



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

**MODELAGEM DE CANAL SEM FIO PARA
PLANEJAMENTO DE REDE CELULAR DE
QUARTA GERAÇÃO EM BRASÍLIA**

Paulo Rogério Zanetti

Brasília, 15 de Abril de 2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

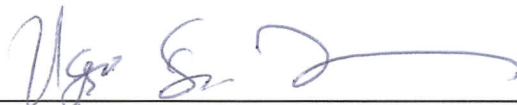
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM DE CANAL SEM FIO PARA PLANEJAMENTO DE
REDE CELULAR DE QUARTA GERAÇÃO EM BRASÍLIA

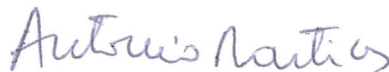
Paulo Rogério Zanetti

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONALIZANTE 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:



UGO SILVA DIAS., Dr., ENE/UNB
(ORIENTADOR)



ANTONIO JOSÉ MARTINS SOARES, Dr., ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)



ROBSON DOMINGOS VIEIRA, Dr., INST. NOKIA DE TECNOLOGIA
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília, 15 de abril de 2011.

FICHA CATALOGRÁFICA

ZANETTI, PAULO ROGÉRIO

Modelagem de Canal Sem Fio para Planejamento de Redes Celulares de Quarta Geração em Brasília. [Distrito Federal] 2011. xv, 95p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Telecomunicações 2011)

Dissertação de Mestrado.

Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

- | | |
|--------------------------|-------------------------------------|
| 1. Propagação, Modelagem | 2. LTE – <i>Long Term Evolution</i> |
| 3. OFDM, OFDMA, SC-FDMA | 4. MIMO |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ZANETTI, P. R. (2011). Modelagem de Canal Sem Fio para Planejamento de Rede Celular de Quarta Geração em Brasília. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações. Publicação PPGENE.DM - 078/2011, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Paulo Rogério Zanetti.

TÍTULO: Modelagem de Canal Sem Fio para Planejamento de Rede Celular de Quarta Geração em Brasília.

GRAU / ANO: Mestre / 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 de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Paulo Rogério Zanetti
Rua Pe. Roma 291 Ap. 701F
52050-150 Tamarineira-Recife/PE

Agradecimentos

Agradeço à minha família, minha esposa Lina e meu filho Lucas a quem muitas vezes deixei de dar atenção e me compreenderam e apoiaram durante todo este período de estudos. À minha mãe, Gilda, meu pai, Eurico que sempre me incentivaram, principalmente nos momentos difíceis, mesmo à distância. À minha sogra Iolanda e meu sogro Gomes (in memoriam) pelos seus conselhos e por sempre estarem me ajudando.

Aos professores e funcionários da Universidade de Brasília, em especial aos professores Paulo Henrique Portela e Ugo Silva Dias, meus orientadores, que sempre me incentivaram e ajudaram na caminhada até aqui e por suas críticas e sugestões ao trabalho.

Ao meu orientador da Oi, Alberto Boaventura, e ao Orlando Tadeu Ruschel, um dos patrocinadores do programa, que desde o início enriqueceram o trabalho com suas idéias e visão das necessidades da empresa.

Por fim, aos meus colegas de turma e de empresa que sempre tiveram espírito de colaboração e ajuda mútua.

Paulo Rogério Zanetti

RESUMO

O aumento do número de usuários de redes móveis é crescente no mundo todo e a demanda por serviços intrínsecos às mesmas tem impulsionado a busca por novas tecnologias que dêem retorno às necessidades da sociedade. Atualmente temos implantados na grande maioria das redes móveis ao redor do mundo os chamados sistemas de Terceira Geração (3G) e nota-se cada vez mais a aproximação dos sistemas de Quarta Geração (4G). O presente trabalho foi motivado por uma intersecção de interesses, estando por um lado a pesquisa acadêmica relativa à nova tecnologia e pelo lado comercial o ganho de um planejamento eficiente das redes 4G. O objetivo é contribuir para o planejamento em Brasília de uma nova rede LTE, que entre as várias tecnologias provavelmente será o sistema escolhido pela grande maioria das operadoras para o 4G. Mais especificamente é recomendado um processo para a definição da quantidade de estações necessárias, principalmente no seu lançamento, que tem suma importância na cobertura e, conseqüentemente, na qualidade inicial, bem como no orçamento do investimento e do plano geral de negócios.

Inicialmente são abordadas metas e definições do LTE de modo mais detalhado, apresentando o grande volume de variáveis que podem ser exploradas. Dentre elas é estudado o aspecto da cobertura, que leva ao estudo de modelos de propagação. Os modelos mais consagrados são basicamente os empíricos a partir de medições em campo e sua precisão requer dados específicos da localidade em estudo.

Foram efetuados experimentos em cinco estações em Brasília e o modelo COST-Walfisch-Ikegami sem linha de visada apresentou o menor desvio padrão em três das cinco estações. Assim, o mesmo foi utilizado como base para a modelagem, inserindo-se de um fator de adaptação referente à morfologia de Brasília. Segundo o critério objetivo de classificação, o modelo proposto pode ser considerado bom, permitindo fazer previsões de cobertura em Brasília para novos sistemas LTE com boa confiabilidade.

Em linhas gerais, a recomendação para o planejamento da nova LTE da operadora Oi em Brasília é para que utilizem a proporção de 1:1 com relação ao sistema GSM existente, garantindo com uma boa confiabilidade a mesma mancha de cobertura para seu lançamento.

Idealmente, para trabalhos futuros seria interessante a montagem de uma rede LTE experimental, com os equipamentos de transmissão com as especificações recomendadas pelo 3GPP, bem como os terminais móveis, que acoplados aos equipamentos de medição permitiria fazer um total mapeamento da interface aérea do LTE.

ABSTRACT

The increasing number of users of mobile networks is growing worldwide and the demand for services intrinsic to them has driven the search for new technologies that attend society's needs. Currently we have deployed in most mobile networks around the world the Third Generation Networks (3G) and it can be seen that the Fourth Generation Networks (4G) are closer. This work was motivated by an intersection of interests, the academic research on new technology and the commercial gain of an efficient planning of 4G networks. The objective is to contribute to the planning in Brasilia of a new LTE network which among the various technologies will likely be the system chosen by the vast majority of operators for 4G. More specifically it is recommended a process for defining the number of base stations needed, especially at launch, which has great importance in coverage and, consequently, in initial quality, as well as in the budget for investment and general business plan.

Initially we have discussed goals and definitions of LTE in more details, showing the large amount of variables that can be explored. Among them is studied the aspect of coverage, which leads to the study of propagation models. The most established models are basically empirical from field measurements and their accuracy requires data specific to the locality under study.

