3.5 GHz and 5.8 GHz), we specified and acquired equipments to upgrade the antenna laboratory and performed teaching experiments involving frequencies up to 6GHz. We also purchased the Agilent N9912A FieldFox RF Analyzer and GPS (Garmin eTrexH), as well as cables and antennas to perform the educational experiments (validation of the radiation patterns of antennas and the Friis formula for free space loss).

Finally, we also contacted a company in Brasilia, which is operating commercially with WiMAX at 5.8 GHz, and carried out experiments to measure the signal generated by this company and compared the results obtained with a few prediction models available in the literature.

ÍNDICE

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1. | OBJETIVOS..... | 17 |
| 1.2. | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 18 |
| 2. | PADRÃO IEEE 802.16 (WiMAX) | 19 |
| 2.1. | CARACTERÍSTICAS DO WiMAX..... | 19 |
| 2.2. | VERSÕES DO PADRÃO IEEE 802.16 (WiMAX)..... | 22 |
| 2.2.1. | IEEE 802.16A | 22 |
| 2.2.2. | IEEE 802.16-2004..... | 23 |
| 2.2.3. | IEEE 802.16E-2005..... | 23 |
| 2.3. | FREQUÊNCIAS UTILIZADAS | 23 |
| 3. | MODELOS DE PROPAGAÇÃO | 25 |
| 3.1. | MODELO DO ESPAÇO-LIVRE E TERRA-PLANA..... | 25 |
| 3.2. | MODELO DE OKUMURA-HATA | 29 |
| 3.3. | MODELO COST 231 HATA | 31 |
| 3.4. | MODELO ECC-33 | 32 |
| 3.5. | MODELO STANFORD UNIVERSITY INTERIM (SUI)..... | 32 |
| 3.6. | MODELO COST 231 IKEGAMI-WALFISH | 34 |
| 3.7. | MODELO ERICSSON | 37 |
| 4. | ATUALIZAÇÃO DO LABORATÓRIO DE ANTENAS..... | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1. INFRAESTRUTURA PREVIAMENTE EXISTENTE | 39 |
| 4.1.1. Antenas | 39 |
| 4.1.2. Cabos..... | 40 |
| 4.1.3. Equipamentos..... | 40 |
| 4.2. INFRAESTRUTURA ADQUIRIDA PARA ATUALIZAÇÃO | 45 |
| 4.2.1. Antenas | 45 |
| 4.2.2. Cabos..... | 48 |
| 4.2.3. Equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A..... | 49 |
| 5. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO | 53 |
| 5.1. PASSOS PARA REALIZAÇÃO DAS MEDIDAS..... | 53 |
| 5.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO | 55 |
| 5.2.1. Características da infraestrutura de transmissão do sinal | 55 |
| 5.2.2. Antena transmissora..... | 56 |
| 5.2.3. Antena receptora..... | 57 |
| 5.2.4. Analisador RF - Agilent FieldFox (N9912A)..... | 58 |
| 5.2.5. Avaliação do espectro de frequência brasileiro objetivando utilização do mesmo para fins didáticos | 58 |
| 5.2.6. Procedimentos específicos para a realização do ensaio..... | 59 |
| 5.3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA MEDIDA DO SINAL WiMAX..... | 63 |
| 5.3.1. Características da infraestrutura de transmissão do sinal | 63 |
| 5.3.2. Antena transmissora..... | 65 |

| | | |
|---|--|----|
| 5.3.3. | Antena receptora..... | 66 |
| 5.3.4. | Analisador RF - Agilent FieldFox (N9912A)..... | 66 |
| 6. | RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE..... | 67 |
| 6.1. | RESULTADOS DAS MEDIDAS REALIZADAS..... | 67 |
| 6.1.1. | Ensaio no laboratório de antenas | 67 |
| 6.1.2. | Sinal WiMAX | 69 |
| 6.2. | ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 77 |
| 6.2.1. | Ensaio no Laboratório de Antenas..... | 77 |
| 6.2.2. | Sinal WiMAX | 80 |
| 7. | CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO..... | 85 |
| 8. | REFERÊNCIAS | 87 |
| APÊNDICE – GUIA DE UTILIZAÇÃO (EQUIPAMENTO AGILENT FIELDFOX RF ANALYZER N9912A) | | 89 |
| 1. | Função S21..... | 89 |
| 2. | Analisador de espectro | 90 |

ÍNDICE DE TABELAS

| Tabela | Página |
|---|--------|
| Tabela 1 – Frequências utilizadas para o WiMAX..... | 23 |
| Tabela 2 – Tipos de terreno para o modelo SUI..... | 33 |
| Tabela 3 – Perdas dos cabos RG213U e RG214U para frequência de até 2500MHz..... | 40 |
| Tabela 4 – Perda dos cabos pesquisados para a frequência de até 6000MHz..... | 48 |
| Tabela 5 – Faixas de frequências com restrições de uso definidas pela ANATEL..... | 59 |
| Tabela 6 – Lista dos equipamentos utilizados no ensaio..... | 60 |
| Tabela 7 – Perdas proporcionadas por cada um dos cabos..... | 67 |
| Tabela 8 – Configuração realizada no equipamento..... | 70 |
| Tabela 9 – Resultados dos modelos de predição e percentual diferencial com relação à potência medida experimentalmente de -57,56 dBm..... | 81 |
| Tabela 10 – Resultados obtidos utilizando os modelos de predição para as configurações utilizadas nos experimentos realizados no Laboratório de Antenas do ENE/UnB..... | 83 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | Página |
|---|--------|
| Figura 2.1 – Rede WiMAX..... | 20 |
| Figura 2.2 – Estação base WiMAX | 21 |
| Figura 2.3 – Arquitetura da estação base..... | 21 |
| Figura 2.4 – CPE WiMAX internas..... | 22 |
| Figura 3.1 – Radiação isotrópica causando perda no espaço livre..... | 25 |
| Figura 3.2 – Situação física para perda terra-plana..... | 27 |
| Figura 3.3 – Situação física para a perda definida pelo cost 231 ikegami-walfish (i-w)..... | 35 |
| Figura 4.1 – Controlador e indicador de posição..... | 41 |
| Figura 4.2 – Posicionador de azimute e elevação..... | 41 |
| Figura 4.3 – Transmissor que se conecta a antena padrão..... | 42 |
| Figura 4.4 – Seletor de frequência do transmissor..... | 42 |
| Figura 4.5 – Receptor de Microondas..... | 43 |
| Figura 4.6 – Seletores do receptor de Microondas..... | 43 |
| Figura 4.7 – Visualizador do sinal recebido..... | 43 |
| Figura 4.8 – Medida de cabo necessária realizada no telhado do laboratório de antenas..... | 44 |
| Figura 4.9 – Medida de cabo necessária realizada dentro do laboratório de antenas..... | 45 |
| Figura 4.10 – Antena Hyperlink HG2412U-PRO-NA..... | 46 |
| Figura 4.11 – Diagrama de radiação da Antena Hyperlink HG2412U-PRO-NA..... | 46 |
| Figura 4.12 – Antena Hyperlink HG3511UPRO..... | 46 |
| Figura 4.13 – Diagrama de radiação da Antena Hyperlink HG3511UPRO..... | 47 |
| Figura 4.14 – Antena Hyperlink HG5808U | 47 |
| Figura 4.15 – Diagrama de radiação da Hyperlink HG5808U | 48 |
| Figura 4.16 – Visão frontal, topo e lateral do equipamento Agilent FieldFox..... | 51 |
| Figura 4.17 – Equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A..... | 51 |
| Figura 4.18 – Especificações do intervalo dinâmico do equipamento Agilent FieldFox..... | 52 |
| Figura 5.1 – Antena Miniparabólica Aquário – MM-5825..... | 56 |
| Figura 5.2 – Diagrama de radiação da Antena Miniparabólica Aquário – MM-5825..... | 56 |
| Figura 5.3 – Antena Hyperlink HG5808U | 57 |
| Figura 5.4 – Diagrama de radiação da Hyperlink HG5808U | 57 |
| Figura 5.5 – Equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) no laboratório..... | 61 |
| Figura 5.6 – Antena Hyperlink HG5808U em bancada do laboratório..... | 61 |
| Figura 5.7 – Antena Miniparabólica Aquário – MM-5825 em bancada do laboratório..... | 61 |
| Figura 5.8 – Antena Hyperlink HG5808U fixada no posicionador..... | 62 |
| Figura 5.9 – Antena Miniparabólica Aquário – MM-5825 fixada..... | 62 |
| Figura 5.10 – Sistema composto pelas antenas de transmissão e recepção..... | 62 |
| Figura 5.11 – Diagrama de radiação da antena de transmissão do sinal WiMAX..... | 65 |
| Figura 5.12 – Características mecânicas da antena de transmissão do sinal WiMAX..... | 65 |
| Figura 6.1 – Imagem obtida com o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) operando em modo S21..... | 68 |
| Figura 6.2 – Diagrama de radiação experimental (esquerda) e teórico (direita) da Antena Hyperlink HG5808U | 69 |
| Figura 6.3 – Imagem obtida com o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) operando no modo Analisador de Espectro e com as configurações descritas na Tabela 8.... | 71 |
| Figura 6.4 – BSU disponibilizada pela empresa de Brasília (Potência máxima de 22 dBm)... | 72 |
| Figura 6.5 – Antena setorial diretiva disponibilizada pela empresa de Brasília (Figura 5.11 e Figura 5.12)..... | 72 |

| | |
|--|----|
| Figura 6.6 – Antena diretiva na transmissão e omni na recepção, distância de 1 metro entre transmissão e recepção..... | 73 |
| Figura 6.7 – Imagem obtida com o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) operando no modo Analisador de Espectro na Configuração 1..... | 74 |
| Figura 6.8 – Antenas diretivas na transmissão e na recepção, com uma distância de 8,3 metros entre transmissão e recepção..... | 74 |
| Figura 6.9 – Imagem obtida com o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) operando no modo Analisador de Espectro na Configuração 2..... | 75 |
| Figura 6.10 – Antenas diretivas na transmissão e na recepção, com uma distância de 24,662 metros entre transmissão e recepção..... | 76 |
| Figura 6.11 – Imagem obtida com o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) operando no modo Analisador de Espectro na Configuração 3..... | 77 |
| Figura 6.12 – Antena transmissora localizada no alto do prédio (marcado de vermelho) e antena receptora HG5808U da Hyperlink..... | 80 |
| Figura 9.1 – Sinal GSM obtido com varredura de aquisição automática (azul) e após alteração da varredura de aquisição para 50..... | 93 |

ACRÔNIMOS

ARP – Address Resolution Protocol

BCD – Binary-Code Decimal

BSU – Base Station Unit

CPE – Customer Premise Equipment

ERB – Estação Rádio Base

FDD – Frequency Division Duplex

GPS – Global Positioning System

LOS – Line-of-Sight

NLOS – Non-Line-of-Sight

PCMCIA – Personal Computer Memory Card International Association

PMP – Ponto-Multi-Ponto

POP – Point of Presence

PtP – Ponto-a-Ponto

RBW – Resolution Bandwidth

SUI – Stanford University Interim

TDD – Time Division Duplex

VSWR – Voltage Standing Wave Ratio

Wi-Fi – Wireless Fidelity

WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access

1. INTRODUÇÃO

As telecomunicações estão mudando drasticamente com a crescente pressão do desenvolvimento acelerado das tecnologias e intensificação da competição. O desenvolvimento mais significativo na indústria das comunicações nos últimos dez anos tem sido o aumento considerável na capacidade das redes e a queda frequência do preço dos serviços [1].

O aumento da capacidade das redes foi ocasionado pelo desenvolvimento da indústria sem fio, e para a sua implementação demanda-se cada vez mais um melhor aproveitamento do espectro de frequência. Uma das últimas grandes tecnologias é o WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), que opera em frequência da ordem de alguns GHz.

No presente trabalho, realizou-se o levantamento de equipamentos necessários para atualizar o laboratório de antenas com o objetivo de realizar experimentos para frequências de até 6 GHz, a compra e implementação das mesmas, além de terem sido feitas medidas de sinal utilizando tecnologia WiMAX, gerado por uma empresa de Brasília, operando em banda não licenciada e na faixa de frequência de 5,725 a 5,850 GHz (faixa aberta), logo, com potência muito baixa, para posterior comparação com alguns dos modelos de predição.

1.1. OBJETIVOS

Como objetivo desse trabalho, pretende-se realizar experimentos didáticos de obtenção do diagrama de radiação de uma antena e de validação da Fórmula de Friis para perda no espaço livre, a serem realizados no laboratório de antenas do ENE/UnB, utilizando os equipamentos adquiridos para sua atualização.

Além disso, serão realizadas medidas de sinal utilizando a tecnologia WiMAX operando na faixa de frequência de 5,725 a 5,850 GHz. A partir destas medidas, será realizada comparação dos resultados práticos obtidos e os resultados teóricos fornecidos por modelos de predição, considerando os mesmos pontos, objetivando avaliar qual destes apresenta resultado mais próximo do obtido experimentalmente.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2, será apresentada a tecnologia WiMAX e alguns dos seus padrões, bem como as frequências utilizadas pela mesma em alguns países.

No capítulo 3, serão apresentados alguns dos modelos de propagação para predição da potência de sinais.

No capítulo 4, serão detalhados os equipamentos que compõem a infraestrutura existente no laboratório de antenas, bem como os equipamentos adquiridos para atualização desta infraestrutura, e para que possa operar com frequência de até 6 GHz.

No capítulo 5, serão apresentados os passos seguidos para realização das medidas feitas no ensaio didático de alguns experimentos no laboratório de antenas do ENE/UnB e também aqueles necessários para medição do sinal da tecnologia WiMAX.

No capítulo 6, será realizada a análise dos resultados obtidos no ensaio realizado no laboratório de antenas do ENE/UnB por meio de comparação com os resultados teóricos relacionados. Neste capítulo, também será feita a análise das medidas do sinal WiMAX com relação a alguns dos modelos de propagação e predição de potência do sinal.

Para finalizar, o capítulo 7 descreve a conclusão a que se chegou com esse trabalho.

2. PADRÃO IEEE 802.16 (WIMAX)

Neste capítulo, serão descritas as características gerais do padrão IEEE 802.16 (WiMAX), bem como a diferenciação existente entre as versões que compõem a família deste padrão, detalhando as características específicas que os diferenciam. Por fim, serão descritas as possíveis faixas de frequência que podem ser alocadas para operação deste padrão.

2.1. CARACTERÍSTICAS DO WIMAX

A tecnologia WiMAX pode atingir uma cobertura teórica de 55 km de raio e atingir taxas de transferência da informação acima de 75 Mbps. No entanto, em distâncias extremamente longas, a performance de vazão fica próxima de 1,5 Mbps, valores estes típicos dos serviços de banda larga, estes serviços disponibilizados são então de certa forma baseados no provisionamento de taxas que levam em consideração a obtenção de preços diferenciados, semelhante ao utilizado por serviços cabeados de banda larga [1].

O conceito geral de área metropolitana de rede sem fio, como vislumbrada com 802.16, começa com a que é chamado de sem-fio fixo. Aqui, um ponto central das estações-base é conectado a uma rede pública, e cada estação-base suporta centenas de estações-assinantes fixas, as quais podem ser tanto hot spot públicos Wi-Fi quanto redes de empresas protegidas por firewall. Mais tarde no ciclo de desenvolvimento, surge o 802.16e, padrão WiMAX que suporta tecnologia sem fio móvel – isto é, transmissão sem fio diretamente para o móvel e usuários [1].

Novas empresas, bem como indivíduos, estão adotando gradativamente a banda larga, enquanto que aqueles que já utilizam banda larga estão se tornando dependente deste e estão demandando melhores serviços com benefícios adicionais. Para suportar esta nova demanda sem precedentes, banda larga sem fio tem surgido como uma solução viável. WiMAX, graças a seus benefícios característicos, possui grande promessa de ser o futuro das comunicações em banda larga [1].

Uma estação base WiMAX é conectada à rede pública usando fibra ótica, cabo, enlace de microondas ou qualquer outra forma de conexão ponto-a-ponto de alta velocidade. Idealmente, WiMAX deveria usar antenas ponto a ponto para conectar localizações agregadas de assinantes umas com as outras e com as estações bases ao longo de grandes distâncias [1].

Uma estação-base serve à estação do assinante (também chamada customer premise equipment – CPE – por razões óbvias) usando nenhuma linha de visada (non-line-of-sight-NLOS) ou usando linha de visada (line-of-sight-LOS) com conectividade ponto para multiponto, sendo esta conexão referente à última milha. Idealmente, WiMAX deve usar antenas NLOS ponto para multiponto para conectar assinantes residenciais ou comerciais a estação base, conforme mostrado na Figura 2.1 [1].

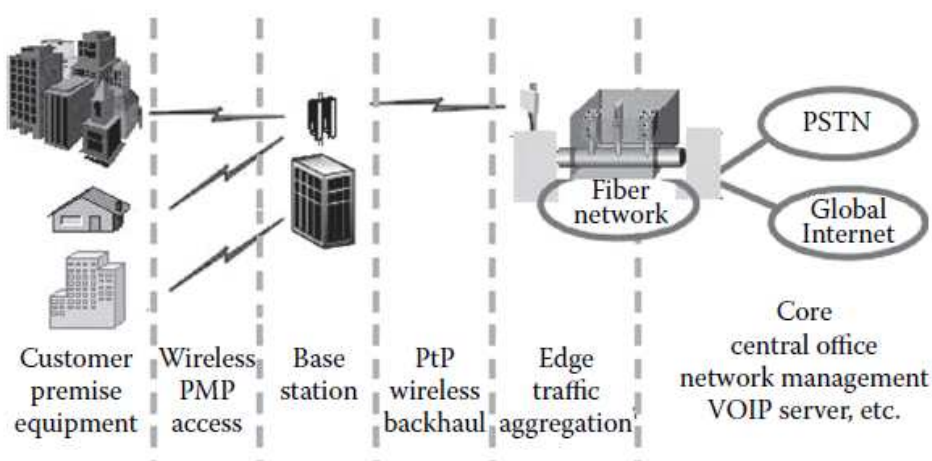


Figura 2.1 – Rede WiMAX [1]

Geralmente, um sistema WiMAX é formado de duas partes, uma estação base WiMAX e um receptor WiMAX (também referido como CPE) [1].

Tipicamente, uma estação base (Figura 2.2) pode cobrir acima de 10 km de raio (teoricamente, uma estação base pode cobrir acima de 50 km de raio, mas considerações práticas a limitam a aproximadamente 10 km). Qualquer nó sem fio dentro da área de cobertura estará habilitado a acessar a internet [1].



Figura 2.2 – Estação base WiMAX [1]

As estações base WiMAX podem utilizar como meio de acesso a camada de controle definida no padrão (uma interface comum que permite a interoperabilidade da rede) e pode alocar largura de banda para o enlace de subida e enlace de descida para os assinantes de acordo com suas necessidades, em base essencialmente do tempo real (Figura 2.3) [1].

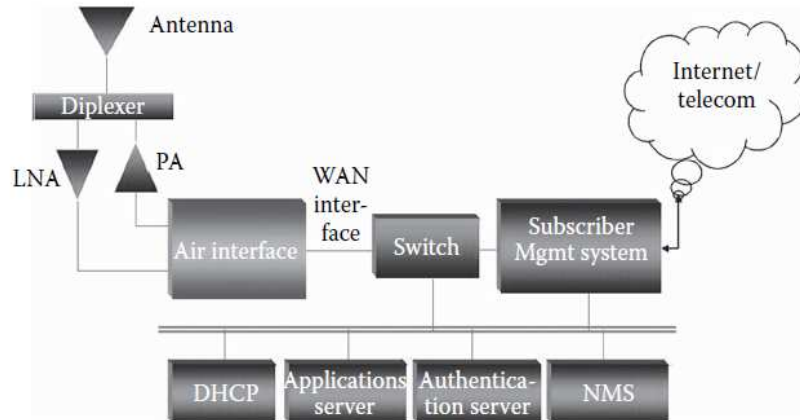


Figura 2.3 – Arquitetura da estação base [1]

Um receptor WiMAX, o qual é também referenciado como CPE (Figura 2.4), pode ter antenas separadas (receptores eletrônicos e antena são módulos separados) ou pode ser uma caixa única com cartão PCMCIA que se encaixa em um laptop ou computador. Acesso a uma estação base WiMAX é similar ao modo de acesso sem fio a um ponto de acesso (AP) em uma rede Wi-Fi, mas a cobertura é maior [1].



Figura 2.4 – CPE WiMAX internas [1]

2.2. VERSÕES DO PADRÃO IEEE 802.16 (WIMAX)

2.2.1. IEEE 802.16A

O IEEE 802.16a é otimizado para operar em frequência entre 2 e 11GHz. Este também é mais flexível com relação à escolha da largura de canais, incluindo canais tão estreitos quanto 1,75 MHz para permitir ser utilizado onde somente pequenas alocações estão disponíveis. Esta versão é considerada comercialmente atrativa atualmente, pois esta faixa cobre um número considerável de bandas altamente utilizadas encontradas ao redor do mundo [1].

As bandas não licenciadas estão dentro desta faixa de cobertura. Sistemas 802.16a são sistemas de longo alcance que, em um primeiro momento, não parecem ser atrativos para utilização em bandas não licenciadas, onde interferências entre operadoras concorrentes pode se tornar um problema. Contudo, particularmente em ambiente rural e mercados em desenvolvimento, existe espectro não licenciado suficiente e competição suficientemente pequena, o que pode fazer que as operadoras considerarem a possibilidade da sua utilização bastante razoável [1].

Existem também bandas comumente consideradas disponíveis em 2,5GHz e 3,4GHz em diversos países, que podem ser licenciadas para uso de serviço de acesso à informação. Nestes, o 802.16a parece ser uma boa escolha para estes sistemas também. Uma operadora licenciada para uso exclusivo de parte de uma destas bandas poderá

oferecer acesso banda larga sem fio em áreas urbanas ou suburbanas mais densamente povoadas sem preocupações de interferência [1].

2.2.2. IEEE 802.16-2004

Também conhecido como 802.16d, incorpora e torna obsoletas as versões 802.16 e 802.16^a. Este também suporta espectros abaixo de 11GHz. Esta versão foi finalizada em 24 de junho de 2004. Tanto TDD (time division duplex) e FDD (frequency division duplex) são opções de transmissão disponíveis dentro do 802.16d [1].

2.2.3. IEEE 802.16E-2005

A extensão IEEE 802.16e adiciona suporte a estações assinantes móveis. O 802.16e fornece direcionamento para mobilidade/portabilidade nas camadas MAC e PHY. Este não permite mobilidade em camadas mais altas. O padrão móvel (802.16e) atingiu concepção final, incorporando modo de escalonamento da modulação do sinal para a mobilidade padrão. Estes sistemas irão exigir novos componentes de hardware nos módulos do assinante e, potencialmente, algumas mudanças no hardware nas estações base [1].

2.3. FREQUÊNCIAS UTILIZADAS

A escolha da frequência de operação tem consequências diretas no dimensionamento e no planejamento de uma rede wireless. A operadora tem que realizar uma avaliação entre as frequências disponíveis e a área de cobertura. A Tabela 1 abaixo mostra a utilização da frequência para a tecnologia WiMAX ao redor do mundo.

Tabela 1 – Frequências utilizadas para o WiMAX [9]

| Área Geográfica | Frequência (Licenciada) | Frequência (Não licenciada) |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| América do Norte | 2,3 e 2,5 GHz | 5,8 GHz |
| América do Sul e Central | 2,5 e 3,5 GHz | 5,8 GHz |

| | | |
|---------------|---------|---------|
| Europa | 3,5 GHz | 5,8 GHz |
| Ásia | 3,5 GHz | 5,8 GHz |
| Oriente Médio | 3,5 GHz | 5,8 GHz |

3. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Serão abordados neste capítulo, os diversos modelos de propagação existentes que possuem como objetivo permitir a predição da perda que será aplicada sobre a potência do sinal no decorrer do percurso entre o ponto de transmissão e o ponto de recepção considerados. Estes modelos serão utilizados posteriormente para avaliar os resultados das medidas obtidas experimentalmente (comparar-se-á os resultados teóricos obtidos pelos modelos e os obtidos experimentalmente).

3.1. MODELO DO ESPAÇO-LIVRE E TERRA-PLANA

Considerando a Fórmula de Friis, temos que

$$\frac{P_r}{P_t} = G_a G_b \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (3-1)$$

Sendo G_a e G_b os ganhos das antenas terminais, r é distância entre as antenas e λ é o comprimento de onda. Este pode ser visualizado como surgindo de um espalhamento esférico de potência sobre a superfície de uma esfera de raio r com centro na antena (Figura 3.1). Uma vez que a potência é espalhada sobre a área da superfície da esfera, esta decai em uma proporção de r^2 [3].

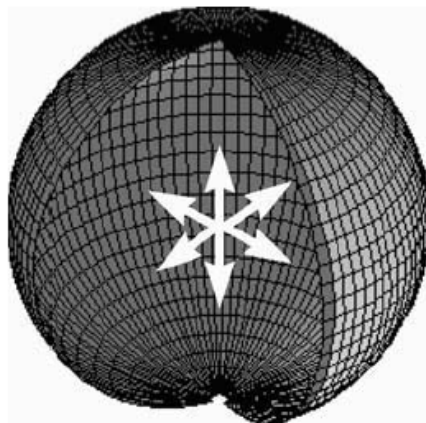


Figura 3.1 – Radiação isotrópica causando perda no espaço livre

A equação (3-1) pode ser rearranjada de forma a expressar uma perda de propagação no espaço livre:

$$L_F = \frac{P_t G_a G_b}{P_r} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi r f}{c} \right)^2 \quad (3-2)$$

Esta expressão define L_F , a perda no espaço livre. Deve ser percebida, especialmente, a dependência com a lei quadrática tanto com relação à frequência quanto com a distância [3].

Expressando a perda no espaço livre em decibéis, com a frequência em megahertz e distância R em quilômetros, se obtém

$$L_{F(dB)} = 32,4 + 20 \log R + 20 \log f_{MHz} \quad (3-3)$$

Então, a perda no espaço livre aumenta em 6 dB para cada vez que ocorre a duplicação na frequência ou distância (ou 20 dB por década de cada) [3].

Somente em condições de propagação altamente anômalas, a perda entre duas antenas pode ser menor do que o valor do espaço livre. Um exemplo de exceção para isto é quando a propagação é confinada a algum tipo de estrutura, tais como um guia de onda. Na maioria dos casos, devido a outras fontes de perda, a potência recebida será consideravelmente menor. O valor da perda no espaço livre é então usada como uma referência básica, e a perda que experimentalmente exceda este valor (em decibéis) é referenciada como perda excedida, L_{ex} [3]. Logo:

$$L = L_F + L_{ex} \quad (3-4)$$

Outra situação fundamental de propagação é ilustrada na Figura 3.2. Nesta, a base e antenas da estação móvel estão situadas acima de um plano terra refletor (terra-plana), em altura h_b e h_m , respectivamente; então, aquela propagação toma lugar por meio tanto de um caminho direto entre as antenas quanto de uma reflexão a partir da terra. Estes dois caminhos se somam no receptor com uma diferença de fase relacionado à diferença em comprimento entre os dois caminhos, conforme mostrado na Figura 3.2 [3].

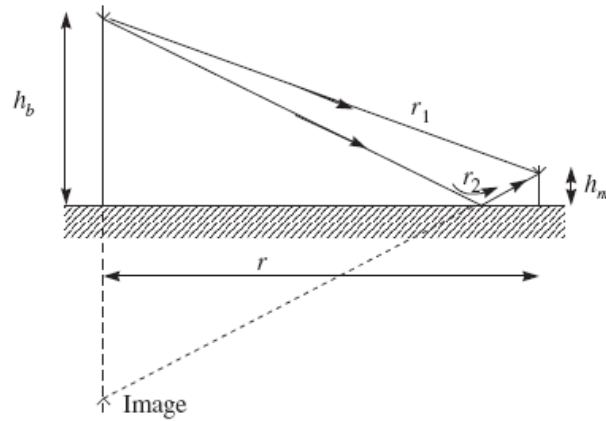


Figura 3.2 – Situação física para perda terra-plana [3]

Uma maneira simples para analisar a situação é fazer uso da teoria das imagens, a qual considera um raio refletido como vindo de uma imagem do transmissor no solo, apenas como se no solo existisse um espelho [3]. Então, fica assim fácil de visualizar que o comprimento do caminho dos raios direto e refletido (r_1 e r_2 , respectivamente) são dados por

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(h_b - h_m)^2 + r^2} \\ r_2 &= \sqrt{(h_b + h_m)^2 + r^2} \end{aligned} \quad (3-5)$$

A diferença do comprimento do caminho é então

$$(r_2 - r_1) = r \left[\sqrt{\left(\frac{h_b + h_m}{r}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{h_b - h_m}{r}\right)^2 + 1} \right] \quad (3-6)$$

Assumindo que as alturas das antenas são pequenas comparadas ao comprimento total do caminho ($h_b, h_m \ll r$), então a seguinte aproximação se aplica a partir do teorema do binômio [3], para $x \ll 1$.

$$(1 + x)^n \approx 1 + nx \quad (3-7)$$

O resultado é

$$(r_2 - r_1) \approx \frac{2h_m h_b}{r} \quad (3-8)$$

Uma vez que o comprimento do caminho é longo comparado à altura das antenas, as amplitudes de chegada das ondas são idênticas, com exceção da perda por reflexão, R . A amplitude geral do resultado (força do campo elétrico ou magnético) é, então [3]

$$A_{total} = A_{direto} + A_{refletido} = A_{direto} \left| 1 + R \cdot \exp\left(jk \frac{2h_m h_b}{r}\right) \right| \quad (3-9)$$

onde k é o harmônico do espaço livre.

Uma vez que a potência é proporcional ao quadrado da amplitude, tem-se [3]

$$\frac{P_r}{P_{direta}} = \left(\frac{A_{total}}{A_{direto}} \right)^2 = \left| 1 + R \cdot \exp\left(jk \frac{2h_m h_b}{r}\right) \right|^2 \quad (3-10)$$

onde P_r é a potência recebida.

O caminho direto é por si só sujeito à perda por espaço livre, então este pode ser expressado em termos da potência transmitida como [3]

$$P_{direta} = P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (3-11)$$

logo, a perda no caminho pode ser expressada como

$$\frac{P_r}{P_T} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \left| 1 + R \cdot \exp\left(jk \frac{2h_m 2h_b}{r}\right) \right|^2 \quad (3-12)$$

Uma vez que o ângulo de incidência com o solo é relativamente pequeno, a magnitude do coeficiente de reflexão será próximo de um, qualquer que seja a condutividade ou rugosidade. Se adicionalmente for assumido que o sinal sempre sofre uma mudança de fase de 180° , então $R \approx -1$ e o resultado pode ser expresso como [3]

$$\frac{P_r}{P_T} = 2 \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \left[1 - \cos \left(k \frac{2h_m h_b}{r} \right) \right] \quad (3-13)$$

Para pequenas distâncias, a influência da interferência entre os dois caminhos é visualizada como o sinal combinado resultado de distintos picos e percursos. À medida que a distância é aumentada, contudo, a perda cai monotonicamente. Considerando que para ângulos pequenos, $\cos\theta \approx 1 - \theta^2/2$, então a consideração anterior de que $h_b, h_m \ll r$ conduz para [3]

$$\frac{P_r}{P_T} \approx \left(\frac{\lambda}{4\pi r} k \frac{2h_m h_b}{r} \right)^2 \approx \frac{h_m^2 h_b^2}{r^4} \quad (3-14)$$

Expressando esta em decibéis,

$$L_{PEL} = 40 \log r - 20 \log h_m - 20 \log h_b \quad (3-15)$$

Esta é a forma comum da perda terra-plana. A perda terra-plana decresce mais rapidamente que a perda no espaço livre e esta é independente da frequência da portadora. A perda agora decresce por 12dB ao se dobrar a distância ou por 40dB a cada década [3].

A perda terra-plana não é um modelo sempre preciso da propagação no mundo real quando considerada isoladamente. Este somente se detém a longa distância e para casos onde a amplitude e fase da onda refletida é muito próxima da idealizada – 1. Na prática, a perda é quase nunca independente da frequência. Contudo, esta é algumas vezes utilizada como um caso de referência [3].

3.2. MODELO DE OKUMURA-HATA

Este é um modelo de predição completamente empírico [Okumura, 68], baseado inteiramente em uma série extensiva de medidas feitas nas proximidades da cidade de

Tóquio entre 200MHz e 2GHz. Não existe tentativa para basear as predições em um modelo físico como a perda terra-plana. Predição é feita por meio de uma série de gráficos, o mais importante destes foi aproximado em um conjunto de fórmulas [Hata, 80]. O resultado destes dois trabalhos unidos originou o modelo de predição para macro células mais utilizado, frequentemente referenciado como um padrão para avaliação de novas propostas. Os valores para área urbana apresentados no modelo foram padronizados para uso internacional pelo ITU – International Telecommunication Union [3].

O método consiste em dividir a área de predição em uma série de categorias de terreno e urbanização, chamadas de aberta, suburbana e urbana. Estas são descritas como [3]

- **Área aberta:** Espaço aberto, sem árvores altas ou construções no caminho, com visão clara de 300-400m a frente do ponto de medida (Ex.: fazendas, campos de arroz e campos abertos).
- **Área suburbana:** Vilarejos ou estradas cercadas com árvores e casas, com alguns obstáculos próximos ao aparelho móvel, mas não muito próximos.
- **Área urbana:** Cidade estabelecida ou grandes metrópoles com grandes construções e casas com um ou mais andares, ou grandes vilarejos com casas próximas, com densidade de árvores crescidas.

Okumura escolhe as áreas urbanas como referência e aplica fatores de correção para realizar conversões para as outras classificações. Uma série de tipos de terreno é também definido para quando esta informação se encontra disponível. Terreno quase liso é tomado como a referência e fatores de correção são adicionados para outros tipos [3].

As predições de Okumura para perda média no caminho são geralmente calculadas usando as aproximações de Hata, como a seguir [3]

$$\text{Áreas urbanas: } L_{dB} = A + B \log R - E \quad (3-16)$$

$$\text{Áreas suburbanas: } L_{dB} = A + B \log R - C \quad (3-17)$$

$$\text{Áreas abertas: } L_{dB} = A + B \log R - D \quad (3-18)$$

Onde

$$A = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_b \quad (3-19)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \log h_b \quad (3-20)$$

$$C = 2(\log(f_c/28))^2 + 5,4 \quad (3-21)$$

$$D = 4,78(\log f_c)^2 - 18,33 \log f_c + 40,94 \quad (3-22)$$

$$E = 3,2(\log(11,75h_m))^2 - 4,97 \quad \text{para grandes cidades e } f_c \geq 300\text{MHz} \quad (3-23)$$

$$E = 8,29(\log(1,54h_m))^2 - 1,1 \quad \text{para grandes cidades e } f_c < 300\text{MHz} \quad (3-24)$$

$$E = (1,1 \log f_c - 0,7)h_m - (1,56 \log f_c - 0,8) \quad \text{para cidades médias a pequenas} \quad (3-25)$$

O modelo é válido somente para $150\text{MHz} \leq f_c \leq 1500\text{MHz}$, $30\text{m} \leq h_b \leq 200\text{m}$, $1\text{m} \leq h_m \leq 10\text{m}$ e $R > 1\text{km}$. Sendo h_b a altura da estação base em metros, h_m a altura da unidade móvel em metros, R a distância entre a estação base e a estação móvel em km e f_c a frequência de operação do sistema.

3.3. MODELO COST 231 HATA

O modelo de Okumura-Hata para cidades pequenas a médias foi estendido para cobrir a faixa de $1500\text{MHz} < f_c < 2000\text{MHz}$ [COST231, 99].

$$L_{dB} = F + B \log R - E + G \quad (3-26)$$

Onde [3]

$$F = 46,3 + 33,9 \log f_c - 13,82 \log h_b \quad (3-27)$$

E é definido no tópico 3.2 para cidades pequenas a médias e [3]

$$G = \begin{cases} 0\text{dB} & \text{cidades de tamanho mediano e áreas suburbanas} \\ 3\text{dB} & \text{áreas metropolitanas} \end{cases}$$

3.4. MODELO ECC-33

Este representa outro modelo de propagação derivado do modelo do conjunto de informações original de Okumura [7]. O modelo Hata-Okumura é amplamente aceito para ser usado na faixa de UHF; contudo, em frequências mais altas, sua validade deve ser testada. A perda no caminho é definida como:

$$P_L = A_{fs} + A_{bm} - G_b - G_r \quad (3-28)$$

$$A_{fs} = 92,4 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (3-29)$$

$$A_{bm} = 20,41 + 9,38 \log(d) + 7,894 \log(f) + 9,56[\log(d)]^2 \quad (3-30)$$

$$G_b = 10 \log\left(\frac{h_b}{200}\right) + \{13,958 + 5,8[\log(d)]^2\} \quad (3-31)$$

$$G_r = [42,57 + 13,7 \log(f)][\log(h_r) - 0,585] \quad (3-32)$$

Onde f é a frequência em GHz, h_b é a altura da estação base em metros, d é a distância a partir da estação base até o receptor em km, e h_r é a altura do receptor em metros.

3.5. MODELO STANFORD UNIVERSITY INTERIM (SUI)

Apesar de desenvolver um padrão para bandas de frequência acima de 11GHz, o grupo de trabalho do IEEE 802.16 foi focado nas bandas abaixo de 11GHz. Isto resultou no modelo SUI, o qual foi desenvolvido pela Universidade de Stanford. Parâmetros do modelo SUI dependem do tipo de terreno, que é dividido em três grupos como mostrado na Tabela 2, em que terreno do tipo A representa terreno montanhoso com moderada para alta densidade de árvores com a maior perda no caminho. Terreno tipo B representa tanto a maior parte dos terrenos planos com moderada para alta densidade de árvores como terrenos montanhosos de baixa densidade de árvores, enquanto terreno tipo C representa maior parte de terrenos planos com baixa densidade de árvores onde a perda no caminho é mínima [6].

Tabela 2 – Tipos de terreno para o modelo SUI [6]

| Parâmetro do Modelo | Terreno Tipo A | Terreno Tipo B | Terreno Tipo C |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| a | 4,6 | 4,0 | 3,6 |
| b, m ⁻¹ | 0.0075 | 0,0065 | 0,005 |
| c, m | 12,6 | 17,1 | 20 |

O modelo é uma extensão do modelo Hata para frequências acima de 1900MHz. Para expandir a faixa de frequência, um fator de correção adicional é aplicado, permitindo que o modelo SUI seja aplicado ao sistema WiMAX. O modelo SUI pode ser usado para antenas transmissoras com altura de 10m a 80m e as antenas receptoras com altura entre 2m e 10m e o raio da célula entre 0,1km e 8km [6].

$$L_{SUI} = A + 10\gamma \log \frac{d}{d_0} + X_f + X_h + s, \quad \text{para } d > d_0 \quad (3-33)$$

onde d é a distância entre a antena transmissora e receptora em metros, $d_0=100\text{m}$, X_f é um fator de correção para frequências acima de 2GHz, X_h é correção para a altura da antena receptora, e s é uma fator de correção para sombreamento causado por árvores e outros obstáculos no caminho de propagação (assume valores entre 8,2 dB e 10,6dB). Parâmetro A e o expoente da perda no caminho (γ) são definidos como [6]

$$A = 20 \log \frac{4\pi d_0}{\lambda}, \quad (3-34)$$

$$\gamma = a - bh_T + \frac{c}{h_T}, \quad (3-35)$$

onde h_T , é a altura da antena transmissora em metros, e a, b e c são constantes dependentes do tipo de terreno, conforme mostrado na Tabela 2. O expoente da perda no caminho depende do meio de propagação e perda, no espaço livre $\gamma=2$, em uma área urbanizada NLOS $\gamma>3$ e $\gamma<5$ para propagação dentro de um ambiente (indoor) $\gamma>5$ [6].