Experiments were performed at five stations in Brasilia and the model-COST-Walfisch-Ikegami with no line of sight had the lowest standard deviation in three of five stations. Thus, it was used as a basis for modeling, by inserting an adjustment factor on the morphology of Brasilia. According to the objective criterion of classification, the proposed model can be considered good, allowing for coverage predictions in Brasilia for new LTE systems with good reliability.

In general, the recommendation to the planning of the new LTE network for operator Oi in Brasilia is to utilize the ratio of 1:1 with respect to the existing GSM system, ensuring a good reliability with the same footprint for its release.

Ideally, for future researches would be interesting to set up an experimental LTE network, with transmission equipment according to the specifications recommended by 3GPP as well as mobile terminals, which coupled to the measuring equipment would make a complete mapping of the LTE air interface.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
LISTA DE SIGLAS	xiii
1. Introdução	1
1.1 Proposta de Trabalho	2
1.2 Estrutura da Tese	2
2. Conceitos Básicos do LTE	4
2.1 Evolução das Redes de Comunicação Sem Fio	4
2.2 Comparação com as Redes Com Fio e Perspectivas de Crescimento	10
2.3 Requisitos e Metas para o LTE	12
2.3.1 Taxa de Dados de Pico e Eficiência Espectral	15
2.3.2 Capacidade VoIP	16
2.3.3 Mobilidade	17
2.3.4 Latência	17
2.4 Aspectos de Implantação e Interoperabilidade do LTE	18
2.5 Técnicas Utilizadas	20
2.5.1 Técnica de Multiportadoras OFDMA e SC-FDMA	21
2.5.2 Técnica de Múltiplas Antenas MIMO	27
2.5.3 Interface de Rádio com Comutação por Pacotes	29
2.5.4 Características do Equipamento do Usuário	30
2.6 LTE Versão 9 e LTE Avançado	32
2.7 Arquitetura de Rede	35
2.8 Conclusões	40
3. Modelos de Propagação	41
3.1 Modelo de Okumura	41
3.2 Formulação de Hata	46

3.3	Modelo COST 231-Hata.....	47
3.4	Modelo Walfisch-Bertoni	48
3.5	Modelo de Ikegami	51
3.6	Modelo COST-Walfisch-Ikegami	52
3.7	Conclusões.....	55
4.	Montagem do Experimento de Propagação	56
4.1	Conclusões.....	60
5.	Medições de Campo e Resultados Obtidos	61
5.1	Análise da Estação 01	63
5.2	Análise da Estação 02	66
5.3	Análise da Estação 03	69
5.4	Análise da Estação 04	72
5.5	Análise da Estação 05	75
5.6	Conclusões.....	78
6.	Modelagem de Canal de Rádio e Recomendações para Planejamento de Novas Redes LTE.....	79
6.1	Aplicação do Modelo Adaptado na Estação 01.....	83
6.2	Aplicação do Modelo Adaptado na Estação 02.....	84
6.3	Aplicação do Modelo Adaptado na Estação 03.....	85
6.4	Aplicação do Modelo Adaptado na Estação 04.....	86
6.5	Aplicação do Modelo Adaptado na Estação 05.....	87
6.6	Recomendações para Planejamento dos Novos Sistemas LTE	88
6.7	Conclusões.....	90
7.	Considerações Finais e Perspectivas de Trabalhos Futuros	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Evolução dos padrões das comunicações móveis. Ref. [1] adaptado.....	6
Figura 2.2 - Evolução da taxa de pico de dados de redes com e sem fios. Ref. [3] adaptado.	10
Figura 2.3 - Utilização de Voz e Dados em HSDPA. Ref. [3] adaptado.	11
Figura 2.4 - Metas de Desempenho do LTE em relação ao HSPA V6. Ref [3] adaptado.	13
Figura 2.5 - Visão no Domínio da Frequência das Técnicas de Acesso Múltiplo do LTE. Ref. [3] adaptado.....	21
Figura 2.6 - Alocação de Recursos de OFDMA no LTE. Ref. [3] adaptado.....	23
Figura 2.7 - Transmissor e Receptor SC-FDMA com Gerador de Sinal no Domínio da Frequência. Ref. [3] adaptado.	25
Figura 2.8 - Ajuste da taxa de dados no sistema SC-FDMA. Ref. [3] adaptado.	26
Figura 2.9 - Acesso múltiplo SC-FDMA com compartilhamento de recursos e geração de sinal no domínio da frequência. Ref. [3] adaptado.....	27
Figura 2.10 - Ilustração dos 3 benefícios fundamentais das múltiplas antenas. Ref [1] adaptado.	28
Figura 2.11 - Princípio MIMO com configuração 2 x 2. Ref. [3] adaptado.	29
Figura 2.12 - Agendamento Rápido e Adaptação da Conexão. Ref. [1] adaptado.	30
Figura 2.13 - Solução com Multiportadoras para Compatibilidade entre Versões. Ref. [3] adaptado.	34
Figura 2.14 - Interfaces entre eNB e MME / GW. Ref. [2] adaptado.	36
Figura 2.15 - Arquitetura Básica da Rede LTE. Ref. [3] adaptado.	37
Figura 2.16 - Divisão Funcional entre eNB e MME / GW. Ref. [2] adaptado.	38
Figura 3.1 - Atenuação mediana básica em relação ao espaço livre em áreas urbanas e terrenos quase planos. Ref. [12] adaptado.	43
Figura 3.2 - Fator de correção em altura H_{tu} da estação rádio base. Ref. [12] adaptado.	43
Figura 3.3 - Fator de correção em altura H_{ru} da estação móvel. Ref. [12] adaptado.....	44
Figura 3.4 - Fator de correção para vários tipos de ambientes. Ref. [13] adaptado.	44
Figura 3.5 - Método de cálculo da altura efetiva da antena da estação rádio base. Ref. [12] adaptado.	45
Figura 3.6 - Geometria da difração no topo das edificações. Ref. [11] adaptado.	49
Figura 3.7 - Interpretação física do modelo. Ref. [14] adaptado.	52
Figura 3.8 - Definição da orientação da rua ϕ . Ref. [11] adaptado.	53