Os fatores de correção para a frequência de operação e altura da antena receptora para o modelo são [6]

$$X_f = 6,0 \log \left(\frac{f}{2000} \right), \quad (3-36)$$

e

$$X_h = -10,8 \log \left(\frac{h_R}{2000} \right), \quad \text{para terrenos tipo A e B} \quad (3-37)$$

$$X_h = -20 \log \left(\frac{h_R}{2000} \right), \quad \text{para terreno tipo C} \quad (3-38)$$

onde f é a frequência em MHz e h_R é a altura da antena receptora em metros.

Uma desvantagem do modelo SUI é que este não separa os ambientes em grupos mais usuais, chamado de rural, suburbano e urbano o que pode ser fonte adicional de cálculos incorretos [6].

3.6. MODELO COST 231 IKEGAMI-WALFISH

O modelo Walfisch-Bertoni para um campo fixado foi combinado com o modelo Ikegami para difrações abaixo dos níveis das ruas (Figura 3.3) e alguns fatores de correção empíricos para aumentar a concordância com as medidas em um único modelo integrado pelo projeto COST 231 [3,14].

Para uma condição sem visada direta, a perda total será dada por:

$$L = L_F + L_{msd} + L_{sd} \quad (3-39)$$

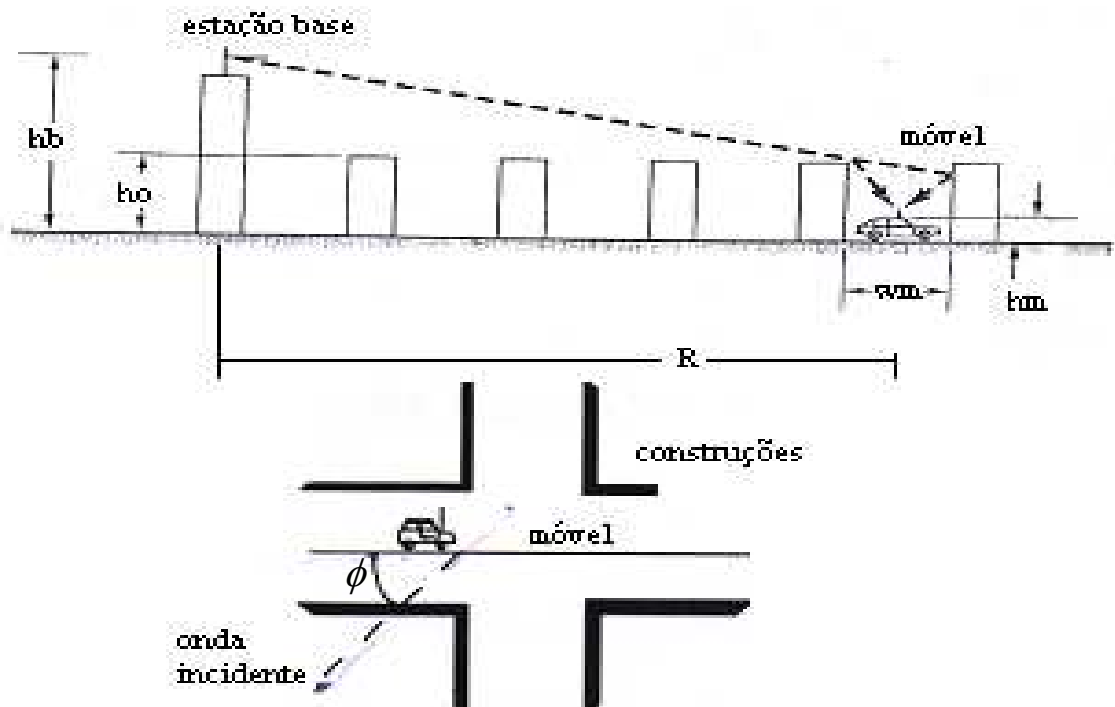


Figura 3.3 – Situação física para a perda definida pelo cost 231 Ikegami-Walfish (i-w)

Havendo visada direta entre o móvel e a ERB, o modelo de perda se refere à equação abaixo [3]

$$L_F = 32,4 + 20 \log f_c + 20 \log d \quad (3-40)$$

Onde L_F é a perda no espaço livre, L_{msd} considera difração por múltiplas difrações em gumes de faca no topo das construções finais e L_{sd} considera a difração única e o processo de espalhamento abaixo do nível da rua. É dado para L um mínimo valor L_F nos casos em que os demais termos são negativos [3]. Os termos individuais são

$$L_{sd} = -16,9 + 10 \log f_c + 10 \log \frac{(h_0 - h_m)^2}{w_m} + L(\phi) \quad (3-41)$$

Dessa maneira, w_m é a distância entre as faces da construção em cada um dos lados da rua onde está presente o móvel (tipicamente $w_m = w / 2$), e o termo final considera a orientação da rua em um ângulo ϕ com relação ao grande caminho circular [3].

$$L(\phi) = \begin{cases} -10 + 0,35 \times \phi & , 0^\circ < \phi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075 \times (\phi - 35^\circ) & , 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114 \times (\phi - 55^\circ) & , 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (3-42)$$

Finalmente, o termo da difração no topo das construções é [3]

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log R + k_f \log f_c - 9 \log w \quad (3-43)$$

Onde

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log[1 + (h_b - h_o)] & , h_b > h_o \\ 0 & , h_b \leq h_o \end{cases} \quad (3-44)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & , h_b > h_o \\ 54 - 0,8(h_b - h_o) & , R \geq 0,5 \text{ Km e } h_b \leq h_o \\ 54 - 0,8 \frac{(h_b - h_o)R}{0,5} & , R < 0,5 \text{ Km e } h_b \leq h_o \end{cases} \quad (3-45)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & , h_b > h_o \\ 18 - 15 \frac{(h_b - h_o)}{h_o} & , h_b \leq h_o \end{cases} \quad (3-46)$$

$$k_f = -4 + 0,7 \left(\frac{f_c}{925} - 1 \right) \quad (3-47) ,$$

para cidades de médio porte e áreas suburbanas com média densidade árvore, e

$$k_f = -4 + 1,5 \left(\frac{f_c}{925} - 1 \right) \quad (3-48) ,$$

para centros metropolitanos.

Para trabalhos aproximados, os valores dos seguintes parâmetros podem ser usados [3]:

$$h_o = \begin{cases} 3 * n_{\text{andares}} & \text{para tetos planos} \\ 3 * n_{\text{andares}} + 3 & \text{para tetos armadas} \end{cases}$$

Onde n_{andares} é o número de andares na construção [3].

O modelo é aplicável para [3]:

- $800\text{MHz} \leq f_c \leq 2000\text{MHz}$;
- $4 \text{ m} \leq h_b \leq 50\text{m}$;
- $1\text{m} \leq h_m \leq 3\text{m}$;
- $0,02\text{km} \leq R \leq 5\text{km}$;

3.7. MODELO ERICSSON

O modelo Ericsson é uma implementação do modelo de Hata [5]. Neste modelo, a modificação de seus parâmetros é possível de acordo com o ambiente de propagação.

Perda no caminho é dada pela expressão [5]

$$L_{\text{ericsson}} = a_0 + a_1 \log d + a_2 \log h_T + a_3 \log h_T \log d - 3,2(\log(11,75h_R))^2 + g(f) \quad (3-49)$$

onde $g(f)$ é definido por [5]

$$g(f) = 44,9 \log f - 4,78(\log f)^2 \quad (3-50)$$

Onde d é a distância em metros, f é a frequência em MHz, h_T e h_R são as alturas efetivas das antenas transmissora e receptora em metros. Parâmetros a_0 , a_1 , a_2 e a_3 são

constantes, os quais podem ser modificados para um melhor ajuste para condições específicas de propagação. Os valores padrões são: $a_0=36,2$, $a_1=30,2$, $a_2=-12,0$ e $a_3=0,1$ [5].

4. ATUALIZAÇÃO DO LABORATÓRIO DE ANTENAS

Este capítulo detalha a infraestrutura já existente no laboratório de antenas, utilizada nos experimentos e validações dos projetos de antenas. Também irá detalhar os equipamentos adquiridos para a atualização desta infraestrutura. A atualização do laboratório de antenas tem como objetivo permitir a sua utilização na realização de experimentos em faixas de frequência mais elevadas (até 6 GHz), proporcionar menor perda no sinal transmitido, permitir utilizar tanto o equipamento da Scientific Atlanta quanto o da Agilent (FieldFox RF Analyzer – N9912A), adquirido para realização de experimentos referentes às disciplinas de antenas, sistemas de comunicação e também em possíveis trabalhos de conclusão de curso.

4.1. INFRAESTRUTURA PREVIAMENTE EXISTENTE

Após inspeção do laboratório de antenas do ENE/UnB, foi constatado que este não apresentava antenas, cabos e equipamentos que permitissem a execução de experimentos e medidas envolvendo a faixa de frequência de até 6GHz, estando limitado para medidas até 2 GHz.

4.1.1. Antenas

As antenas encontradas no laboratório, da fabricante Scientific Atlanta, foram:

1. Antenas dipolos série 15, com 2,1 dBi de ganho e frequência de operação de 77MHz a 600MHz;
2. Antena log-periódica série 26, com 8 dBi de ganho e frequência de operação de 100MHz a 1GHz;
3. Antena corneta série 12, com ganho de 14,4 dBi a 7,5 dBi e frequência de operação de 1,70GHz a 2,60GHz.

Foram encontradas outras antenas projetadas e construídas por alunos como trabalho de conclusão da disciplina de antenas. A frequência de operação das mesmas é limitada a 2 GHz, uma vez que o equipamento gerador de sinal e o amplificador utilizado operam somente até esta frequência.

4.1.2. Cabos

Os cabos instalados no laboratório de antenas encontrados foram do tipo RG213U e RG214U, porém, devido ao desgaste pelo tempo, não foi possível realizar a identificação do fabricante dos mesmos. Por meio de pesquisa na internet, foram identificados 2 fabricantes destes tipos de cabo, sendo o comportamento de cada um destes com relação à variação da frequência, detalhado na Tabela 3.

Tabela 3 – Perdas dos cabos RG213U e RG214U para frequências de até 2500MHz [10]

| Frequências (MHz) | Perdas (dB/100m) | |
|-------------------|------------------|--------|
| | RG213U | RG214U |
| 5 | 1,4 | 1,46 |
| 25 | 3,20 | 3,35 |
| 50 | 4,60 | 4,82 |
| 100 | - | 8,57 |
| 200 | 9,70 | 10,24 |
| 300 | 12,15 | 12,88 |
| 435 | 14,99 | 15,95 |
| 900 | 22,91 | 24,61 |
| 1250 | 27,93 | 30,14 |
| 1500 | 31,24 | 33,81 |
| 1700 | 33,76 | 36,61 |
| 1800 | 34,99 | 37,98 |
| 2200 | 39,72 | 43,26 |
| 2400 | 41,99 | 45,8 |
| 2500 | 43,10 | 47,05 |

Avaliando estes valores, percebe-se que os mesmos não são adequados para realização de experimento em frequências de até 6 GHz, uma vez que possuem grande perda para frequências acima de 2,5GHz.

4.1.3. Equipamentos

No laboratório de antenas do ENE/UnB, encontram-se instalados os seguintes equipamentos da Scientific Atlanta [11]:

1. **Unidade de controle remoto (modelo 4116A-10):** equipamento que permite controlar, à distância, o giro, o azimute e a polarização do posicionador de três eixos da antena. Ele controla a velocidade e a direção do posicionador

2. **Posicionador de azimute e elevação:** possui dois eixos ortogonais que permitem a simulação do movimento de um sensor em coordenadas esféricas. Em adição, tem um suporte básico para antenas de microondas.
3. **Indicador de posição (modelo 4403):** conjunto de relógios constituídos de dois ponteiros concêntricos. O ponteiro vermelho indica variações de 0 a 10° e é conectado ao sinal de sincronismo de 36:1. O ponteiro preto indica variações de 0 a 360° e é conectado ao sinal de sincronismo de 1:1. No equipamento, existem 3 destes relógios, em um é indicada a variação da posição horizontal da antena, em outro a variação da posição vertical e no último a variação da polarização da antena (Figura 4.1 e Figura 4.2).



Figura 4.1 – Controlador e indicador de posição



Figura 4.2 – Posicionador de azimute e elevação

4. **Seletor de sincronismo (modelo 1588)**: é um acessório opcional do equipamento para medidas de antenas da série 1580 da S.A. Sua finalidade é prover um meio conveniente para a seleção de um dos quatro tipos de movimento: horizontal ou vertical, com razões de 1:1 ou 36:1. A seleção é feita através de chave que fica no painel do equipamento.
5. **Transmissor**: emite um sinal padrão para uma antena transmissora padrão. Permite o controle da frequência do sinal gerado (Figura 4.3 e Figura 4.4).



Figura 4.3 – Transmissor que se conecta a antena padrão (opera em frequência até 2GHz MHz)



Figura 4.4 – Seletor de frequência do transmissor

6. **Receptor de Microondas**: recebe o sinal padrão captado para uma antena a ser testada. O sinal passa por um mixer que o transforma para uma frequência intermediária. O receptor de medidas em microondas é um receptor superheterodino que provê uma varredura em frequência de banda extremamente larga e alta sensibilidade, com excepcional linearidade e

estabilidade. O modelo em questão tem uma faixa de frequência de 2 GHz até 12,4 GHz que pode ser expandida para uma faixa de 25MHz até mais de 40 GHz com uso de acessórios opcionais. Possui vários tipos de ajustes de ganhos, frequência de recepção e possui ainda um mostrador para indicar o nível do sinal que está sendo recebido (Figura 4.5, Figura 4.6 e Figura 4.7).



Figura 4.5 – Receptor de Microondas



Figura 4.6 – Seletores do receptor de Microondas



Figura 4.7 – Visualizador do sinal recebido

7. **Bolômetro a cristal:** este equipamento é usado como um pré-amplificador do plotter. Possui um amplificador sensível que é entrada de um cristal detector ou um bolômetro detector.
8. **Plotter (série 1580):** módulo usado para gravar permanentemente os dados das medições de antenas ou outros análogos que sejam dados em função da posição, ângulo ou outro parâmetro. Este equipamento recebe os sinais de posição tratados e com ganho controlado pelo Bolômetro a cristal. Para controle do ganho, o plotter gera um sinal que é transmitido ao Bolômetro, que faz o ajuste automático do ganho e envia um sinal BCD ao plotter indicando o nível de atenuação atual. Com posse destes dados, o plotter traça o diagrama de radiação polar. No entanto, este equipamento não se encontra operacional.

O posicionador da antena de recepção e a antena de transmissão se encontram localizados conforme Figura 4.8 e Figura 4.9, sendo estas localizações consideradas para a realização das medidas de cabo a serem adquiridas para atualização do laboratório de antenas.

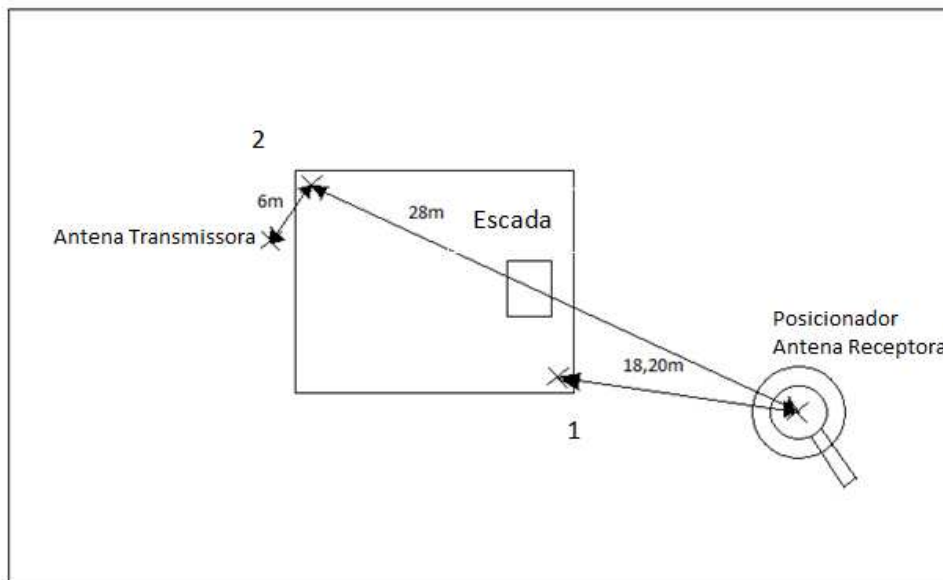


Figura 4.8 – Medida de cabo necessária realizada no telhado do laboratório de antenas

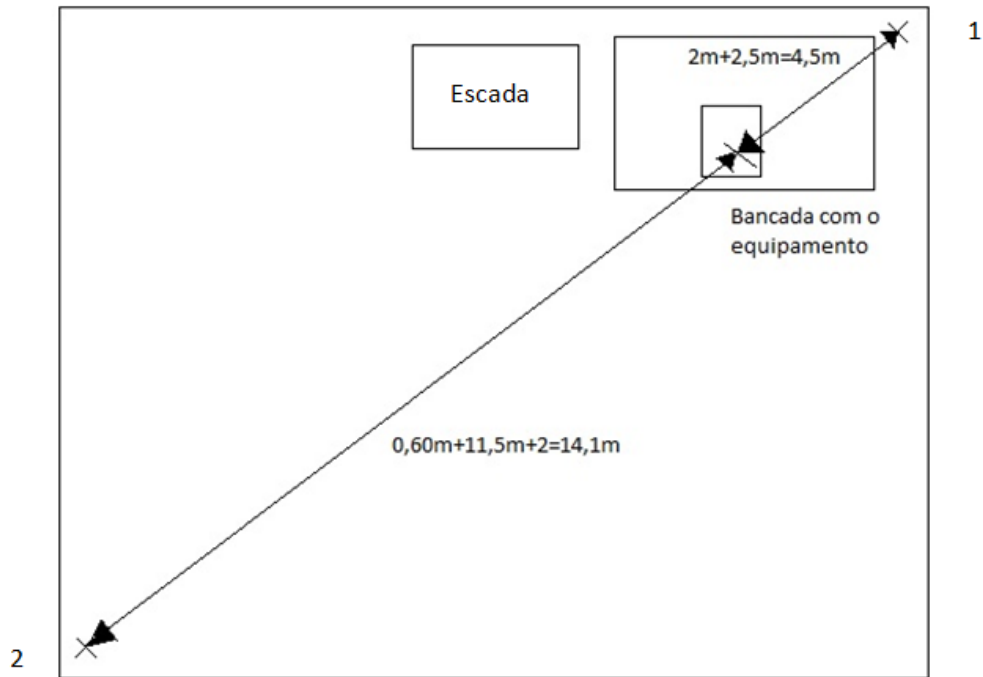


Figura 4.9 – Medida de cabo necessária realizada dentro do laboratório de antenas

4.2. INFRAESTRUTURA ADQUIRIDA PARA ATUALIZAÇÃO

A partir do levantamento realizado da infraestrutura existente no laboratório, identificou-se a necessidade de aquisição de antenas, cabos e de um novo equipamento objetivando a sua atualização para operar em faixas de frequência até 6 GHz.

4.2.1. Antenas

Foi realizada pesquisa de fornecedores e antenas que poderiam ser utilizadas na faixa de frequência de até 6 GHz, tendo-se optado inicialmente por adquirir antenas do tipo omnidirecional para realização de trabalho de medida e estudo de sinais operando nesta faixa de frequência.

As antenas adquiridas foram:

1. **ANTENA OMNI HYPERLINK HG2412U-PRO-AN:** antena omnidirecional com frequência de operação de 2400 a 2500 MHz, 12 dBi de ganho, polarização vertical e 50 ohms de impedância (Figura 4.10 e Figura 4.11).



Figura 4.10 – Antena Hyperlink HG2412U-PRO-AN

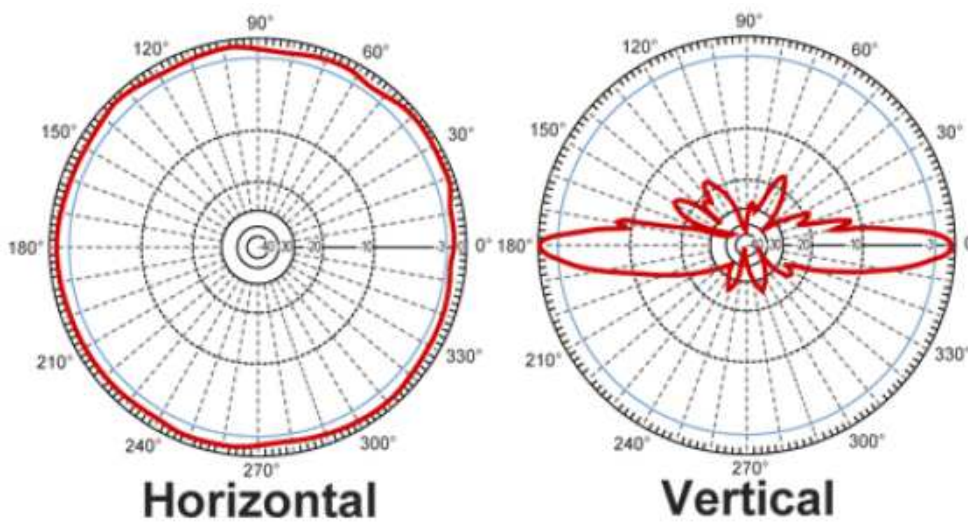


Figura 4.11 - Diagrama de radiação da Antena Hyperlink HG2412U-PRO-NA

2. **ANTENA HYPERLINK HG3511U-PRO:** antena omnidirecional com frequência de operação de 3400MHz até 3700MHz, 11 dBi de ganho, polarização vertical e 50 ohms de impedância (Figura 4.12 e Figura 4.13).



Figura 4.12 – Antena Hyperlink HG3511UPRO

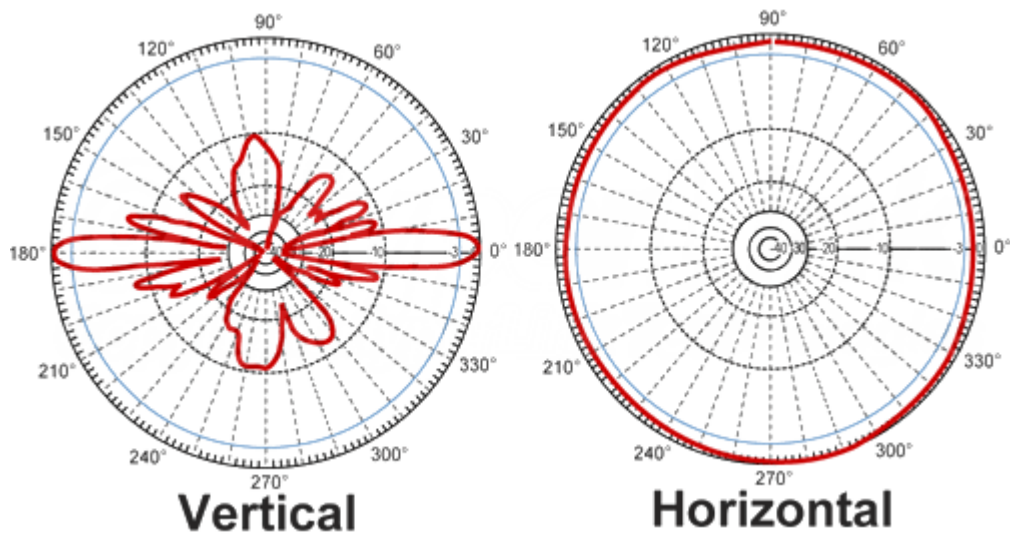


Figura 4.13 - Diagrama de radiação da Antena Hyperlink HG3511UPRO

3. **ANTENA HYPERLINK HG5808U:** antena omnidirecional com frequência de operação de 5725MHz até 5850MHz, 8 dBi de ganho, polarização vertical e 50 ohms de impedância (Figura 4.14 e Figura 4.15).



Figura 4.14 – Antena Hyperlink *HG5808U*

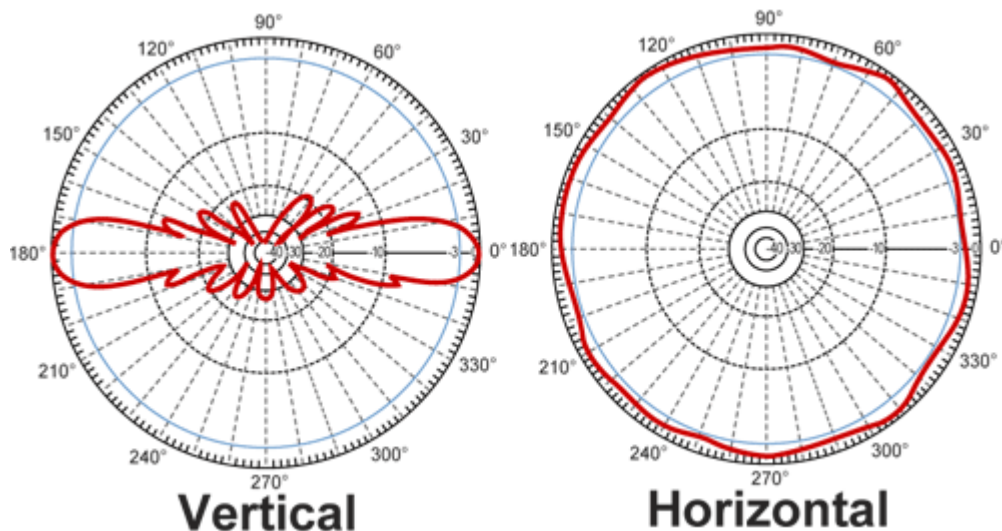


Figura 4.15 - Diagrama de radiação da Antena Hyperlink HG5808U

4.2.2. Cabos

Como os cabos encontrados no laboratório apresentavam uma perda elevada a partir de 2500MHz, foi necessária a aquisição de cabos que permitissem operação dentro da faixa de frequência de até 6GHz. A partir desta avaliação, foi feita pesquisa de cabos, encontrando-se 5 tipos que poderiam ser utilizados nesta faixa de frequência, detalhados na Tabela 4.

Tabela 4 – Perda dos cabos pesquisados para a frequência de até 6000MHz

| Frequências (MHz) | Perdas (dB/100m) | | | | |
|-------------------|------------------|--------|--------|----------|-----------|
| | LMR400 | LMR600 | LMR900 | LDF4-50A | LDF4.5-50 |
| 30 | 2,2 | 1,4 | 0,9 | 1,17 | 0,834 |
| 50 | 2,9 | 1,8 | 1,2 | 1,52 | 1,08 |
| 200 | - | - | - | 3,10 | 2,24 |
| 220 | 6,1 | 3,9 | 2,6 | - | - |
| 400 | - | - | - | 4,46 | 3,24 |
| 450 | 8,9 | 5,6 | 3,8 | 4,75 | 3,46 |
| 500 | - | - | - | 5,02 | 3,66 |
| 800 | - | - | - | 6,46 | 4,75 |
| 900 | 12,8 | 8,2 | 5,6 | - | - |
| 1000 | - | - | - | 7,28 | 5,38 |
| 1250 | - | - | - | 8,23 | 6,11 |
| 1500 | 16,8 | 10,9 | 7,4 | 9,09 | 6,78 |
| 1700 | - | - | - | 9,74 | 7,29 |
| 1800 | 18,6 | 12,0 | 8,2 | 10,1 | 7,54 |

| | | | | | |
|------|------|------|-----|------|-------|
| 2000 | 19,6 | 12,8 | 8,6 | 10,7 | 8,02 |
| 2200 | - | - | - | 11,2 | 8,48 |
| 2500 | 22,2 | 14,5 | 9,8 | - | - |
| 3000 | - | - | - | 13,4 | 10,2 |
| 5000 | - | - | - | 18,0 | 13,09 |
| 5800 | 35,5 | 23,8 | 16 | - | - |
| 6000 | - | - | - | 20,1 | 15,6 |
| 6100 | - | - | - | | 15,8 |
| 8000 | - | - | - | 23,8 | - |
| 8800 | - | - | - | 25,2 | - |

Em pesquisa com fornecedores destes cabos, foi verificado que o cabo LDF4-50A é o que apresenta melhor relação custo/benefício, uma vez que apresenta uma redução considerável das perdas para frequências acima de 2500MHz quando comparado aos cabos existentes no laboratório de antenas (RG213U e RG214U) e o valor do metro foi 6 vezes menor quando comparado ao LDF4.5-50.

4.2.3. Equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A

O analisador de RF Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A é um instrumento de mão integrado utilizado para a instalação e manutenção de redes wireless (Figura 4.16 e Figura 4.17). Ele combina a análise de cabos e antenas, análise de espectro, medições de potência e a análise vetorial de rede em um instrumento robusto, compacto, leve e resistente. Inclui como acessórios padrão: um adaptador CA/CC, bateria, manual do usuário e o software Data Link [12].

Medições:

1. Analisador de cabos e antenas com medições de perda de retorno, perda no cabo com uma porta, distância à falha e VSWR.
2. Tela de análise vetorial de rede (S11, S21, fase e carta de Smith).
3. Analisador de espectro incorporado.

Calibração:

1. A função QuickCal integrada permite calibrar o FieldFox sem usar um kit de calibração, oferecendo a garantia de precisão e a repetibilidade.

2. A calibração imediata do FieldFox com a função CalReady coloca a calibração da unidade disponível na porta de teste imediatamente após o instrumento ter sido ligado.
3. Calibração em banda larga com interpolação automática, para eliminar a necessidade de repetir a calibração do FieldFox quando houver alteração na frequência do teste ou o número de pontos.
4. Suporte mecânico à calibração com terminais abertos, em curto e com carga.

Principais especificações:

1. Analisador de cabos e antenas - 2 MHz a 4 GHz, com 6 GHz.
2. Diretividade: > 42 dB (Velocidade da medição: 1,5 ms / por ponto).
3. Analisador de rede - 2 MHz a 4 GHz, com 6 GHz opcional Magnitude e fase de S11, magnitude de S21.
4. Analisador de espectro - 100 kHz a 4 GHz, com 6 GHz opcional: -148 dBm, 1 segundo / span total (6 GHz).
5. Medidor de potência - 9 kHz a 24 GHz (operando com modelos específicos de sensores de potência da Agilent).

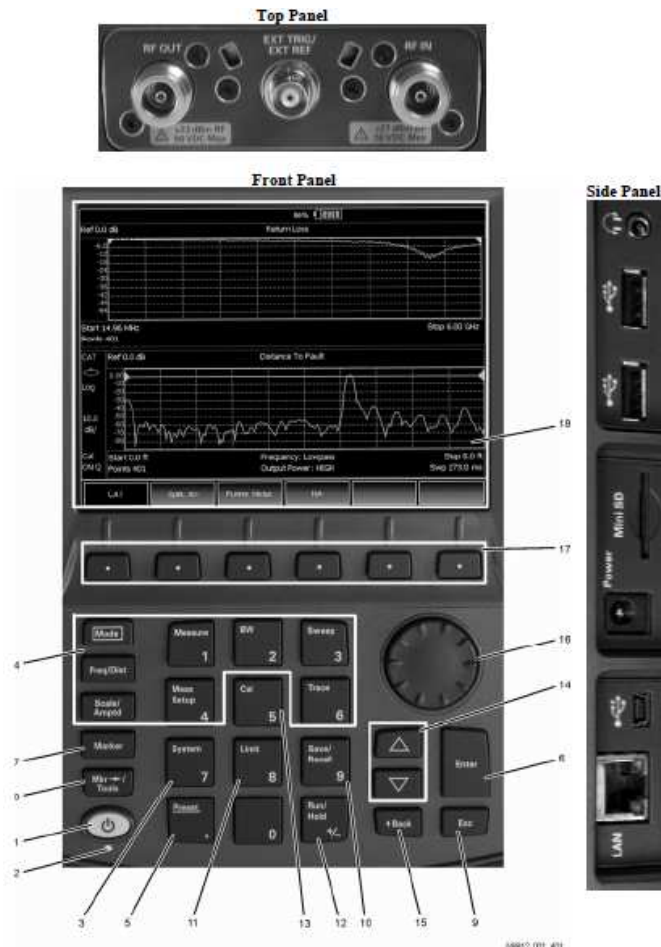


Figura 4.16 – Visão frontal, topo e lateral do equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A [15]



Figura 4.17 - Equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A [15]

No modo High, a potência de saída nominal é +6dBm na frequência entre 2MHz e 4GHz e +2dBm entre 4 a 6GHz. Não se mantendo estável durante toda banda de operação, para faixa entre 2MHz a 4GHz, a potência de saída pode chegar a +9dBm e entre 4GHz e 6GHz, ela pode chegar a +7dBm.

Ao invés de sensibilidade, o manual de usuário e a folha de especificação informam valores típicos de range dinâmico. Baseado na potência de saída e o intervalo dinâmico para o modo S21, temos que a sensibilidade do analisador na porta RF IN irá se comportar conforme valores mostrados na Figura 4.18:

| Dynamic range | |
|----------------------------|------------------------|
| 2 MHz to 2 GHz | 72 dB (typical) |
| 2 GHz to 3 GHz | 67 dB (typical) |
| > 3 GHz to 5 GHz | 58 dB (typical) |
| > 5 GHz to 6 GHz | 49 dB (typical) |

Figura 4.18 – Especificações do intervalo dinâmico do equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A [15]

Supondo que se esteja medindo em 2,4GHz, a potência de saída é de aproximadamente +7dBm. Então, significa que a sensibilidade na porta RF IN será próxima de -60dBm. (Para 5,8GHz, teremos -42dBm e para 900MHz a 1000MHz, teremos -65dBm).

5. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

Para a realização das medidas, procurou-se delimitar os passos a serem seguidos para a sua realização, bem como definição dos equipamentos a serem utilizados na medida de ensaio realizada no laboratório de antenas. Depois de concluídas estas duas primeiras etapas, foram definidos quais os equipamentos a serem utilizados na medida do sinal da tecnologia WiMAX de uma empresa da cidade de Brasília, que opera na faixa de frequência de 5725MHz até 5850MHz.

5.1. PASSOS PARA REALIZAÇÃO DAS MEDIDAS

Com o objetivo de otimizar o processo de realização de medidas, foi necessária a delimitação de passos a serem seguidos na realização de uma medida de campo [13].

1. Listar todos os equipamentos utilizados.
2. Obter todas as perdas e ganhos que estão presentes no sistema a ser utilizado na realização das medidas (antenas, cabos, atenuadores, filtros, etc...), verificando se os mesmos encontram-se dentro dos limites adequados para o equipamento.
3. Fazer uma varredura do espectro a ser medido para uma melhor localização do sinal a ser medido.
4. Especificar o sinal que está sendo transmitido, bem como especificar o tipo de antena utilizada para tal transmissão; em seguida, realizar os demais procedimentos a partir deste sinal.
5. Especificar o tipo de antena utilizada na recepção do sinal.
6. Anotar todos os ajustes feitos no equipamento de recepção.
7. Inicialmente, realizar alterações das configurações do equipamento armazenando os dados provenientes desta alteração com o intuito de verificar a funcionalidade do equipamento utilizado.
8. Em cada um dos pontos de medida e no local onde se encontra a estação base, usar um GPS para especificar a localização em termos de latitude e longitude dos mesmos para que assim se possa, a partir destes, obter a distância efetiva entre os pontos de recepção e transmissão.

9. Gravar os dados resultantes mostrados pelo analisador de espectro para os sistemas a serem estudados.
10. Caso a localização não forneça um valor satisfatório ou adequado, é preciso deslocar o veículo usado nas medições para o lugar mais próximo onde possam ser realizadas medidas adequadas.
11. Nos casos em que for registrada uma instabilidade na magnitude do sinal, deve ser medido o valor máximo e mínimo, obtendo-se assim um valor médio e um desvio padrão para aquele ponto da medida.
12. Para determinação da perda em um caminho, torna-se necessário o cálculo da mesma com base na seguinte fórmula:

$$A(dB) = 32,4 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f \quad (5-1)$$

13. A informação da medida pode ser organizada como uma função da distância com relação ao transmissor pela magnitude da potência recebida pelo receptor. As variações deverão ser tratadas de um modo apropriado, em que d é a distância entre o ponto de transmissão e antena receptora, e f é a frequência e operação do sistema.
14. Propagação em um meio urbano pode ocorrer tanto no plano vertical (acima do topo dos prédios) quanto no horizontal (ao longo das pistas, por meio de reflexões e difrações). A propagação horizontal vai ter um papel mais significativo nas proximidades da estação base e uma propagação vertical terá uma maior influência em locais distantes da estação base. Quanto mais alta a estação-base, mais cedo a componente vertical se tornará dominante.
15. É esperado que, em localidades muito distantes da estação base, o efeito de construções se torne desprezível.
16. Para uma melhor caracterização do comportamento do sinal, pode-se subdividir a área de teste em subáreas, variando as escalas das mesmas com relação à área maior.
17. Deve-se utilizar fotos da área onde serão feitas as medidas, com o intuito de exemplificar a mesma no relatório a ser feito com os resultados obtidos.

18. Para uma melhor especificação da área, é possível, ainda, fazer referência aos nomes das ruas, dos edifícios e dar características dos mesmos (tipo de superfície, fatores de correção, entre outros).
19. Os valores das medidas poderão levar em consideração somente o valor de pico, uma vez que este é o mais significativo nos casos em que a oscilação não seja muito significativa.
20. Se possível, em um mesmo ponto de medida, variar a altura da antena com o intuito de verificação das possíveis diferenças.

5.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO

As medidas do ensaio foram realizadas no laboratório de antenas com o objetivo de verificar a adequada montagem da infraestrutura adquirida para atualização do mesmo; também, foi realizado experimento didático para a obtenção de diagrama de radiação de uma das antenas.

5.2.1. Características da infraestrutura de transmissão do sinal

Para a transmissão do sinal, foi utilizada antena diretiva Miniparabólica da Aquário, modelo MM-5825 e, para a recepção, foi utilizada antena omnidirecional da empresa Hyperlink, modelo HG5808U, ambas detalhadas nos itens a seguir.