Figura 4.1 - Foto do Gerador de Sinais HP8648C.	57
Figura 4.2 - Esquema e foto da montagem do transmissor.....	58
Figura 4.3 - Foto e Diagrama de Radiação da Antena de Transmissão. Ref. [18].	58
Figura 4.4 - Esquema de montagem da recepção e foto do receptor.	60
Figura 5.1 - Foto da Estação 01.	63
Figura 5.2 - Instalações da Estação 01. Antena de Transmissão a 28,8m.....	63
Figura 5.3 - Morfologia da região da Estação 01.	64
Figura 5.4 – Rota das medidas da Estação 01.	64
Figura 5.5 - Gráfico com medições e modelos teóricos na Estação 01.....	65
Figura 5.6 - Foto da Estação 02.	66
Figura 5.7 - Instalações da Estação 02. Antena de Transmissão a 29,6m.....	66
Figura 5.8 - Morfologia da região da Estação 02.	67
Figura 5.9 – Rota das medidas da Estação 02.	67
Figura 5.10 - Gráfico com medições e modelos teóricos na Estação 02.....	68
Figura 5.11 - Foto da Estação 03.	69
Figura 5.12 - Instalações da Estação 03. Antena de Transmissão a 48,8m.....	69
Figura 5.13 - Morfologia da região da Estação 03.	70
Figura 5.14 – Rota das medidas da Estação 03.	70
Figura 5.15 - Gráfico com medições e modelos teóricos na Estação 03.....	71
Figura 5.16 - Foto da Estação 04.	72
Figura 5.17 - Instalações da Estação 04. Antena de Transmissão a 64,5m.....	72
Figura 5.18 - Morfologia da região da Estação 04.	73
Figura 5.19 – Rota das medidas da Estação 04.	73
Figura 5.20 - Gráfico com medições e modelos teóricos na Estação 04.....	74
Figura 5.21 - Foto da Estação 05.	75
Figura 5.22 - Instalações da Estação 05. Antena de Transmissão a 68,8m.....	75
Figura 5.23 - Morfologia da região da Estação 05.	76
Figura 5.24 – Rota das medidas da Estação 04.	76
Figura 5.25 - Gráfico com medições e modelos teóricos na Estação 05.....	77
Figura 6.1 - Curva do Fator da Frequência do modelo WfikeNL.....	81
Figura 6.2 - Gráfico com Medições e Modelo Adaptado para a Estação 01.....	84
Figura 6.3 - Gráfico com Medições e Modelo Adaptado para a Estação 02.....	85
Figura 6.4 - Gráfico com Medições e Modelo Adaptado para a Estação 03.....	86
Figura 6.5 - Gráfico com Medições e Modelo Adaptado para a Estação 04.....	87
Figura 6.6 - Gráfico com Medições e Modelo Adaptado para a Estação 05.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resumo dos principais requisitos para o LTE. Ref. [1] adaptado.	14
Tabela 2.2 - Categorias dos Terminais LTE. Ref. [1] adaptado.	32
Tabela 4.1 - Principais Parâmetros do IMT. Ref. [1] adaptado.	56
Tabela 4.2 - Dados das Estações do Experimento.	57
Tabela 4.3 - Especificações do Gerador de Sinais HP8648C. Ref. [16].	57
Tabela 4.4 - Especificações da Antena de Transmissão. Ref. [18].	58
Tabela 4.5 - Especificações da Antena de Recepção. Ref. [19].	59
Tabela 4.6 - Especificações do Analisador de Espectro FSH3. Ref. [17].	60
Tabela 5.1 - Exemplo de dados brutos coletados.	61
Tabela 5.2 - Exemplo de dados pós-processados.	62
Tabela 5.3 - Comparação de medições e modelos teóricos na Estação 01.	65
Tabela 5.4 - Comparação de medições e modelos teóricos na Estação 02.	68
Tabela 5.5 - Comparação de medições e modelos teóricos na Estação 03.	71
Tabela 5.6 - Comparação de medições e modelos teóricos na Estação 04.	74
Tabela 5.7 - Comparação de medições e modelos teóricos na Estação 05.	78
Tabela 6.1 - Análise estatística comparativa entre medições e modelos teóricos.	79
Tabela 6.2 - Análise estatística comparativa entre o modelo adaptado e a regressão linear na Estação 01.	83
Tabela 6.3 - Análise estatística comparativa entre o modelo adaptado e a regressão linear na Estação 02.	84
Tabela 6.4 - Análise estatística comparativa entre o modelo adaptado e a regressão linear na Estação 03.	85
Tabela 6.5 - Análise estatística comparativa entre o modelo adaptado e a regressão linear na Estação 04.	86
Tabela 6.6 - Análise estatística comparativa entre o modelo adaptado e a regressão linear na Estação 05.	87
Tabela 6.7 - Análise estatística comparativa entre medições e o modelo adaptado.	88

LISTA DE SÍMBOLOS

$a_{(hr)}$	-	Fator de correção para a altura da antena móvel
A_{mu}	-	Atenuação mediana
α	-	Ângulo de declividade entre a antena da ERB e os edifícios
b	-	Distâncias entre os edifícios
β	-	Fator de morfologia
d	-	Distância de rádio
Δh	-	Altura da ondulação do terreno
f, f_c	-	Frequência da portadora
$G_{\text{área}}$	-	Ganho devido ao tipo de ambiente
G_b	-	Ganho da antena da estação rádio base
G_m	-	Ganho da antena do terminal móvel
h	-	Altura média dos edifícios
h_b, h_t	-	Altura da antena da estação rádio base
h_m, h_r	-	Altura da antena do terminal móvel
h_{te}	-	Altura efetiva da antena da estação rádio base
H_{tu}	-	Fator de ganho em altura da antena da estação rádio base
h_{re}	-	Altura efetiva da antena do terminal móvel
H_{ru}	-	Fator de ganho em altura da antena da estação móvel
θ	-	Ângulo de inclinação média
K_a	-	Aumento na perda de percurso quando a antena da ERB está abaixo da altura das edificações
$K_{\text{Brasília}}$	-	Fator de adaptação referente à morfologia de Brasília
K_d	-	Perda de difração na distância
K_f	-	Perda de difração na frequência
L_{50}	-	Mediana do valor da perda de propagação
L_b	-	Perda NLOS do modelo COST-Walfisch-Ikegami
L_B, L_F	-	Perda de propagação no espaço livre
L_{bsh}	-	Perda pela altura da antena da ERB relativa às demais edificações
L_{ori}	-	Perda por orientação das ruas em relação ao percurso LOS
L_{msd}	-	Perda de difração múltipla
L_r	-	Perda de reflexão
$L_{\text{Regressão}}$	-	Perda calculada na regressão linear
L_{rts}	-	Perda por dispersão
r_e	-	Raio efetivo da Terra
ϕ, φ	-	Ângulo entre a rua e a linha direta da ERB ao terminal móvel
w	-	Largura das ruas

LISTA DE SIGLAS

<i>3GPP</i>	-	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
<i>ADSL</i>	-	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
<i>ACK</i>	-	<i>Acknowledgement</i>
<i>AM</i>	-	<i>Acknowledge Mode</i>
<i>AMPS</i>	-	<i>Analogue Mobile Phone System</i>
<i>ARQ</i>	-	<i>Automatic Repeat reQuest</i>
<i>AWGN</i>	-	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
<i>BCCH</i>	-	<i>Broadcast Control Channel</i>
<i>BCH</i>	-	<i>Broadcast Channel</i>
<i>CCCH</i>	-	<i>Common Control Channel</i>
<i>CDMA</i>	-	<i>Code Division Multiple Access</i>
<i>CHata</i>	-	<i>Modelo COST 231-Hata</i>
<i>CoMP</i>	-	<i>Coordinated Multiple Point</i>
<i>COST</i>	-	<i>Co-operative for Scientific and Technical research</i>
<i>CP</i>	-	<i>Cyclic Prefix</i>
<i>CS</i>	-	<i>Circuit Switching</i>
<i>DAB</i>	-	<i>Digital Audio Broadcasting</i>
<i>DCCH</i>	-	<i>Dedicated Control Channel</i>
<i>DFT</i>	-	<i>Discrete Fourier Transform</i>
<i>DL-SCH</i>	-	<i>Downlink Shared Channel</i>
<i>DMB</i>	-	<i>Digital Mobile Broadcasting</i>
<i>DRX</i>	-	<i>Discontinuous Reception</i>
<i>DTCH</i>	-	<i>Dedicated Traffic Channel</i>
<i>DVB</i>	-	<i>Digital Video Broadcasting</i>
<i>E-MBMS</i>	-	<i>Enhanced Multimedia Broadcast & Multicast Services</i>
<i>EDGE</i>	-	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>
<i>ELivre</i>	-	<i>Modelo Espaço Livre</i>
<i>eNB</i>	-	<i>eNode-B</i>
<i>EPC</i>	-	<i>Evolved Packet Core</i>
<i>EPS</i>	-	<i>Evolved Packet System</i>
<i>ETSI</i>	-	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
<i>E-UTRAN</i>	-	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
<i>EV-DO</i>	-	<i>Evolution Data Only</i>
<i>FDD</i>	-	<i>Frequency-Division Duplex</i>
<i>FDMA</i>	-	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
<i>FFT</i>	-	<i>Fast Fourier Transform</i>
<i>FTTH</i>	-	<i>Fiber-To-The-Home</i>
<i>GPON</i>	-	<i>Gigabit-capable Passive Optical Network</i>
<i>GPS</i>	-	<i>Global Positioning System</i>
<i>GPRS</i>	-	<i>General Packet Radio Service</i>
<i>GSM</i>	-	<i>Global System for Mobile Communications</i>
<i>GTP</i>	-	<i>GPRS Tunneling Protocol</i>
<i>GTP-U</i>	-	<i>GPRS Tunneling Protocol – User Data Tunneling</i>
<i>GW</i>	-	<i>Gateway</i>
<i>HARQ</i>	-	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
<i>Hata</i>	-	<i>Formulação de Hata</i>
<i>HSDPA</i>	-	<i>High-Speed Downlink Packet Access</i>
<i>HSPA</i>	-	<i>High-Speed Packet Access</i>
<i>HSUPA</i>	-	<i>High-Speed Uplink Packet Access</i>

<i>IDFT</i>	-	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i>
<i>IEEE</i>	-	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>IFFT</i>	-	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
<i>IMS</i>	-	<i>IP Multimedia Subsystem</i>
<i>IMT</i>	-	<i>International Mobile Telecommunications</i>
<i>IRC</i>	-	<i>Interference Rejection Combining</i>
<i>IS95</i>	-	<i>Interim Standard 95</i>
<i>ISDN</i>	-	<i>Integrated Services Digital Network</i>
<i>ITU-R</i>	-	<i>International Telecommunication Union - Radio Communication Sector</i>
<i>J-TACS</i>	-	<i>Japanese Total Access Communication System</i>
<i>LAN</i>	-	<i>Local Area Network</i>
<i>LOS</i>	-	<i>Line-Of-Sight</i>
<i>LTE</i>	-	<i>Long Term Evolution</i>
<i>MAC</i>	-	<i>Medium Access Control ou Media Access Control</i>
<i>MAN</i>	-	<i>Metropolitan Area Network</i>
<i>MBMS</i>	-	<i>Multimedia Broadcast & Multicast Services</i>
<i>MBSFN</i>	-	<i>Multicast Broadcast Single Frequency Network</i>
<i>MCCH</i>	-	<i>Multicast Control Channel</i>
<i>MCH</i>	-	<i>Multicast Channel</i>
<i>MIMO</i>	-	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
<i>MME</i>	-	<i>Mobility Management Entity</i>
<i>MTCH</i>	-	<i>Multicast Traffic Channel</i>
<i>NAK</i>	-	<i>Non-Acknowledgement</i>
<i>NAS</i>	-	<i>Non-Access Stratum</i>
<i>NGMN</i>	-	<i>Next Generation Mobile Networks</i>
<i>NMT</i>	-	<i>Nordic Mobile Telephone</i>
<i>OFDM</i>	-	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<i>OFDMA</i>	-	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access</i>
<i>P-GW</i>	-	<i>Packet Data Network Gateway</i>
<i>PAPR</i>	-	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
<i>PBCH</i>	-	<i>Physical Broadcast Channel</i>
<i>PCCH</i>	-	<i>Paging Control Channel</i>
<i>PCFICH</i>	-	<i>Physical Control Format Indicator Channel</i>
<i>PCH</i>	-	<i>Paging Channel</i>
<i>PCS</i>	-	<i>Personal Communications Systems</i>
<i>PCRF</i>	-	<i>Policy and Charging Resource Function</i>
<i>PDCCH</i>	-	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
<i>PDCP</i>	-	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
<i>PDN</i>	-	<i>Packet Data Network</i>
<i>PDSCH</i>	-	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
<i>PDU</i>	-	<i>Protocol Data Units</i>
<i>PHICH</i>	-	<i>Physical Hybrid ARQ Indicator Channel</i>
<i>PHY</i>	-	<i>Physical Layer</i>
<i>PMCH</i>	-	<i>Physical Multicast Channel</i>
<i>PMIP</i>	-	<i>Proxy Mobile IP</i>
<i>PSTN</i>	-	<i>Public Switched Telephone Network</i>
<i>QAM</i>	-	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
<i>QoS</i>	-	<i>Quality of Service</i>
<i>RF</i>	-	<i>Radio Frequency</i>
<i>RLC</i>	-	<i>Radio Link Control</i>
<i>RNC</i>	-	<i>Radio Network Controller</i>