Além disso, o sinal foi gerado na faixa de frequência de 5725MHz até 5850MHz com potência de, aproximadamente, 5dBm, utilizando o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) em modo de operação S21, o qual permite que seja gerado sinal na porta RF OUT do equipamento e recebido na porta RF IN, conforme detalhamento encontrado no Anexo I.

Foram utilizados também, os cabos adquiridos para conectar o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A), a antena de transmissão e a antena de recepção a este equipamento, formando assim um enlace de microondas.

Ainda foram utilizados alguns dos equipamentos da Scientific Atlanta existentes no laboratório: o posicionador de azimute e elevação, bem como o controlador e indicador de posição.

5.2.2. Antena transmissora

Para a transmissão do sinal durante a realização do ensaio, foi utilizada a antena Miniparabólica da Aquário, modelo MM-5825, com 40 cm de diâmetro e 25 dBi de ganho, com frequência de operação de 5,725 a 5,875 GHz, apresentando dupla polarização (horizontal e vertical) e 50 Ohm de impedância (Figura 5.1 e Figura 5.2).



Figura 5.1 – Antena Miniparabólica Aquário - MM-5825

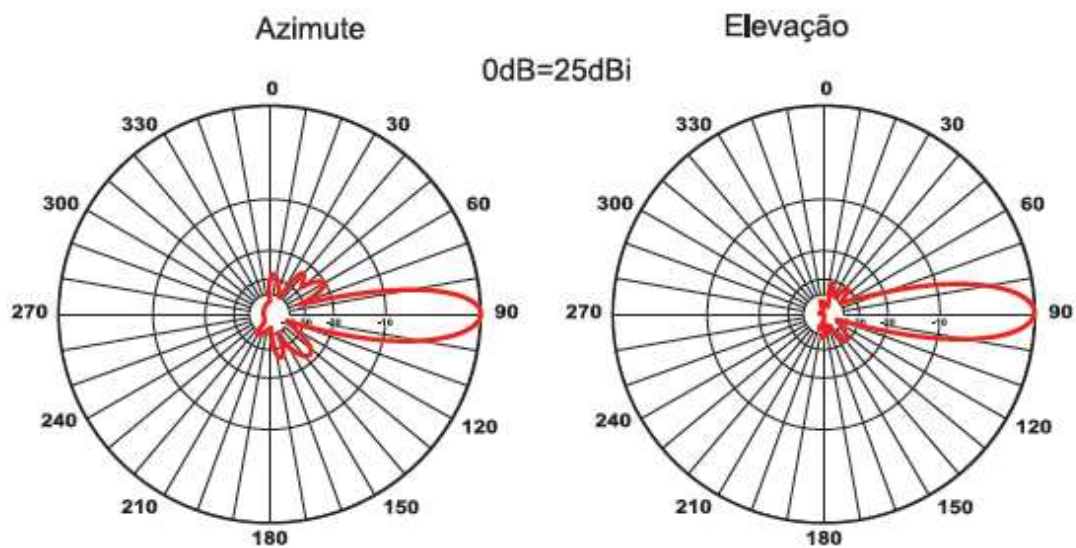


Figura 5.2 - Diagrama de radiação da Antena Miniparabólica Aquário - MM-5825

5.2.3. Antena receptora

A antena utilizada na recepção já foi descrita no item 4.2.1. E esta é uma antena omnidirecional com frequência de operação de 5,725 a 5,850 GHz, 8 dBi de ganho, polarização vertical e 50 ohms de impedância (Figura 5.3 e Figura 5.4).



Figura 5.3 – Antena Hyperlink HG5808U

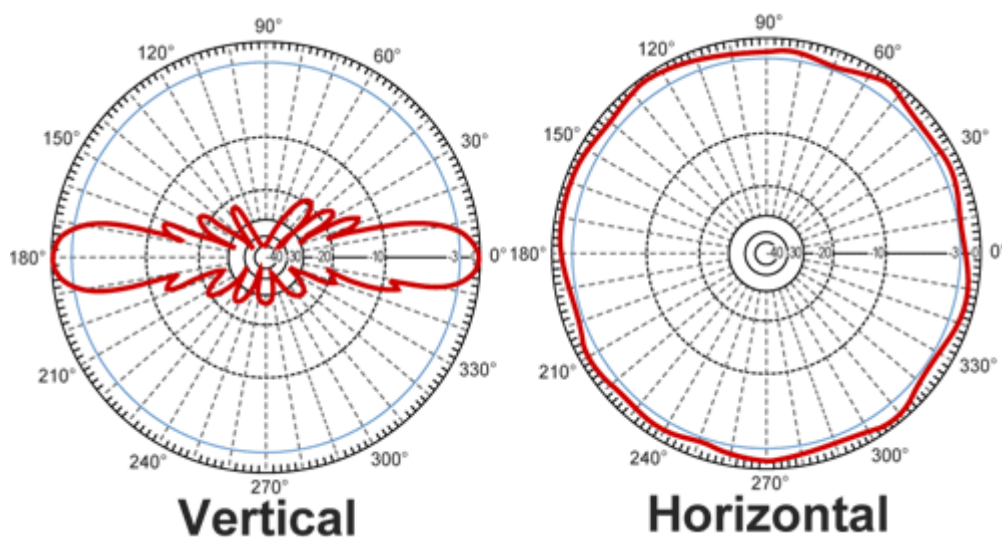


Figura 5.4 - Diagrama de radiação da Antena Hyperlink HG5808U

Para controlar a elevação e posição da antena de recepção, foram utilizados os equipamentos da Scientific Atlanta, controlador e posicionador. Para a obtenção do diagrama de radiação, foram utilizadas as informações fornecidas pelos equipamentos e pelo Analisador RF - Agilent FieldFox (N9912A).

5.2.4. Analisador RF - Agilent FieldFox (N9912A)

Para a geração do sinal de transmissão e para a recepção, foi utilizado o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A), especificamente a função S21.

A função S21, além da geração e recepção do sinal, mostra a funcionalidade de analisador de espectro, o que permite verificar o nível de potência que está sendo recebido na antena receptora. O equipamento permite ainda a inclusão de marcadores para facilitar a leitura da potência e delimita uma faixa de frequência para o sinal ser transmitido.

A potência média gerada pelo equipamento para a frequência de 5725MHz até 5850MHz é da ordem de 5 a 7 dBm, o que é relativamente baixo para transmissões de longa distância. No entanto, para realização de experimentos didáticos a serem realizados no laboratório de antenas e que envolvem pequenas distâncias, este pode ser utilizado de forma a contribuir com o aprendizado dos estudantes comprovando, experimentalmente, os resultados teóricos.

Para realização das configurações do equipamento necessárias para utilização da função S21, algumas ações devem ser seguidas, e se encontram descritas em detalhes no Anexo I.

O tipo de cabo utilizado para realização do ensaio foi o LDF4-50A, o qual foi adquirido como parte do processo de atualização da infraestrutura do laboratório de antenas. Este, para a frequência de 5725MHz até 5850MHz apresenta uma perda de, aproximadamente, 20,1 dB/100m.

5.2.5. Avaliação do espectro de frequência brasileiro objetivando utilização do mesmo para fins didáticos

Avaliando a distribuição de frequências no Brasil, conforme estipulado pela ANATEL, percebe-se que existem algumas faixas de frequência que poderiam ser utilizadas para realização de experimentos de natureza didática, desde que nos experimentos não sejam utilizados níveis de potência muito elevados, para distâncias pequenas de transmissão e de curta duração.

Para realização de experimentos que envolvam maior nível de potência, maiores distâncias de transmissão e serviços de uso contínuo, é necessário, para algumas das frequências, solicitação formal de uso da faixa de frequência para a ANATEL.

Na Tabela 5 são mostradas as faixas de frequências com restrições de uso definidas pela ANATEL.

Tabela 5 - Faixas de radiofrequências com restrições de uso definidas pela ANATEL [16]

| MHz | MHz | MHz | GHz |
|-------------------|---------------------|-----------------|---------------|
| 0,090-0,110 | 13,36-13,41 | 399,9-410 | 5,35-5,46 |
| 0,495-0,505 | 16,42-16,423 | 608-614 | 6,65-6,6752 |
| 2,1735-2,1905 | 16,69475-16,69525 | 952-1215 | 8,025-8,5 |
| 4,125-4,128 | 16,80425-16,80475 | 1.300-1.427 | 9,0-9,2 |
| 4,17725-4,17775 | 21,87-21,924 | 1.435-1.646,5 | 9,3-9,5 |
| 4,20725-4,20775 | 23,2-23,35 | 1.660-1.710 | 10,6-11,7 |
| 6,215-6,218 | 25,5-25,67 | 1.718,8-1.722,2 | 12,2-12,7 |
| 6,26775-6,26825 | 37,5-38,25 | 2.200-2.300 | 13,25-13,4 |
| 6,31175-6,31225 | 73-74,6 | 2.483,5-2.500 | 14,47-14,5 |
| 8,291-8,294 | 74,8-75,2 | 2.655-2.900 | 15,35-16,2 |
| 8,362-8,366 | 108-138 | 3.260-3.267 | 20,2-21,26 |
| 8,37625-8,38675 | 149,9-150,05 | 3.332-3.339 | 22,01-23,12 |
| 8,41425-8,41475 | 156,52475-156,52525 | 3.345,8-3.352,5 | 23,6-24,0 |
| 12,29-12,293 | 156,7-156,9 | 4.200-4.400 | 31,2-31,8 |
| 12,51975-12,52025 | 242,95-243 | 4.800-5.150 | 36,43-36,5 |
| 12,57675-12,57725 | 322-335,4 | | Acima de 38,6 |

5.2.6. Procedimentos específicos para a realização do ensaio

O ensaio teve como objetivo realizar experimento didático de obtenção do diagrama de radiação real de uma antena a partir das medidas de potência realizadas utilizando o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A), além, é claro, de implementar a nova infraestrutura adquirida para atualização do laboratório de antenas (equipamento, antena e cabos).

No ensaio, foram utilizados os equipamentos listados na Tabela 6, os quais já foram detalhados nos itens anteriores.

Tabela 6 – Lista dos equipamentos utilizados no ensaio

| Equipamento | Características |
|---|--|
| Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) | Potência de transmissão de 5dBm a 7dBm para a frequência de 5,8 GHz Potência de recepção máxima de 27 dBm para não danificar o equipamento |
| LDF4-50A (2m) | Para interligação da antena de recepção até o posicionador |
| LDF4-50A (21m) | Para interligação do equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) a antena de transmissão |
| LDF-50A (23m) | Para interligação do equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) ao posicionador onde foi instalada a antena de recepção |
| Hyperlink HG5808U | Antena omnidirecional de ganho 8 dBi e polarização vertical utilizada na recepção do sinal gerado pelo equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) |
| Antena Miniparabólica Aquário - MM-5825 | Antena diretiva de ganho 25 dBi e polarização vertical ou horizontal utilizada na transmissão do sinal gerado pelo equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) |

O ensaio consistiu, primeiramente, na montagem de toda a infraestrutura do enlace conforme Figuras 4.8 e 4.9. No entanto, ao se colocar o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) no modo S21 não foram obtidos resultados satisfatórios para o sinal recebido.

Este resultado inicial ocasionou a necessidade de localizar a antena transmissora mais próxima da antena receptora (8,9 metros), mas a alteração realizada não ocasionou em modificação dos equipamentos a serem utilizados.

Segue abaixo figuras que demonstram o modo como foi realizada esta montagem no laboratório de antenas (Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7, Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10).



Figura 5.5 – Equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) no laboratório



Figura 5.6 – Antena Hyperlink HG5808U em bancada do laboratório



Figura 5.7 – Antena Miniparabólica Aquário - MM-5825 em bancada do laboratório



Figura 5.8 – Antena Hyperlink HG5808U fixada no posicionador



Figura 5.9 – Antena Miniparabólica Aquário - MM-5825 fixada



Figura 5.10 – Sistema composto pelas antenas de transmissão e recepção

Posteriormente, com todos os equipamentos operando, foi colocada uma referência no posicionador como inicial e variada à posição do mesmo em passos de 10° em 10°, objetivando cobrir os 360° do diagrama de radiação da antena de recepção.

Os dados coletados referentes à potência de recepção foram então usados para geração de gráfico específico e comparado, posteriormente, com o diagrama de radiação teórico da antena de recepção encaminhada pelo fornecedor da antena.

Outro experimento didático também realizado durante o ensaio foi a comparação dos resultados teóricos obtidos utilizando a Fórmula de Friis, com relação aos realmente obtidos nas medidas realizadas.

5.3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA MEDIDA DO SINAL WIMAX

Na medida do sinal WiMAX gerado por empresa de Brasília, foi realizado, primeiramente, contato com a mesma para obter detalhamento referente à infraestrutura de transmissão utilizada e os locais de transmissão do sinal operando na faixa de frequência de 5725MHz até 5850MHz.

Para a recepção, foi utilizada antena omnidirecional da empresa Hyperlink HG5808U, descrita no item 4.2.1.

Além disso, foi também utilizado o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A), mais especificamente a função de analisador de espectro de frequência, no qual foi conectado sua porta RF IN em 2m de cabo (LDF4-50A) e, este último, na antena de recepção da Hyperlink HG5808U.

5.3.1. Características da infraestrutura de transmissão do sinal

Os equipamentos WiMAX da empresa de Brasília funcionam em modo bridge, como um switch de segunda camada. Assim, o tráfego pela rede WiMAX é orientado de acordo com tabelas ARP (Address Resolution Protocol). Em cada POP (Point of Presence) encontram-se, ao menos, 4 antenas setoriais de 90 graus cada uma, conectadas a uma BSU (Base Station Unit). O controle de cada BSU é feito

individualmente; assim, pode ser feito o controle tanto da potência que cada um dos setores emite quanto da frequência em que operam.

Atualmente, todas as BSUs estão emitindo 22dBm de potência, mas essa situação não será sempre necessariamente verdadeira, e sim, a orientação desses setores. Apesar de ainda não ter sido feito o alinhamento fino de acordo com o azimute, é feito ajuste para cobrir os 360 graus.

Os POPs da empresa que está operando com a tecnologia WiMAX em Brasília se encontram nas seguintes localidades:

1. Águas Claras.
2. Asa Sul.
3. Asa Norte.
4. Brasil 21 – Setor Hoteleiro Sul – Asa Sul.
5. Taguatinga.
6. Liberty Mall – Asa Norte.
7. Sudoeste.

A seguir, temos a relação de algumas informações adicionais referentes à infraestrutura de transmissão do sinal.

1. Faixa de frequências de operação do sistema: 5725MHz - 5875MHz.
2. Potência de entrada no sistema: mín: -26,5dBm - máx: 22dBm.
3. Potência: Atenuação do cabo a 6000MHz = 34,427 dB/100m, atenuação do cabo a 5000MHz = 30,693dB/100m, utilizando para o cálculo o valor aproximado de 34dB/100m com um comprimento de 1,5m, ganho das antenas de 15dBi. Logo, $P_T + G_T - L_T = 15 + 22 - 0,51 = 36,49\text{dBm}$ (aproximadamente).

Foi orientado pela empresa que as medidas do sinal fossem realizadas na localidade Sudoeste, pelo fato de que nesta o nível de interferência é menor quando comparado com as demais localidades.

5.3.2. Antena transmissora

As antenas utilizadas na transmissão são da fabricante Kathrein, do tipo painel, polarização vertical, 90 graus de abertura horizontal por 8,4 graus de abertura vertical, 15dBi de ganho.

Abaixo temos o diagrama de radiação das antenas de transmissão e suas características mecânicas, Figura 5.11 e Figura 5.12.

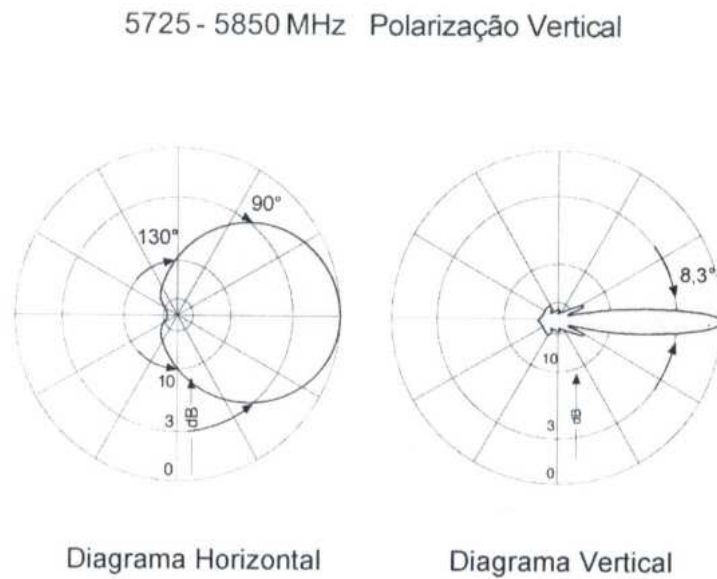


Figura 5.11 – Diagrama de radiação da antena de transmissão do sinal WiMAX

| Características Mecânicas | |
|----------------------------------|--|
| Conector | N-fêmea |
| Posição do conector | inferior |
| Peso | 1,5 kg |
| Carga de vento | Frontal : 55 N (a 150 km/h) Lateral : 40 N (a 150 km/h) Traseiro : 130 N (a 150 km/h) |
| Velocidade máx. do vento | 200 km/h |
| Embalagem | 490 x 170 x 99 mm |
| Dimensões | 460 x 155 x 69 mm |

Figura 5.12 – Características mecânicas da antena de transmissão do sinal WiMAX

5.3.3. Antena receptora

A antena utilizada na recepção já foi descrita no item 4.2.1. Esta é uma antena omnidirecional, com frequência de operação de 5725MHz até 5850MHz, 8 dBi de ganho, polarização vertical e 50 ohms de impedância (Figura 4.15).

5.3.4. Analisador RF - Agilent FieldFox (N9912A)

Para a medida dos sinal WiMAX, foi utilizada a função analisador de espectro do equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A).

A função de analisador de espectro do equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) permite que seja delimitada uma frequência a ser considerada e também utiliza marcadores para facilitar a identificação da potência que está sendo recebida em uma determinada frequência.

Além disso, permite que seja utilizado traçado específico para obtenção dos dados de máximos recebidos e que os mesmos sejam salvos em um pendrive nos formatos de imagem ou de csv.

O modo como devem ser utilizadas estas funcionalidades (analisador de espectro) estão detalhadas no Anexo I – Guia de Utilização (Equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A).

6. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE

Este capítulo detalha os resultados obtidos com o ensaio realizado no laboratório de antenas e nas medidas do sinal da tecnologia WiMAX.

Também é feita a análise dos resultados, comparando os mesmos com a teoria relacionada que se encontra descrita no capítulo de introdução teórica.

6.1. RESULTADOS DAS MEDIDAS REALIZADAS

Além da análise das medidas realizadas levando em consideração os aspectos teóricos envolvidos, procurou-se documentar ao máximo, por meio de imagens e elaboração de tabelas contendo os dados, para facilitar não somente o próprio processo de análise, como também um melhor registro.

6.1.1. Ensaio no laboratório de antenas

Primeiramente, foram conectados os cabos adquiridos (LDF4-50A), conforme detalhado anteriormente. Para o laboratório, utilizou-se 2 m de cabo para conectar a antena de recepção fixada no posicionador, 23 m de cabo para conectar o posicionador a porta RF IN do equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A e mais 21 m de cabo para conectar a antena de recepção fixada em suporte específico no laboratório de antenas.