<i>ROE</i>	-	<i>Relação de Ondas Estacionárias (VSWR)</i>
<i>ROHC</i>	-	<i>Robust Header Compression Protocol</i>
<i>RRC</i>	-	<i>Radio Resource Control</i>
<i>S-GW</i>	-	<i>Serving Gateway</i>
<i>S1-MME</i>	-	<i>S1 Control Plane Interface between eNB and MME</i>
<i>S1-U</i>	-	<i>S1 User Plane Interface</i>
<i>SAE</i>	-	<i>System Architecture Evolution</i>
<i>SAP</i>	-	<i>Service Access Point</i>
<i>SC-FDMA</i>	-	<i>Single-Carrier FDMA</i>
<i>SCTP</i>	-	<i>Stream Control Transmission Protocol</i>
<i>SON</i>	-	<i>Self-Organizing Networks</i>
<i>SU-MIMO</i>	-	<i>Single User MIMO</i>
<i>TACS</i>	-	<i>Total Access Communication System</i>
<i>TCP</i>	-	<i>Transmission Control Protocol</i>
<i>TDD</i>	-	<i>Time-Division Duplex</i>
<i>TDMA</i>	-	<i>Time Division Multiple Access</i>
<i>TISPAN</i>	-	<i>Telecommunications and Internet converged Services and Protocols for Advanced Networking</i>
<i>UDP</i>	-	<i>User Datagram Protocol</i>
<i>UE</i>	-	<i>User Equipment</i>
<i>UM</i>	-	<i>Un-acknowledge Mode</i>
<i>UMB</i>	-	<i>Ultra-Mobile Broadband</i>
<i>UMTS</i>	-	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
<i>UTRAN</i>	-	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
<i>VDSL</i>	-	<i>Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line</i>
<i>VoIP</i>	-	<i>Voice Over Internet Protocol</i>
<i>VS</i>	-	<i>Video Streaming</i>
<i>VSWR</i>	-	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>
<i>WAN</i>	-	<i>Wide Area Network</i>
<i>WCDMA</i>	-	<i>Wide-Band Code-Division Multiple Access</i>
<i>WfikeL</i>	-	<i>Modelo COST-Walfisch-Ikegami em linha de visada</i>
<i>WfikeNL</i>	-	<i>Modelo COST-Walfisch-Ikegami sem linha de visada</i>
<i>WfikeNL_Adap</i>	-	<i>Modelo COST-Walfisch-Ikegami sem linha de visada adaptado</i>
<i>WiFi</i>	-	<i>Wireless Fidelity</i>
<i>WiMAX</i>	-	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
<i>WLAN</i>	-	<i>Wireless Local Area Network</i>
<i>WRC</i>	-	<i>World Radiocommunication Conference</i>

1. INTRODUÇÃO

O aumento do número de usuários de redes móveis é crescente no mundo todo e a demanda por serviços intrínsecos às mesmas tem impulsionado a busca por novas tecnologias que dêem retorno às necessidades da sociedade. Isto explica a rápida evolução das redes móveis.

Tecnologias que resultem em maior velocidade de acesso, redução no tempo para conexão, redução no custo de rede e da sua implantação tem sido demandada por operadoras e usuários. Desta forma, pesquisadores independentes, universidades, institutos de pesquisas e fabricantes buscam novas tecnologias alinhadas com esta necessidade.

Atualmente temos implantados na grande maioria das redes móveis ao redor do mundo os chamados sistemas de Terceira Geração (3G) e nota-se cada vez mais a aproximação dos sistemas de Quarta Geração (4G). Uma nova tecnologia exige grandes investimentos por parte de todos os envolvidos no processo, sobretudo dos fabricantes e operadoras.

Neste contexto, quanto mais preciso for o planejamento, mais otimizado será o investimento e maior será a probabilidade da satisfação dos usuários, cujo anseio por tecnologia vem sempre acompanhado pelo ceticismo. Ressalta-se que um planejamento equivocado pode trazer sérios problemas para a imagem de um novo produto e a dificuldade de se reverter este processo é grande, com consequentes perdas financeiras aos investidores.

O presente trabalho foi motivado por uma intersecção de interesses, estando por um lado a pesquisa acadêmica relativa à nova tecnologia e pelo lado comercial o ganho de um planejamento eficiente das redes (ou sistemas) de Quarta Geração. Assim, uma parceria entre a UnB e a operadora Oi foi estabelecida. A empresa CelPlan® Technologies desempenhou papel fundamental com a disponibilização de suporte técnico, equipamentos e ferramentas.

O sucesso comercial das redes móveis tem despertado o interesse entre os pesquisadores de comunicação sem fio em entender e prever as características do sinal de rádio em propagação nas várias áreas, urbanas e suburbanas. Assim, é importante no planejamento do sistema se determinar a quantidade necessária das estações rádio base, bem como sua ótima localização, visando à obtenção de cobertura e de taxas de dados adequadas.

1.1 Proposta de Trabalho

O objetivo deste trabalho é contribuir para o planejamento em Brasília de uma nova rede LTE, que entre as várias tecnologias descritas provavelmente será o sistema escolhido pela grande maioria das operadoras para o 4G. Mais especificamente será recomendado um processo para a definição da quantidade de estações necessárias, principalmente no seu lançamento, que tem suma importância na cobertura e, conseqüentemente, na qualidade inicial, bem como no orçamento do investimento e do plano geral de negócios. Vale ressaltar que as estações rádio base compõem a maior parcela do custo e da dificuldade de implantação de uma nova rede.

Inicialmente serão abordadas metas e definições do LTE de modo mais detalhado, apresentando o grande volume de variáveis que podem ser exploradas. Dentre elas será estudado o aspecto da cobertura, que leva ao estudo de modelos de propagação. Os modelos mais consagrados são basicamente os empíricos a partir de medições em campo e sua precisão requer dados específicos da localidade em estudo. Como a principal contribuição deste trabalho é justamente ter um bom planejamento de cobertura, experimentos de propagação em Brasília são imprescindíveis.

1.2 Estrutura da Tese

O trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2 - apresenta os conceitos básicos do LTE, englobando a evolução das redes móveis até o estágio atual, requisitos e metas para o LTE, aspectos de implantação e interoperabilidade, bem como as técnicas utilizadas e arquitetura de rede.

-
- Capítulo 3 – descreve os modelos de propagação mais utilizados, sua base e campo de aplicações.
 - Capítulo 4 – mostra os fundamentos e como foi montado o experimento de propagação. Descreve com detalhes os componentes utilizados, as limitações encontradas e soluções aplicadas.
 - Capítulo 5 – apresenta os resultados detalhados para cada estação utilizada, como os dados coletados foram tratados e um comparativo com os modelos teóricos.
 - Capítulo 6 – detalha o desenvolvimento do modelo de propagação proposto, apresenta comparativo com os resultados obtidos e curvas estatísticas ideais. Como contribuição principal do trabalho apresenta recomendações para o planejamento de novos sistemas LTE.
 - Capítulo 7 – apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2. CONCEITOS BÁSICOS DO LTE

2.1 Evolução das Redes de Comunicação Sem Fio

Os sistemas mais antigos estavam confinados nas fronteiras dos países, atraíam um número pequeno de usuários e os aparelhos eram caros, desajeitados e de alto consumo de energia, praticamente limitando seu uso em automóveis e veículos em geral. [1]

Os primeiros sistemas de comunicação móvel a terem crescimento comercial em grande escala chegaram por volta de 1980 e ficaram conhecidos como os sistemas de Primeira Geração. Eram compostos por uma série de sistemas que usavam tecnologia analógica e foram desenvolvidos de forma independente em todo o mundo, como o Sistema Analógico de Telefonia Móvel (AMPS, do inglês *Analogue Mobile Phone System*) nos Estados Unidos e Brasil, Sistema de Comunicação de Acesso Total (TACS, do inglês *Total Access Communication System*) e Telefonia Móvel Nórdica (NMT, do inglês *Nordic Mobile Telephone*) na Europa e o Sistema de Comunicação de Acesso Total Japonês (J-TACS, do inglês *Japanese Total Access Communication System*) no Japão. [1]

O deslocamento (*roaming*) global se tornou possível com o desenvolvimento do sistema digital de Segunda Geração conhecido como GSM. O sucesso do Sistema Global para Comunicações Móveis (GSM, do inglês *Global System for Mobile Communications*) foi devido em parte ao espírito de colaboração em que ele foi desenvolvido. Ao aproveitar a experiência criativa de uma série de empresas que trabalham em conjunto sob o amparo do Instituto Europeu de Padrões para Telecomunicações (ETSI, do inglês *European Telecommunications Standards Institute*), o GSM se tornou um padrão robusto e amplamente aceito. [1]

Impulsionado pelos avanços na tecnologia de aparelhos celulares, que resultou em pequenos terminais elegantes e com uma bateria de longa duração, a aceitação generalizada do padrão GSM superou as expectativas iniciais e ajudou a criar um grande e novo mercado. A penetração resultante quase universal de celulares GSM nos países desenvolvidos acarretou em uma facilidade de comunicação nunca antes possível, primeiro pela voz e mensagens de texto, e mais tarde também por serviços mais

avançados de dados. Enquanto isso, nos países em desenvolvimento a tecnologia GSM havia começado a conectar comunidades e indivíduos em regiões remotas onde a conectividade de telefonia fixa era inexistente e seria proibitivamente cara a sua implantação. Essa disponibilidade onipresente e amigável de comunicação móvel, juntamente com o aumento da familiaridade do consumidor com essa tecnologia e sua confiabilidade, fornece o contexto para novos sistemas com características mais avançadas. [1]

Em contraste com tecnologias de transmissão tais como fios de cobre e fibras ópticas, o espectro de rádio é um meio compartilhado entre diferentes e potencialmente interferentes tecnologias [1]. Como consequência, as agências reguladoras desempenham um papel chave na evolução das tecnologias de rádio, uma vez que decidem quais as partes do espectro e quanto de banda pode ser usado por determinados tipos de serviços e tecnologia. Este papel é facilitado pela padronização de famílias de tecnologias de rádio, um processo que não só fornece interfaces especificadas para garantir a interoperabilidade entre equipamentos de uma multiplicidade de fornecedores, mas também visa garantir que o espectro atribuído é usado o mais eficientemente possível, de forma para fornecer ao usuário uma experiência atraente e serviços inovadores.

As funções complementares das agências reguladoras e os organismos de normatização podem ser resumidas de forma abrangente pela seguinte relação:

$$\text{Taxa de Dados Agregada} = \frac{\text{Banda}}{\text{(Agências Reguladoras)}} \times \frac{\text{Eficiência Espectral}}{\text{(Tecnologia e Padrões)}} [1]$$

Em uma base mundial, a União Internacional de Telecomunicações - Setor de Radiocomunicação (ITU-R, do inglês *International Telecommunication Union - Radio Communication Sector*) define famílias tecnológicas e associa partes específicas do espectro com essas famílias. Facilitado pela ITU-R o espectro de tecnologias de rádio móvel é identificado para as tecnologias de rádio que atendem às exigências da ITU-R a serem designados como membros família das Telecomunicações Móveis Internacionais (IMT, do inglês *International Mobile Telecommunications*). Efetivamente, a família IMT compreende sistemas conhecidos como a Terceira Geração, oferecendo taxas de dados acima de 2 Mbps. [1]

Sob o ponto de vista de tecnologia e normas, há atualmente três principais organizações responsáveis pelo desenvolvimento dos padrões para cumprir as exigências do IMT, e que continuam a moldar o cenário dos sistemas de rádio móvel, como mostrado na Figura 2.1.

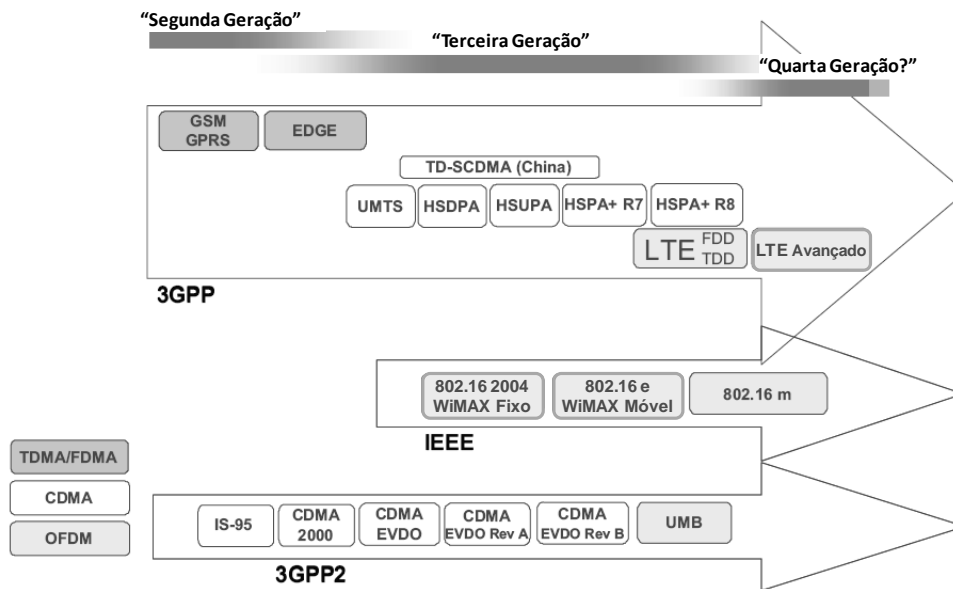


Figura 2.1 - Evolução dos padrões das comunicações móveis. Ref. [1] adaptado.