Segue abaixo Tabela 7 relacionando as perdas proporcionadas por estes cabos, lembrando que, como a frequência utilizada no ensaio foi de 5,725 a 5,850 GHz, a perda informada pelo fornecedor na folha de especificação é de aproximadamente 20,1 dB/m (perda para a frequência de 6 GHz, mais próxima da frequência objeto de estudo do trabalho).

Tabela 7 – Perdas proporcionadas por cada um dos cabos

| Tamanho do cabo | Perda [dB] |
|-----------------|------------|
| 2 metros | 0,402 |
| 21 metros | 4,221 |

| | |
|-----------|-------|
| 23 metros | 4,623 |
|-----------|-------|

Segue abaixo imagem obtida pelo equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A operando em modo S21, dentro da faixa de frequência de operação das antenas e mostrando o valor de potência obtida na recepção (Figura 6.1). Para obtenção do diagrama de radiação, foi utilizado o posicionador totalmente na vertical e variado com o auxílio do contralador da Scientific Atlanta a posição da antena em passos de 10° em 10° objetivando cobrir os 360° do diagrama de radiação da antena de recepção (Figura 6.2).

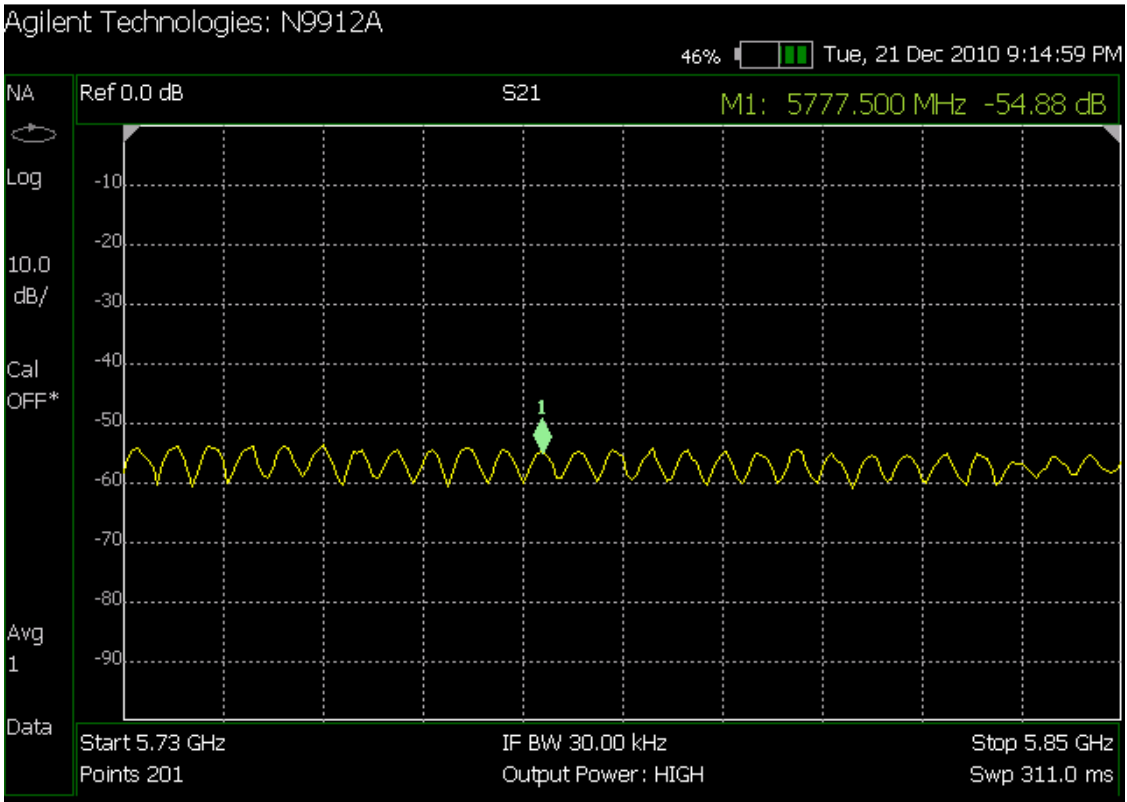


Figura 6.1 – Imagem obtida com o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) operando em modo S21

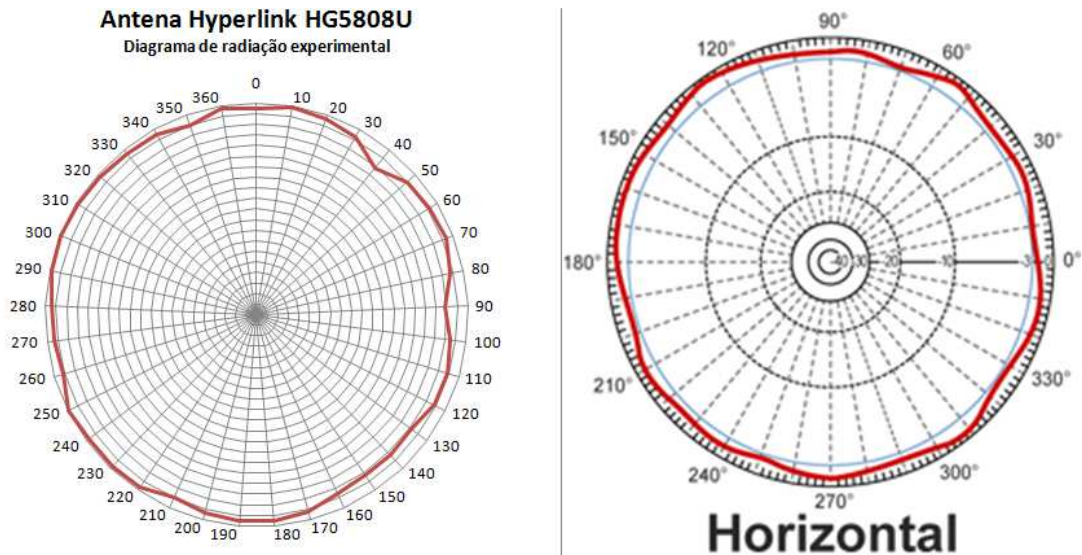


Figura 6.2 – Diagrama de radiação experimental (esquerda) e teórico (direita) da Antena Hyperlink HG5808U

O valor da potência recebida na recepção foi de -54,88 dBW (igual -24,88dBm, após conversão), lembrando que a distância medida entre as antenas de transmissão e recepção foi de 8,9 metros. Não tendo sido necessário realizar configurações específicas no equipamento, foi apenas inserido o valor da faixa de frequência a ser analisada e utilizado as demais configurações com o valor padrão do equipamento.

6.1.2. Sinal WiMAX

Na realização das medidas do sinal WiMAX, foi utilizado o cabo 2 m e antena Hyperlink HG5808U, tendo sido o cabo conectado à antena e ao equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A.

Utilizando-se a função analisador de espectro do equipamento, foram realizados ajustes na faixa de frequência a ser considerada para a mesma da antena e, conseqüentemente, do sinal objeto de estudo (5725MHz até 5850MHz).

Conforme informado anteriormente, a localização escolhida para as medidas foi o Sudoeste. Com o auxílio de um GPS, foram obtidas as informações referentes à latitude e longitude para cada um dos pontos de medida.

Para aquisição da potência, foi necessária a realização de configuração varredura de aquisição, conforme Anexo I e Tabela 8, com objetivo de relacionar esta com a configuração de resolução para permitir adequar o intervalo de tempo entre as amostras.

A resolução de largura de banda também teve que ser ajustada, levando em consideração o fato de que o valor máximo em que o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A pode ser configurado é de 2 MHz [15].

Tabela 8 – Configuração realizada no equipamento referente a largura de banda e a varredura de aquisição

| | |
|--|----------------|
| Resolução da Largura de Banda | 2 MHz |
| Resolução da Largura de Banda de vídeo | 2 MHz |
| Varredura de Aquisição | 1,097 segundos |

A tecnologia WiMAX permite que seja definida largura de banda do canal variando de 1,25 MHz até 20 MHz, o que permite uma implementação bastante flexível [2].

Em contato com a empresa responsável pela geração do sinal WiMAX, foi repassada a informação de que o sinal transmitido na célula do Sudoeste é composto de 4 canais, com largura de banda de 10 MHz e frequência de operação de 5725 MHz até 5850 MHz, não existindo distinção de potência entre os canais. Tendo sido também repassada a informação de que o canal operando nesta região estaria localizado na frequência central de 5845 MHz, as medidas foram então feitas considerando este canal.

Como a largura dos canais é de 10 MHz, valor este superior a largura de banda que pode ser configurada no equipamento (que é de 2 MHz), para obtenção de um valor mais adequado para as medidas foi selecionado neste, frequência inicial e final com valores respectivos de 5844 MHz e 5846 MHz. A medida em cada ponto foi feita considerando apenas uma parcela (2 MHz) da largura de banda total do canal considerado (10 MHz), conforme Figura 6.3.

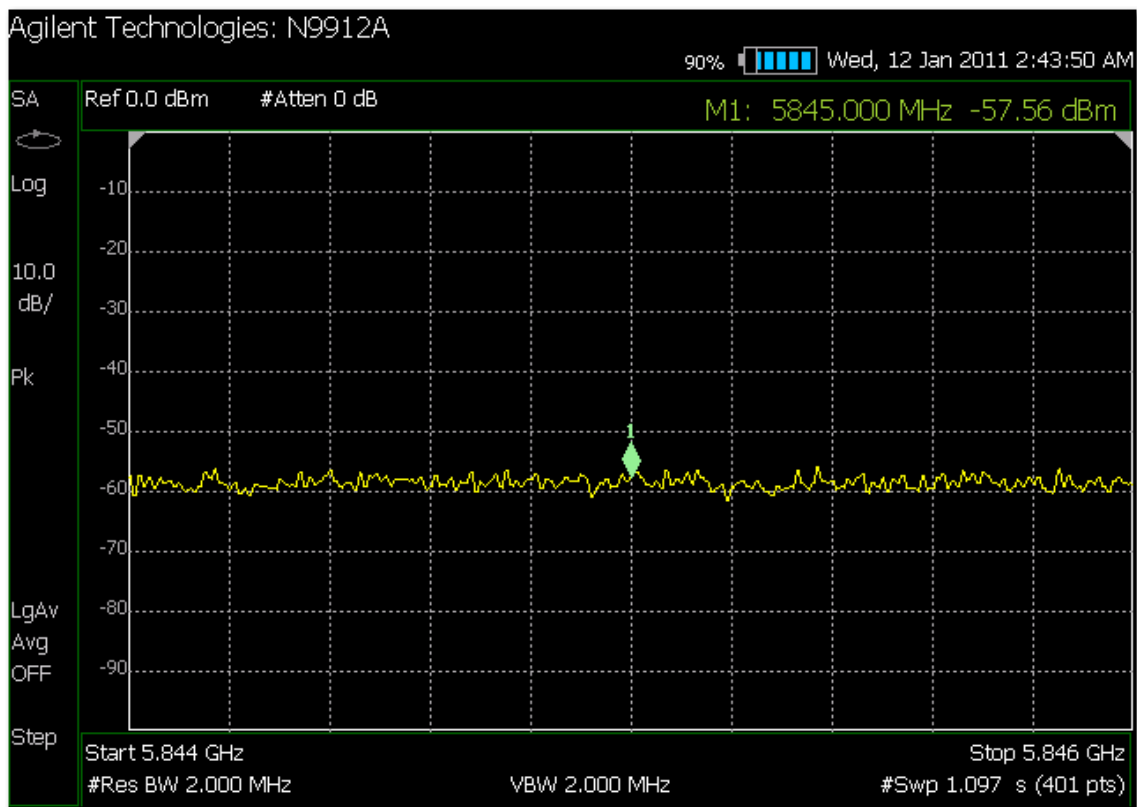


Figura 6.3 – Imagem obtida com o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) operando no modo Analisador de Espectro e com as configurações descritas na Tabela 8

Medidas foram feitas em 10 posições na cidade satélite Sudoeste, localizada em Brasília-DF. Esta região é formada, basicamente, por prédios de 4 a 10 andares, com poucas árvores que se encontram nas vias de circulação dos automóveis. Não foram obtidas variações significativas no nível de potência recebido (-57,56 dBm).

A localização da infraestrutura de transmissão do sinal no Sudoeste em termos de latitude e longitude é S15°48'01.62" W47°56'05.72", e o prédio em cima do qual está localizada possui aproximadamente 45 metros de altura.

Tendo em vista os resultados obtidos, com as medidas realizadas na região do Sudoeste, foi feito contato com a empresa de Brasília que opera utilizando o sinal com tecnologia WiMAX com intuito de verificar se a mesma poderia disponibilizar alguns dos seus equipamentos (BSU, antenas setoriais e CPE) para realização de experimentos no laboratório de antenas do ENE/UnB, Figura 6.4 e Figura 6.5.



Figura 6.4 – BSU disponibilizada pela empresa de Brasília (Potência máxima de 22 dBm)

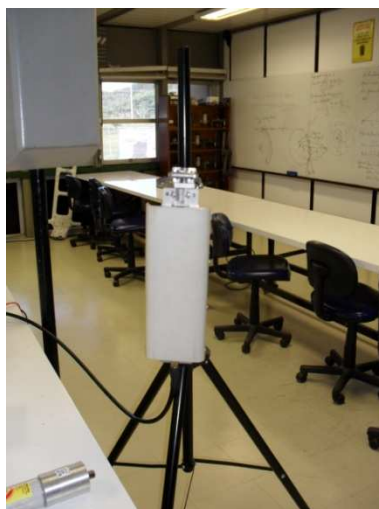


Figura 6.5 – Antena setorial diretiva disponibilizada pela empresa de Brasília (Figura 5.11 e Figura 5.12)

Além disso, foi feita consulta ao fornecedor do equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A, com intuito de verificar qual seria a melhor configuração a ser feita para realização de medidas WiMAX. Tendo o fornecedor respondido que, como o RBW máximo do FieldFox é de 2MHz, caso se configure o RBW para 2MHz será obtida uma curva toda distorcida e que ainda apresentará uma potência aproximada de 4 a 5dB abaixo da potência real do canal para um sinal WiMAX de 10MHz de banda (largura dos canais no sinal utilizado pela empresa de Brasília). O fornecedor então sugeriu que fosse configurado o Span mantendo o RBW e Sweep Acquisition em automático, alterando o Span para 20MHz (conforme procedimentos do Anexo I).

A resposta encaminhada pelo fornecedor do equipamento se mostrou totalmente coerente com os resultados obtidos nas medidas realizadas na região da cidade Sudoeste.

Utilizando os equipamentos disponibilizados pela empresa de Brasília operando com as mesmas características dos equipamentos utilizados para transmissão do sinal na região da cidade Sudoeste, e realizando as configurações sugeridas pelo fornecedor para o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A, foram realizadas algumas configurações de infraestrutura e realizadas medidas experimentais no Laboratório de Antenas do ENE/UnB, com sinal utilizando tecnologia WiMAX operando com a frequência central de 5,740 GHz.

As configurações de infraestrutura utilizadas nas medidas experimentais dentro do Laboratório de Antenas do ENE/UnB foram:

1. Configuração 1 (Figura 6.6): Antena diretiva na transmissão e omni na recepção (antena disponibilizada pela empresa de Brasília e antena HG5808U da Hyperlink), com uma distância de 1 metro entre transmissão e recepção, altura da antena de transmissão e de recepção igual a 1,5 metros;
2. Configuração 2 (Figura 6.8): Antenas diretivas na transmissão e na recepção (antenas disponibilizadas pela empresa de Brasília), com uma distância de 8,3 metros entre transmissão e recepção, altura da antena de transmissão e de recepção igual a 1,5 metros.



Figura 6.6 - Antena diretiva na transmissão e omni na recepção, distância de 1 metro entre transmissão e recepção

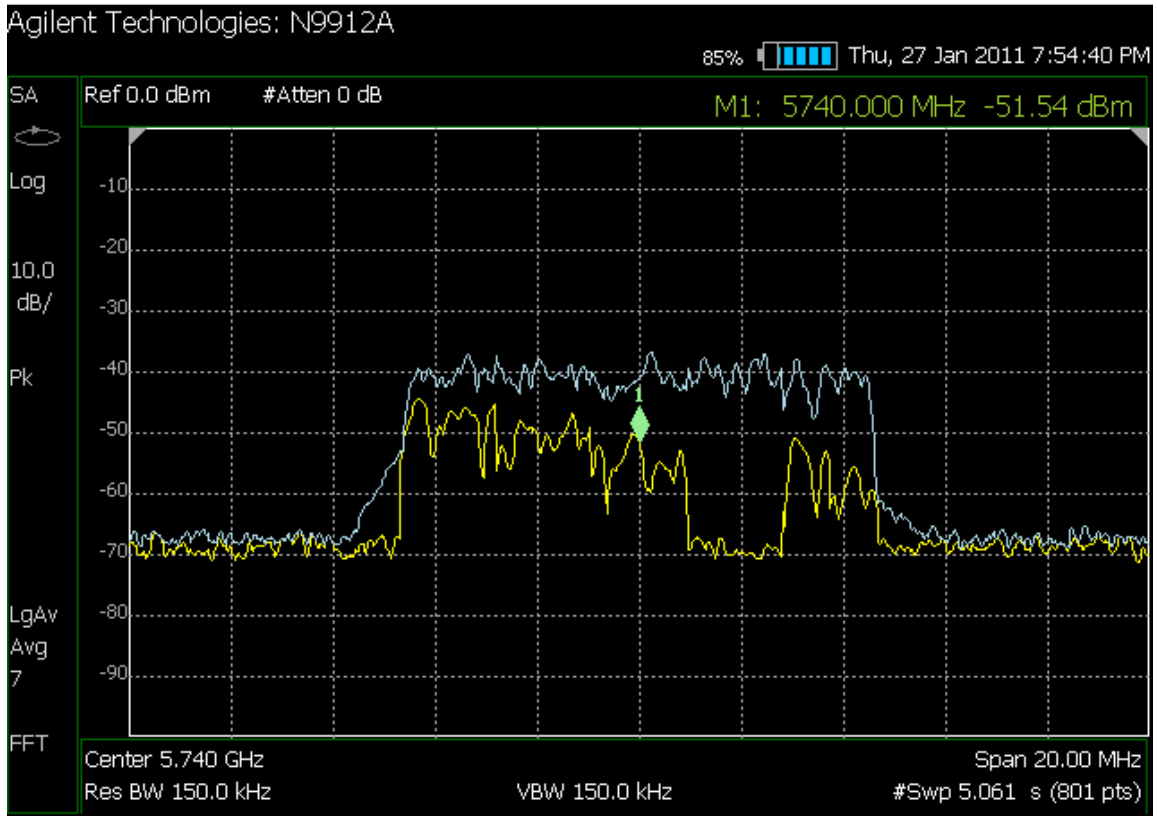


Figura 6.7 - Imagem obtida com o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) operando no modo Analisador de Espectro na Configuração 1

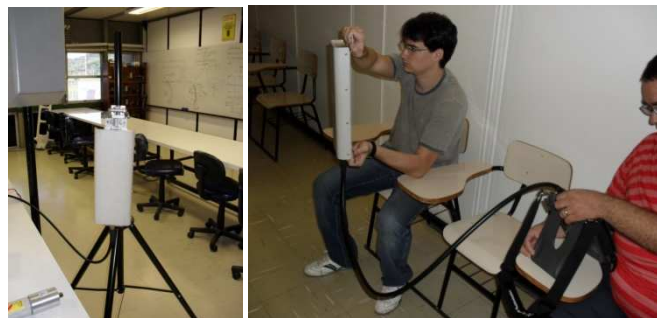


Figura 6.8 - Antenas diretivas na transmissão e na recepção, com uma distância de 8,3 metros entre transmissão e recepção

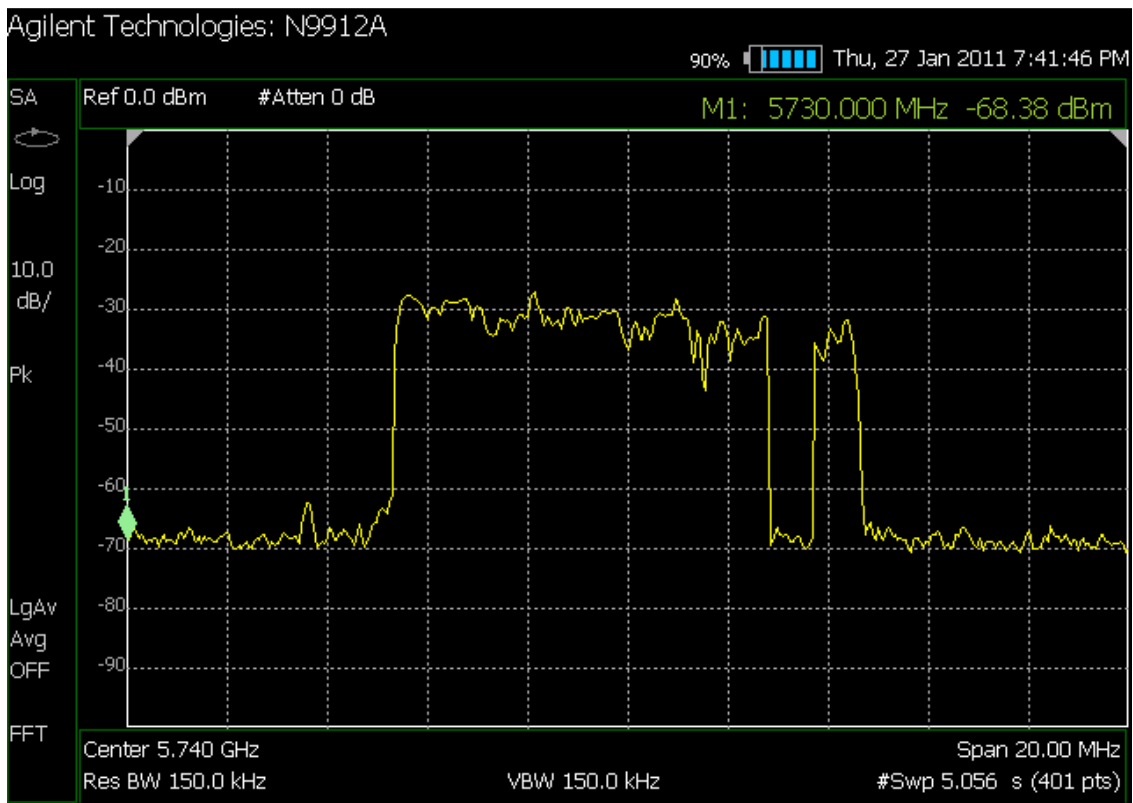


Figura 6.9 - Imagem obtida com o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) operando no modo Analisador de Espectro na Configuração 2

Na Configuração 1 foi obtido um nível de potência de aproximadamente -38 dBm (Figura 6.7), já na Configuração 2, obteve-se um nível de potência de aproximadamente -30 dBm (Figura 6.9).

Além destas duas configurações, foi realizado ainda experimento em ambiente externo ao Laboratório de Antenas do ENE/UnB - Configuração 3 (Figura 6.10). Para isso, foram utilizadas as antenas, os cabos e BSU disponibilizados pela empresa de Brasília objetivando ter a mesma configuração utilizada por esta para operar e disponibilizar o serviço na cidade Sudoeste utilizando a tecnologia WiMAX. Também foram utilizados o posicionador existente no Laboratório de Antenas e o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A neste experimento.

A localização do posicionador do Laboratório de Antenas do ENE/UnB fornecida pelo GPS em termos de latitude e longitude foi de, respectivamente, 15°45.960'S e 47°52.326'W. O ponto em que foi realizada a medida se localizava na

latitude e longitude de, respectivamente, $15^{\circ}45.973'$ e $47^{\circ}52.329'$. Temos, assim, que a distância entre o ponto de transmissão e recepção foi de 24,662 metros. A altura da antena de transmissão foi de 10 metros (altura do prédio somada a do posicionador) e da antena de recepção foi de 1,5 metros. Nesta configuração, foi obtida uma potência de aproximadamente -55 dBm (Figura 6.11).



Figura 6.10 - Antenas diretivas na transmissão e na recepção, com uma distância de 24,662 metros entre transmissão e recepção

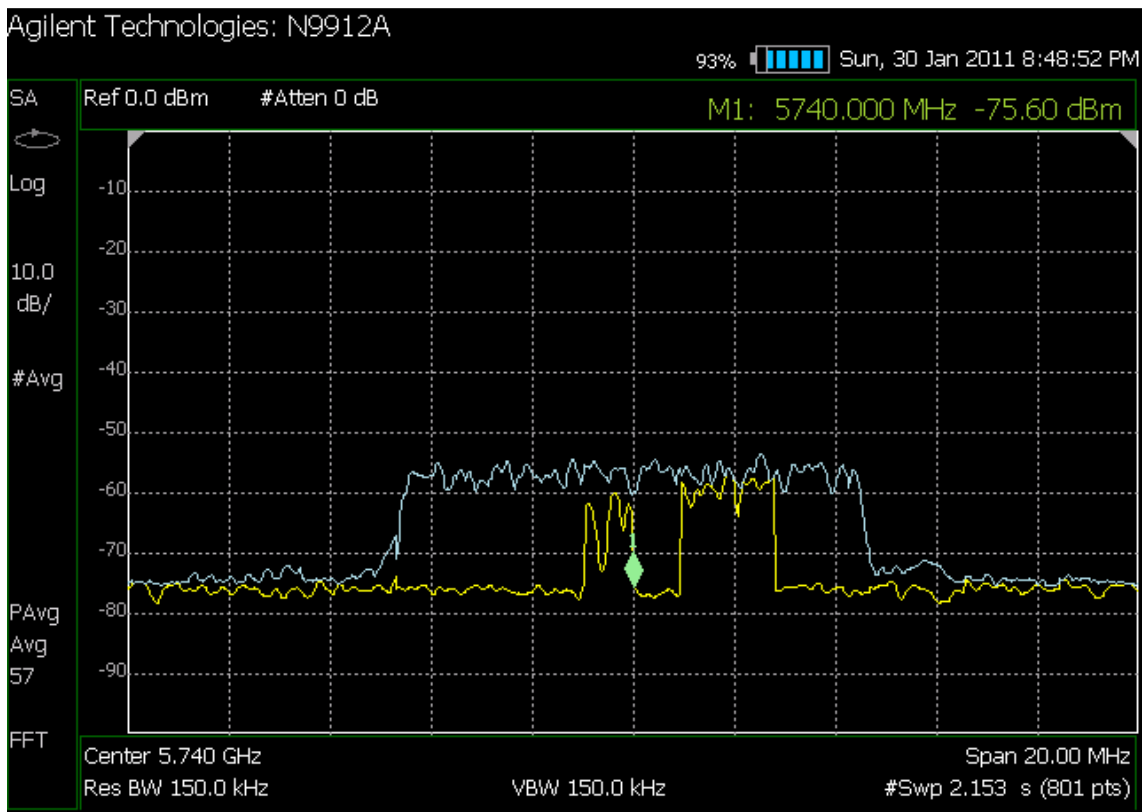


Figura 6.11 - Imagem obtida com o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) operando no modo Analisador de Espectro na Configuração 3

6.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para realização da análise dos dados das medidas, foram feitos cálculos envolvendo a teoria de propagação, com o uso da Fórmula de Friis e de alguns outros modelos.

Além disso, realizou-se avaliação quanto ao comportamento do sinal medido no ensaio com relação ao diagrama de radiação informado pelo fornecedor.

6.2.1. Ensaio no Laboratório de Antenas

Considerando a infraestrutura adquirida (antena e cabos), a potência transmitida pelo equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A (P_T) e a distância entre as antenas (transmissão e recepção), foi realizado cálculo das perdas usando a Fórmula de Friis.

$$L_F = \frac{P_t G_a G_b}{P_r} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi f}{c} \right)^2$$

$$L_{F(dB)} = 32,4 + 20 \log R + 20 \log f_{MHz}$$

Desta forma, temos então que

$$P_R[dBW] = P_T[dBW] - L_T[dB] + G_T[dBi] + G_R[dBi] - L_R[dB] -$$

$$20 \log f[MHz] - 20 \log R[km] - 32,44$$

Onde temos representadas também as perdas adicionais devido aos cabos utilizados na transmissão (L_T) e na recepção (L_R).

Conforme já detalhado anteriormente, temos os seguintes valores para cada uma das variáveis

$$P_T [dBm]=5 \text{ dBm}$$

$$L_T[dB]=4,221$$

$$L_R[dB]=4,623+0,402=5,025$$

$$G_T[dBi]=25$$

$$G_R[dBi]=8$$

$$f[MHz]=5800$$

$$R[km]=0,0089$$

Substituindo os valores acima na Fórmula de Friis, temos, conforme descrito abaixo, o resultado teórico para a potência recebida

$$P_R[dBm] = 5 - 4,221 + 25 + 8 - 5,025 - 20 \log 5800 - 20 \log 0,0089 - 32,44$$

$$P_R[dBm] = 5 - 4,221 + 25 + 8 - 5,025 - 75,27 + 41,01 - 32,44$$

$$P_R[dBm] = -37,946 \text{ dBm}$$

Este valor está dentro dos limites do intervalo dinâmico do equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A, tendo sido a potência recebida por este de -54,88 dB (-24,88dBm). Esta medida se encontra na Figura 6.1, sendo este resultado experimental considerado satisfatório e coerente com a teoria relacionada.

Considerando o cálculo de campo distante, onde temos que

$$r \geq \frac{2d^2}{\lambda}$$

Para esta fórmula, em que d é o diâmetro da antena e λ o comprimento de onda do sinal gerado, temos que o diâmetro da antena Hyperlink HG5808U é de 0,4 metros e o comprimento onda do sinal é 0,05 metros para uma frequência de 5800 MHz. A partir destes valores, foi obtido o valor para r de 6,4 metros. Desta forma, as medidas do ensaio realizadas no laboratório de antenas ocorreram no campo distante, ou seja, a uma distância superior a 6,4 metros (8,9 metros).

Logo, podemos considerar que o laboratório de antenas está adequado para realização de experimentos didáticos envolvendo enlace de microondas para frequências de até 6 GHz.

O outro experimento didático realizado foi a obtenção do diagrama de radiação da antena Hyperlink HG5808U para posterior comparação com o diagrama de radiação fornecido pelo fornecedor da antena. Na Figura 6.2, é mostrado o diagrama obtido experimentalmente e o do fornecedor (teórico).

Comparando os diagramas (experimental e teórico), foi obtido resultado também satisfatório e coerente com a teoria relacionada. Desta forma, o experimento didático de validação do diagrama de radiação pode ser realizado para frequências de até 6 GHz, fornecendo aos alunos da disciplina de antenas uma maior liberdade para elaboração de seus projetos para posterior validação dos mesmos no laboratório de antenas, com a supervisão do professor responsável pela disciplina em cada semestre.

6.2.2. Sinal WiMAX

O valor obtido nas medidas realizadas nos 10 pontos foi posteriormente comparado com os resultados obtidos utilizando os seguintes modelos de predição da propagação: Espaço Livre, Okumura-Hata, Cost 231-Hata, Cost 231 Ikegami-Walfish, SUI, ECC-33 e Ericsson [14][17][18].

O nível de potência obtida no ponto de visada direta, latitude de $S15^{\circ}47.927'$ e longitude de $W47^{\circ}55.955'$, foi de $-57,56\text{dBm}$, conforme mostrado na Figura 6.3. A distância em metros entre o ponto de transmissão e o ponto de recepção obtido foi, então, de 311,2 metros.



Figura 6.12 – Antena transmissora localizada no alto do prédio (marcado de vermelho) e antena receptora HG5808U da Hyperlink

Considerando as informações obtidas no ponto de visada direta e demais informações repassadas pela empresa que fornece o sinal WiMAX, foram utilizados os modelos de predição para cálculo dos valores de nível da potência a ser recebida neste ponto de visada direta, mostrados na Tabela 9. Para estes cálculos, foi utilizada a frequência central do canal de 5845 MHz, distância de 311,2 metros (0,3112 km) entre os pontos, altura da antena de transmissão 45 metros e altura da antena de recepção de 2

metros, bem como as demais informações já declaradas para o ganho das antenas e potência de transmissão.

Tabela 9 – Resultados obtidos utilizando os modelos de previsão para o ponto de visada direta e percentual diferencial com relação à potência medida experimentalmente de -57,56 dBm

| Modelo | Nível de Potência [dBm] | Percentual diferencial |
|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| Espaço Livre | -53,5485 | 7% |
| Okumura-Hata | -44,1641 | 23,27% |
| Cost 231-Hata | -87,975 | 52,84% |
| Cost 231 Ikegami-Walfish | -53,5485 | 7% |
| SUI | -133,511 | 132% |
| ECC-33 | -53,631 | 6,83% |
| Ericsson | -91,8479 | 59,57% |

Para o modelo Cost 231, foi considerada a aproximação para área aberta e cidades médias a pequenas, uma vez que estávamos a uma distância de 311 metros da transmissão e em visada direta. O valor obtido com o modelo de espaço livre foi superior ao obtido experimentalmente, mas deve ser observado que neste é considerada uma fonte omnidirecional da potência e no serviço prestado pela empresa de Brasília são utilizadas antenas do tipo painel e altamente diretivas.

No uso do modelo SUI, foram utilizados os parâmetros referentes ao Terreno Tipo C, com o expoente de perda (γ) igual a 2 pelo fato de se estar em visada direta. Uma vez que o ponto considerado está em visada direta com a antena transmissora, o modelo de Cost 231 Ikegami-Walfish forneceu resultado igual do modelo de espaço livre.

A partir dos resultados obtidos, temos que os modelos que apresentaram uma melhor aproximação para a faixa de frequência de operação da empresa de Brasília, apesar destes não terem sido especificados para utilização dentro desta faixa, foram:

- Espaço Livre;
- Okumura-Hata;

- Cost 231 Ikegami-Walfish;
- ECC-33.

Uma vez que a empresa utiliza antenas diretivas para disponibilização do serviço (na transmissão e na recepção), e que a potência recebida na medida experimental foi inferior ao nível de ruído detectado pelo equipamento, temos assim que a potência recebida nesta configuração deve ser próxima ao valor de -57,56 dBm, o que permite delimitar quais modelos são mais adequados e que poderiam ser utilizados pela empresa para verificação da área de cobertura do sinal disponibilizado.

Lembrando que os modelos teóricos são usualmente limitados à faixa de frequência de até 2 GHz apenas, explica-se assim parcialmente as discrepâncias em alguns dos valores encontrados.

A partir dos resultados obtidos no Laboratório de Antenas do ENE/UnB, foi também feita comparação destes com os resultados obtidos utilizando os seguintes modelos de predição da propagação: Espaço Livre, Okumura-Hata, Cost 231-Hata, Cost 231 Ikegami-Walfish, SUI, ECC-33 e Ericsson [14][17][18].

Para estes cálculos, foi utilizada a frequência central do canal de 5740 MHz, bem como demais parâmetros já informados para cada uma das configurações.

1. Configuração 1: Antena diretiva na transmissão e omni na recepção (antena disponibilizada pela empresa de Brasília e antena HG5808U da Hyperlink), com uma distância de 1 metro entre transmissão e recepção, altura da antena de transmissão e de recepção igual a 1,5 metros, nível de potência medida na recepção de -38 dBm;
2. Configuração 2: Antenas diretivas na transmissão e na recepção (antenas disponibilizadas pela empresa de Brasília), com uma distância de 8,3 metros entre transmissão e recepção, altura da antena de transmissão e de recepção igual a 1,5 metros, nível de potência medida na recepção de -30dBm;
3. Configuração 3: Antenas diretivas na transmissão e na recepção (antenas disponibilizadas pela empresa de Brasília), com uma distância de 24,662

metros entre transmissão e recepção, altura da antena de transmissão de 10 metros e altura da antena de recepção igual a 1,5 metros, nível de potência medida na recepção de -55dBm.

Tabela 10 – Resultados obtidos utilizando os modelos de predição para as configurações utilizadas nos experimentos realizados no Laboratório de Antenas do ENE/UnB

| | Nível de Potência [dBm] | | | | | |
|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| | Configuração 1 | | Configuração 2 | | Configuração 3 | |
| Modelo | Nível de Potência [dBm] | Percentual diferencial | Nível de Potência [dBm] | Percentual diferencial | Nível de Potência [dBm] | Percentual diferencial |
| Espaço Livre | -3,63824 | 90,426 % | -15,0198 | 49,934 % | -24,4788 | 55,493 % |
| Okumura-Hata | 49,34802 | 229,863 % | 16,1448 | 153,816 % | -1,83925 | 96,656 % |
| Cost 231-Hata | 4,014577 | 110,565 % | -29,192 | 2,693 % | -47,1731 | 14,321 % |
| Cost 231 Ikegami-Walfish | -3,63824 | 90,426 % | -15,0198 | 49,934 % | -24,4788 | 55,493 % |
| SUI | 221,435 | 682,724 % | 72,87337 | 342,911 % | -76,3392 | 38,799 % |
| ECC-33 | -88,2076 | 132,125 % | -90,6518 | 202,173 % | -89,7481 | 63,178 % |
| Ericsson | 0,05229 | 100,138 % | -20,7201 | 30,933 % | -44,7659 | 18,607 % |

Para o modelo Cost 231, foi considerada a aproximação para área aberta e cidades médias a pequenas nas 3 configurações de medidas experimentais realizadas.

Nestas configurações, para o modelo SUI, foram também utilizados os parâmetros referentes ao Terreno Tipo C, com o expoente de perda (γ) igual a 2 pelo fato de se estar em visada direta. Uma vez que as medidas experimentais realizadas no Laboratório de Antenas estavam em visada direta com a antena transmissora, o modelo de Cost 231 Ikegami-Walfish forneceu resultado igual ao modelo de espaço livre.

A partir dos resultados obtidos, conforme Tabela 10, temos que os modelos que apresentaram uma melhor aproximação considerando a frequência central de 5740 MHz para o canal foram os seguintes:

- Espaço Livre;
- Cost 231-Hata;
- Cost 231 Ikegami-Walfish;
- Ericsson.

Os resultados obtidos com a Configuração 1 permitem inferir que para distâncias pequenas (entre a antena transmissora e a receptora), os modelos em questão não são válidos e que os mesmos apresentam valores muito diferentes dos obtidos experimentalmente.

Ao se elevar a distância entre as antenas, observou-se que os resultados teóricos fornecidos pelos modelos se aproximaram mais dos obtidos experimentalmente.

Como nas medidas realizadas no Sudoeste não foi possível se ter uma visada direta com a antena transmissora, e levando-se em consideração que as perdas nesta faixa de frequência são elevadas, temos, assim, que o nível de potência do sinal recebido pelo equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A nesta localidade não pode ser considerado como sendo o valor correto.

No entanto, nas medidas realizadas no Laboratório de Antenas do ENE/UnB foi possível visualizar de forma adequada o sinal recebido pelo equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A, bem como identificar dentro do espectro de frequência, o sinal gerado pela BSU utilizando a tecnologia WiMAX. Desta forma, este resultado deve ser considerado como sendo o válido para identificar qual dos modelos considerados apresenta melhor resultado para sinais operando em faixa de frequência de até 6 GHz (Espaço Livre, Cost 231-Hata, Cost 231 Ikegami-Walfish e Ericsson).