Na faixa superior da evolução mostrada na Figura 2.1 é que se desenvolveu o Projeto de Parceria de Terceira Geração (3GPP, do inglês *3rd Generation Partnership Project*) que atualmente é o grupo dominante de desenvolvimento de normas para os sistemas móveis de rádio e é descrito em detalhes a seguir.

Dentro da faixa de evolução do 3GPP, três tecnologias de acesso múltiplo são evidentes: Segunda Geração, sendo a família GSM e GPRS / EDGE (*General Packet Radio Service / Enhanced Data rates for GSM Evolution*) com base em TDMA e FDMA; a Terceira Geração, da família do Sistema Universal Móvel de Telecomunicações (UMTS, do inglês *Universal Mobile Telecommunications System*) que marcou a entrada do CDMA para o caminho da evolução no 3GPP, tornando-se conhecido como WCDMA (*Wideband CDMA*) devido a sua portadora com largura de banda de 5 MHz; e a LTE que finalmente adotou a Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM, do inglês *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), que é o acesso de tecnologia dominante nas últimas evoluções de todos os padrões de rádio móvel. [1]

Continuando o progresso da tecnologia das famílias GSM e UMTS dentro 3GPP, o sistema de Evolução a Longo Prazo (LTE, do inglês *Long Term Evolution*) pode ser visto como a conclusão da tendência de expansão da oferta de serviços além de chamadas de voz para uma interface aérea para múltiplos serviços. Isso já foi um dos principais objetivos do UMTS e GPRS/EDGE, mas o LTE foi projetado desde o início com o objetivo de evoluir a tecnologia de acesso de rádio sob o pressuposto de que todos os serviços serão de comutação de pacotes, ao invés de seguir o modelo de comutação por circuitos dos sistemas anteriores. Além disso, o LTE é acompanhado por uma evolução dos aspectos não-rádio de todo o sistema, sob o termo Sistema de Evolução da Arquitetura (SAE, do inglês: *System Architecture Evolution*), que inclui a Evolução do Núcleo por Pacotes (EPC, do inglês *Evolved Packet Core*). Juntos, LTE e SAE compõem a Evolução de Sistemas por Pacotes (EPS, do inglês *Evolved Packet System*), onde tanto o núcleo quanto o acesso via rádio são totalmente de comutação por pacotes. [1]

A padronização do LTE e SAE não significa que o desenvolvimento das outras tecnologias de acesso de rádio em 3GPP cessou. Em particular, a intensificação da UMTS com novas versões das especificações continua no 3GPP, e na medida do possível, assegurando a compatibilidade com versões anteriores: as especificações originais da Versão 99 do UMTS foram estendidas com alta velocidade no Acesso em Alta Velocidade por Pacotes no Enlace Direto e Reverso (HSDPA e HSUPA, do inglês *High-Speed Downlink Packet Access* e *High-Speed Uplink Packet Access*) na Versão 5 e na Versão 6, respectivamente, conhecidos coletivamente como HSPA. [1]

O HSPA foi melhorado na Versão 7, conhecido como HSPA+, e pela primeira vez em um sistema de comunicação celular é utilizado o sistema de antenas de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (MIMO, do inglês *Multiple Input Multiple Output*). Outras melhorias de HSPA+ estão sendo introduzidas na “Versão 8” em paralelo com a primeira versão do LTE, que por questões de coerência é também denominada Versão 8. Essas melhorias são compatíveis com versões anteriores e permitirá as operadoras de rede que têm investido fortemente na tecnologia WCDMA do UMTS a gerar novas receitas provenientes das novas funcionalidades, enquanto continua a fornecer serviços aos seus assinantes existentes utilizando os terminais legados [1].

O LTE é capaz de se beneficiar das últimas evoluções da tecnologia HSPA e HSPA +, especialmente em relação à otimização da pilha de protocolos, enquanto continua livre para adotar uma tecnologia totalmente nova sem as restrições de retro compatibilidade ou de 5 MHz de largura de banda da portadora [1]. No entanto, o LTE tem que satisfazer as novas exigências, como, por exemplo, em relação à flexibilidade do espectro, bem como operar em FDD e TDD.

O segundo caminho da evolução surgiu a partir do comitê de padrões do Instituto dos Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE, do inglês *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), o padrão denominado IEEE 802 LAN/MAN, que criou a família 802.16 como um padrão de acesso em banda larga sem fio. Esta família também é totalmente orientada por pacotes. É muitas vezes referido como Interoperabilidade Global para Acesso via Microondas (WiMAX, do inglês *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) com base em um assim chamado Sistema Perfil montado a partir do padrão 802.16 e promovido pelo Fórum WiMAX, que também garante a certificação do produto associado. Enquanto a primeira versão conhecida como 802.16-2004 era restrito ao acesso fixo, a versão seguinte 802.16e inclui suporte básico de mobilidade e por isso é muitas vezes referida como WiMAX Móvel. [1]

No entanto, pode-se notar que de modo geral a família WiMAX não foi concebida com a mesma ênfase na mobilidade e compatibilidade com o núcleo da rede como a família de tecnologias 3GPP, que inclui a evolução da rede básica, além da evolução da rede de acesso via rádio. No entanto, a última geração atualmente em desenvolvimento pelo IEEE, conhecida como 802.16m, tem objetivos similares aos aprimoramentos futuros prováveis para o LTE. [1]

Um terceiro caminho de evolução mostrado na Figura 2.1 é liderado por uma organização de parceria semelhante à 3GPP, conhecida como e 3GPP2. Baseado no padrão americano IS95 - primeiro sistema de comunicação móvel celular a utilizar a tecnologia CDMA, o CDMA 2000 - foi desenvolvido e implantado principalmente nos Estados Unidos, Japão e Coréia. A padronização em 3GPP2 continuou um caminho de evolução paralelo para sistemas orientado a dados, como o EV-DO, de certo modo a tomar um caminho semelhante ao das evoluções no 3GPP. Espelhando o LTE, a mais recente evolução 3GPP2 é um novo sistema baseado em OFDM chamado Banda Larga