Apesar de estes resultados serem satisfatórios, deve ser levado em consideração que o modelo Cost 231-Hata não foi elaborado para a faixa de frequência de até 6 GHz e também não é aplicável para a altura da estação base utilizada na Configuração 3. Além disso, o modelo Cost 231 Ikegami-Walfisch não é aplicável para esta faixa de frequência e para a distância entre a antena transmissora e receptora utilizada nos experimentos realizados.

7. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram a realização da atualização do laboratório de antenas do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, uma vez que no mesmo era possível a realização de experimentos somente para frequências até 2 GHz. Após a aquisição dos novos equipamentos (cabos, antenas e equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A) para atualização da infraestrutura, torna-se possível a realização de experimentos em até 6 GHz.

Tendo sido realizados dois experimentos, operando na faixa de frequência de 5,725 a 5,850 GHz, o de obtenção do diagrama de radiação de uma antena e avaliação da perda total da potência do sinal transmitido com relação à potência recebida, os resultados para ambos os experimentos foram considerados adequados com relação à teoria relacionada.

Além disso, foi realizada medida do sinal de empresa local operando com tecnologia WiMAX. Para isso, primeiramente foi realizado contato com a empresa para obtenção das informações necessárias; em seguida, foram feitas medidas de potência do sinal recebido utilizando o equipamento Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A, na cidade Sudoeste e no laboratório de antenas do ENE/UnB; ao final, foram realizados os cálculos relacionados a alguns modelos de predição para comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

O resultado obtido permite inferir que dentre os modelos de predição utilizados na comparação, os que mais se aproximaram dos valores obtidos experimentalmente foram o Espaço Livre, Cost 231-Hata, Cost 231 Ikegami-Walfish e Ericsson, apesar destes não terem sido especificados para utilização dentro da faixa de frequência de até 6 GHz.

Do ponto de vista de pesquisa e ensino, como trabalho futuro pode ser proposto o desenvolvimento de roteiros de experimentos a serem realizados no laboratório de antenas envolvendo sinais e antenas que operem na faixa de frequência de até 6 GHz, bem como a realização de estudos complementares dos modelos que apresentaram valor mais aproximado ao experimental, buscando relacionar o seu uso para faixas de

frequência mais altas e realizando uma maior quantidade de medidas objetivando a obtenção de uma maior amostra para permitir avaliação estatística do erro associado. Posteriormente, pode-se propor fator de correção para que estes modelos possam fornecer uma melhor aproximação para frequências mais elevadas.

8. REFERÊNCIAS

- [1] D. Pareek, “WiMAX - Taking Wireless to the MAX”, Editora Auerbach Publications, Primeira Edição, 2006.
- [2] J. G. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed, “Fundamentals of WiMAX – Understanding Broadband Wireless Networking”, Editora Prentice Hall, Primeira Edição, 2007.
- [3] S. R. Saunders, A. A. Zavala, “Antennas e Propagation for Wireless Communication Systems”, Editora John Wiley & Sons, Segunda Edição, 2007.
- [4] N. LaSorte, W. J. Barnes, B. Zengren, H. Refai, “Performance Evaluation of Deployed WiMAX System Operating in the 4.9GHz Public Safety Band”, Electrical and Computer Engineering, University of Oklahoma-Tulsa, Tulsa, Oklahoma, United States of America, 2009, IEEE.
- [5] EET-Ericsson Engineering Tool, “User Reference Guide”, Ericsson Radio System AB, 1997.
- [6] W. Afric, N Matosic, D. Vantake, “WiMAX on 3,5 Ghz cell size calculation”, Proc. Of 48th Inter. Sympos. ELMAR, 2006, pp. 195-198.
- [7] Okamura, Y. “Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service.” Rev. Elec. Comm. Lab. No.9-10pp. 825 - 873, 1968.
- [8] Electronic Communication Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administration (CEPT), “The Analysis of the Coexistence of FWA Cells in the 3.4 - 3.8 GHz Band.” tech. rep., ECC Report 33, Maio 2003.
- [9] D. Pareek, “The Business of WiMAX”, John Wiley, 2006.
- [10] Data sheet RG213U e RG214U – www.eupen.com acessado em 11/09/2010.
- [11] C. Lourenço, M. Fernando Mendes, “Medidas de diagrama de radiação de antenas via computador digital”, Projeto Final de Graduação, Universidade de Brasília – Departamento de Engenharia Elétrica, Brasília-DF, 1995.
- [12] Analisador de RF Fildefox N9912A - <http://www.datashop.com.br/internas/produtos.php?id=634> acessado em 17/10/2010.
- [13] E. Serodio, M. A. Silva, “Metodologia de predição e medição em ambiente wireless”, Projeto Final de Graduação, Universidade de Brasília – Departamento de Engenharia Elétrica, Brasília-DF, 2004.

- [14] P. H. S. Wanderley, “Análise de radiação não-ionizante emitida por estações de rádio-base com perdas calculadas pelo modelo de Ikegami-Walfisch”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília – Departamento de Engenharia Elétrica, Brasília-DF, 2009.
- [15] Agilent FieldFox RF Analyzer (N9912A) – User’s Guide, Agilent Technologies, Novembro de 2008.
- [16] RESOLUÇÃO Nº 506 - Republica o Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita, Julho/2008, ANATEL.
- [17] S. Rimac-Drlje, J. Milanovic, “Receiving Power Level Prediction for WiMAX Systems on 3.5 GHz”, Siemens IT Solutions and Services, Siemens d.d., Osijek, Croatia, IEEE Communications Society, WCNC 2009.
- [18] E. P. Moraes, J. Covolan, M. Buffalo, L. R. Maciel, “WiMAX Near LOS Measurements and Comparison with Propagation Models”, Alcatel-Lucent, Network and System Integration Division in Latin America, IEEE Explorer, Maio de 2010.

APÊNDICE – GUIA DE UTILIZAÇÃO (EQUIPAMENTO AGILENT FIELDFOX RF ANALYZER N9912A)

1. Função S21

Uma medida de transmissão S21 é usada para medir a perda através de um dispositivo a ser testado em uma determinada faixa de frequência.

A fonte do sinal no equipamento FieldFox é a saída do conector RF OUT, através do dispositivo a ser testado, que em seguida deve ser inserido no conector RF IN. Ambas as terminações do dispositivo a ser testado devem estar conectadas ao FieldFox.

Para realização de medidas de transmissão S21, devem ser seguidos os seguintes passos.

1. Pressione Mode, então, NA e então S21 Transmission.
2. Pressione Freq/Dist e entrar com os valores inicial e final da frequência da medida.
3. Pressione Sweep 3, então, selecione uma configuração de resolução.
4. Pressione Cal 5, então, pressione Normalization
5. Conectar o dispositivo a ser testado e visualize os resultados da medida da transmissão.

2. Analisador de espectro

Para selecionar o modo analisador de espectro, deve ser pressionado “Mode” e em seguida “SA”.

O intervalo de frequências do eixo X determina as frequências que serão medidas em cada varredura. O intervalo de frequências das medidas é usualmente inserido de duas formas: Center/Span e Start/Stop.

A frequência central pode também ser modificada usando a opção Marker -> Center. A frequência de início padrão é 0 Hz. Para configurar os limites de frequência devem ser seguidos os seguintes passos:

1. Pressionar Freq/Dist.
2. Então escolher entre as seguintes opções:
 - 2.1. Center/Freq Span: Este é o método mais comum de inserir os intervalos de frequência. Deve ser entrada a frequência de interesse. A frequência central esta exatamente no centro do eixo X. Esta seleção coloca então metade do intervalo de frequência em cada um dos lados da frequência central.
 - 2.2. Start/Stop: Permite a inserção da frequência inicial e final a ser considerada no eixo X.
3. Os valores para as frequências podem ser inseridos por meio do teclado ou por meio do seletor existente no painel frontal.

Pode ser realizado o ajuste da escala do eixo Y para facilitar a visualização das partes relevantes de partes do traçado do espectro. O eixo Y é dividido em 10 partes menores. Um nível de referência é mostrado na tela como uma barra horizontal que pode ser colocada em qualquer uma destas partes. Quando a atenuação RF está configurada como Auto, a atenuação RF é acoplada ao nível de referência.

Para configurar a escala os seguintes passos devem ser seguidos:

1. Pressionar Scale/Amptd.

2. Então escolher entre as seguintes opções:

2.1. Autoscale: Automaticamente, ajusta o eixo Y para mostrar adequadamente a amplitude máxima e mínima do traço do espectro mostrado na tela.

2.2. Manualmente, se configurar a escala, o nível de referência e a posição de referência.

2.2.1. Scale: Manualmente, ajusta a escala por divisão para visualização de áreas específicas do traçado atual do espectro. É possível inserir um valor utilizando o teclado.

2.2.2. Ref Level: Manualmente, configura o valor da linha de referência. É possível inserir um valor negativo pressionando Run/Hold (+/-) antes ou depois de digitar um valor, o qual pode alterar também as configurações da atenuação RF.

2.2.3. Ref Position: Manualmente, configura a posição do nível de referência. Posição padrão é zero.

É possível configurar a atenuação do equipamento. A atenuação padrão é configurada em 10 dB. Este valor pode ser alterado de 0 dB até 31 dB em passos de 1 dB. Os passos a seguir devem ser seguidos para realização da configuração deste valor:

1. Pressionar Scale/Amptd.

2. Então RF Atten Auto Man.

2.1. Auto: Atenuação RF é configurada pelo ajuste do nível de referência. Como o nível de referência é baixo, por exemplo -10 dB a -30 dB, o FieldFox assume que se está olhando níveis mais baixos. A atenuação RF é automaticamente reduzida a passos de 5 dB para permitir a visualização de sinais com baixo nível de potência. O valor da atenuação RF nunca é automaticamente reduzido abaixo de 5 dB.

2.2. Man: Atenuação RF é configurada manualmente. Deve ser incluído valor com utilização do teclado numérico, e em seguida pressionado Enter.

Na função analisador de espectro, existe a possibilidade de configurar a resolução da largura de banda, esta fornece a habilidade de visualizar sinais bem próximos. Quanto mais estreita a resolução de largura de banda, melhor o analisador de espectro pode mostrar a visualização dos sinais. Em adicional, a medida que a resolução da largura de banda é estreitada, menor ruído é medido pelo analisador de espectro e o ruído de fundo na tela diminui como resultado. Isto permite que níveis mais baixos de sinal possam ser vistos e medidos. No entanto, a medida que a resolução da largura de banda é estreitada, o tempo de varredura se torna mais lento.

Para a configuração da resolução da largura de banda, devem ser realizados os passos abaixo.

1. Pressionar BW 2.

2. Em seguida Res BW Auto|Man.

- 2.1. Auto: Resolução da largura de banda é acoplada ao espaçamento de frequência.

A medida que o espaçamento de frequência é estreitado, a resolução da largura de banda também é estreitado promovendo aumento na capacidade de visualização dos sinais.

- 2.2. Manual: Deve ser inserido um valor de resolução de largura de banda usando o teclado numérico. Então adicione um multiplicador se necessário ou aperte Enter.

Quando configurado em automático, a varredura de aquisição é o menor valor requerido com as configurações atuais com o objetivo de atingir a precisão de amplitude sinais que apresentam rápidas taxas de varreduras para atualização.

Contudo, é possível ajustar estas configurações de modo a aumentar a probabilidade de receber e visualizar sinais RF pulsados.

Por exemplo, com a varredura de aquisição configurada para Auto um sinal pulsado GSM não é visível na tela do FieldFox, como mostrado no traçado azul da figura abaixo.

No entanto, ao se observar o traçado, se pode aumentar o valor da varredura de aquisição até o pulso espectral aumentar acima do ruído e atingir seu valor máximo. Aumentando a varredura de aquisição para valores acima deste ponto somente deixa mais lenta a taxa de atualização, mas não melhora a qualidade da medida.

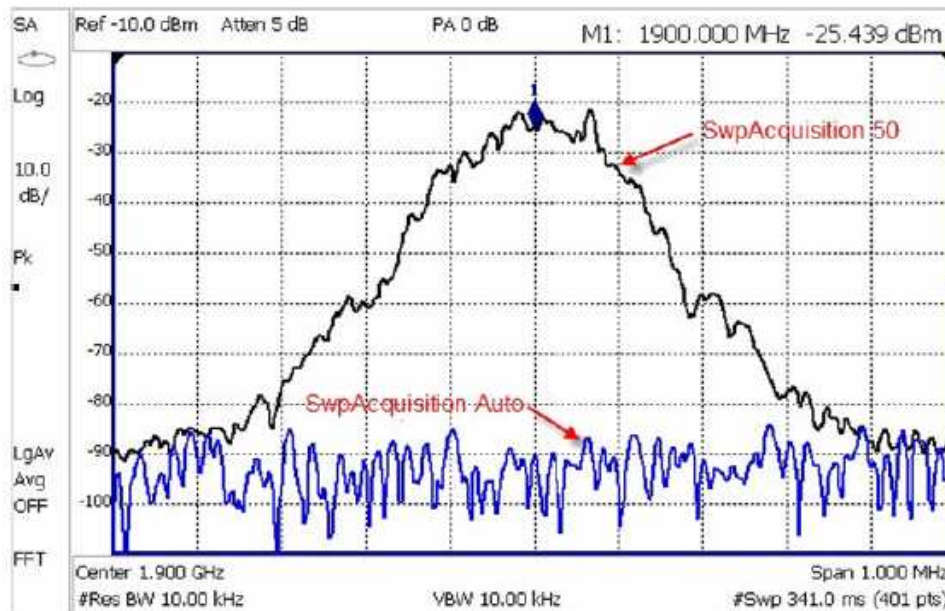


Figura 9.1 – Sinal GSM obtido com varredura de aquisição automática (azul) e após alteração da varredura de aquisição para 50

Para configurar os parâmetros da varredura de aquisição os seguintes passos devem ser seguidos.

1. Pressionar Sweep 3.
2. Em seguida SwpAcquisition Auto Man.
3. Então deve ser escolhido entre as opções:
 - 3.1. Auto: Varredura é configurada para a mais rápida varredura possível com as configurações atuais.
 - 3.2. Manual: Inserir um valor relativo de aquisição entre 1 e 5000, onde:
 - 3.2.1. 1 = Varredura mais rápida possível.
 - 3.2.2. 5000 = Varredura mais lenta possível.

Quando configurados os limites de frequência para zero, não existe espectro de frequência a ser mostrado, então a unidade do eixo X passa a ser o tempo. O analisador de espectro se torna um osciloscópio sintonizável, com a frequência central sendo a frequência de interesse. Esta capacidade é útil para analisar características da modulação, tais como medidas pulsadas.

A seguir os passos que devem ser realizados para configurar a limite zero. Estes passos podem ser realizados caso se queira configurar o equipamento para operar em outros limites de Span.

1. Configure Center para a frequência de interesse.

- 1.1. Então escolha Span para 0 Hz.

- 1.2. Ou se seleciona Zero/Last Span. Cada vez que é pressionada esta opção se alterna entre limite de frequência zero e a última frequência de limite especificada.

O tipo de varredura determina se o FieldFox realiza a varredura continuamente ou apenas uma vez e então fixa o resultado na tela. Pode se usar a opção Single para economizar potência da bateria ou permitir analisar a varredura específica de uma medida.

A configuração do tipo de varredura pode ser configurada por meio da realização dos passos a seguir.

1. Pressionar Sweep 3.

2. Então deve ser escolhido entre as seguintes opções.

- 2.1. Single: Realiza uma varredura de medida, então mantém o resultado. Pressionando Single novamente faz uma nova varredura de medida. Esta configuração esta automaticamente ajustada para desligada (OFF).

- 2.2. Continuous ON OFF: Deve ser selecionado ON para fazer o FieldFox realizar varreduras contínuas. Esta é a medida usual quando a potência da bateria não está baixa.

2.3. Restart: Quando o traçado médio esta ligado, reinicia o processo de obtenção das médias. Quando o Continuous esta desligado (Single), varredura de medida não para até que a média de contagem é atingida.

Resolução é o número de pontos de informação mostrados no eixo X. Quanto maior o número de pontos de informação melhor a habilidade de diferenciar sinais próximos e menor a velocidade de varredura.

A resolução é configurada por meio da realização dos seguintes passos.

1. Pressionar Sweep 3.
2. Então Resolution [current setting].
3. E em seguida deve se escolher entre as opções 101|201|401|601|801|1001.

No analisador de espectro, existem três diferentes processos nos quais a média é realizada.

1. Traçado médio.
2. Método de detecção da média.
3. Marcadores de ruído médio.

Para configurar o tipo de média a ser obtida, devem ser seguidos os passos a seguir.

1. Pressione Meas Setup 4.
2. Então escolha uma das seguintes opções:
 - 2.1. Auto: O equipamento FieldFox escolhe o mais apropriado tipo de média para as configurações atuais. Quando o método de detecção é configurado para obtenção da média ou marcadores de ruídos estão presentes, potência média é sempre selecionada. Caso contrário, é selecionada a média logarítmica.
 - 2.2. Log: Melhor para mostrar o traçado médio. LgAv é mostrado no lado esquerdo da tela do equipamento FieldFox quando selecionado.

2.3. Power: Melhor para medir níveis reais de potência. Usado no método de detecção e marcadores de ruído médio. Matematicamente, o traço é 2,5 dB mais alto do que é obtido utilizando média logarítmica. PAvg é mostrado no lado esquerdo da tela do equipamento FieldFox quando selecionado.

Traçado médio ajuda a suavizar um traçado para reduzir os efeitos do ruído randômico na medida. O equipamento FieldFox considera cada ponto de informação baseado na média de informações obtidas em um mesmo ponto a partir de várias varreduras consecutivas.

Quando traçado médio é selecionado, então a configuração do contador da média passa a se tornar também disponível. O contador da média determina o número de varreduras para obtenção da média. Quanto maior o contador da medida, maior será a magnitude de redução do ruído.

Um contador de média é mostrado na borda esquerda da tela como Avg N. Este mostra o número de varreduras prévias que foram consideradas na obtenção da média a ser mostrada pelo traço na tela do equipamento. Quando o contador atinge o número especificado de amostras, então o resultado do processo de execução da média das últimas N varreduras é mostrado.

Para configurar a geração do traçado médio, devem ser seguidos os seguintes passos.

1. Pressionar Trace 6.
2. Então State [current setting].
3. Então Average.
4. Então Average Count.

No modo analisador de espectro, é possível mostrar até quatro tipo de traçados. Todas as configurações são aplicadas a todos os traçados.

Para configurar os tipos de traços, os seguintes passos devem ser executados.

1. Pressionar Trace 6.
2. Então Trace 1, 2, 3, 4, respectivamente, para selecionar o número de traços a serem mostrados. Traços são mostrados nas cores: 1-amarela, 2-Azul, 3-Laranja e 4-Vermelha.
3. Então State [current setting].
4. Então escolher entre os seguintes tipos de traço.
 - 4.1. Clr/Wr (Clear/Write): mostra a informação da medida atual.
 - 4.2. MaxHold: mostra o máximo sinal de entrada obtido a partir de várias varreduras.
 - 4.3. MinHold: mostra o mínimo sinal de entrada obtido a partir de várias varreduras.
 - 4.4. Average: A informação de cada ponto é a medida obtida a partir de múltiplas varreduras conforme configurado pelo contador de médias.
 - 4.5. View: mostra e então congela na tela o último traço referente a uma medida completa.
 - 4.6. Blank: não mostra traço.
5. Pressione Default/All para retornar todos os traços para suas configurações padrão (Traço 1 – Clear/Write, e todos os outros Blank).