Ultra Móvel (UMB, do inglês *Ultra-Mobile Broadband*), derivado em parte de um sistema proprietário conhecido como Flash OFDM. [1]

Note-se que todos os três sistemas pós 3G, sendo o WiMAX móvel, LTE e UMB atendem os requisitos do IMT e, portanto, são parte da família IMT de normas [1]. Os atributos de interface de rádio para o WiMAX móvel e UMB são muito semelhantes às daquelas da LTE. Todos os três sistemas de apoio à banda flexível, FDD / TDD, Acesso OFDM (OFDMA, do inglês *OFDM Access*) para o enlace direto e MIMO. Existem algumas diferenças entre eles, como no LTE o enlace reverso é baseado em SC-FDMA (*Single Carrier FDMA*) e no WiMAX móvel e UMB em OFDMA. O desempenho dos três sistemas, portanto, deverá ser semelhante com pequenas diferenças. [1]

Semelhante a iniciativa IMT-2000, que abriu o caminho para o 3G, a ITU-R Grupo 5D definiu requisitos para os sistemas IMT Avançado. Entre outros, estes requisitos incluem dados de enlace direto com taxas média de 100 Mbps para WAN, e de até 1 Gbps para LAN ou cenários com baixa mobilidade. [2]

A caminho dos sistemas de Quarta Geração (4G), ambos 3GPP e IEEE 802 estão desenvolvendo ativamente suas próprias normas para apresentação ao IMT Avançado. A meta para os dois LTE Avançado e IEEE 802.16m consiste em melhorar a eficiência espectral do sistema e das taxas de dados, além de suportar a compatibilidade com as respectivas versões anteriores [2]. Como parte dos padrões de evolução da LTE Avançado e IEEE 802.16 várias melhorias, incluindo suporte para uma largura de banda maior do que 20 MHz e MIMO de ordem superior, estão sendo discutidas para cumprir os requisitos da IMT Avançado [2].

O padrão geral é de uma evolução do rádio móvel para sistemas flexíveis orientados a pacotes e de múltiplos serviços. O objetivo de todos estes sistemas é no sentido de oferecer uma experiência de usuário de banda larga móvel que pode se aproximar das atuais redes de acesso fixo como ADSL / VDSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line / Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line*) e FTTH / GPON (*Fiber-To-The-Home / Gigabit-capable Passive Optical Network*). [2]

2.2 Comparação com as Redes Com Fio e Perspectivas de Crescimento

Embora as redes sem fio tenham experimentado uma evolução rápida das taxas de dados, redes de telefonia fixa ainda oferecem as maiores taxas [3]. A evolução do pico de taxa de dados do usuário, tanto em redes com e sem fio é ilustrada na Figura 2.2.

Curiosamente, a forma da curva de evolução é semelhante em ambos os domínios, com uma diferença relativa de aproximadamente 30 vezes. [3]

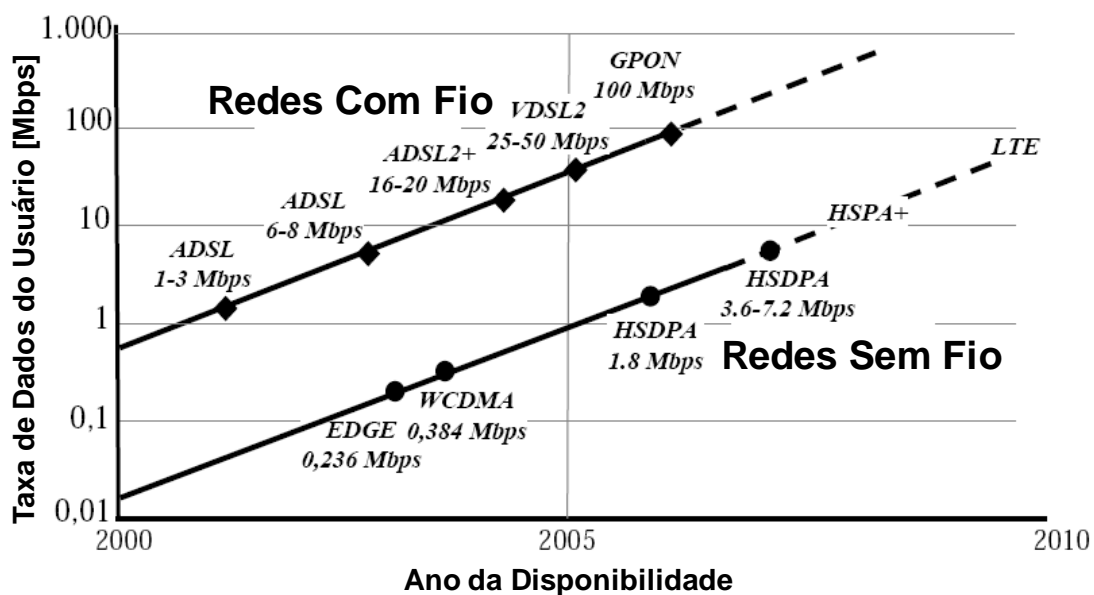


Figura 2.2 - Evolução da taxa de pico de dados de redes com e sem fios. Ref. [3] adaptado.

Atualmente, soluções a base de cobre na rede fixa com VDSL 2 pode oferecer taxas de bit de dezenas de Mbps e solução com base em fibra óptica passiva oferece taxas superiores a 100 Mbps. Tanto soluções baseadas em cobre como em fibra terão evolução da taxa de dados em um futuro próximo, aumentando a oferta de taxa de dados para Gbps.

As redes sem fio devem obter maiores taxas de dados a fim de combinar a experiência do usuário fornecida pelas redes de telefonia fixa. Quando os clientes são acostumados ao desempenho da rede fixa, esperam que a rede sem fio ofereça desempenho análogo. Os aplicativos projetados para redes de telefonia fixa antecipam a evolução das taxas de dados das redes sem fio [3].

As tecnologias sem fios, por outro lado, tem a enorme vantagem de ser capaz de oferecer acesso a banda larga pessoal independentemente da localização do usuário, a mobilidade. A solução sem fio também pode fornecer cobertura de banda larga de baixo custo em relação às novas instalações de telefonia fixa se não houver infra-estrutura existente de telefonia fixa. Portanto, o acesso banda larga sem fio é uma opção atraente, especialmente em novos mercados em crescimento nas áreas urbanas, bem como nas zonas rurais em outros mercados [3].

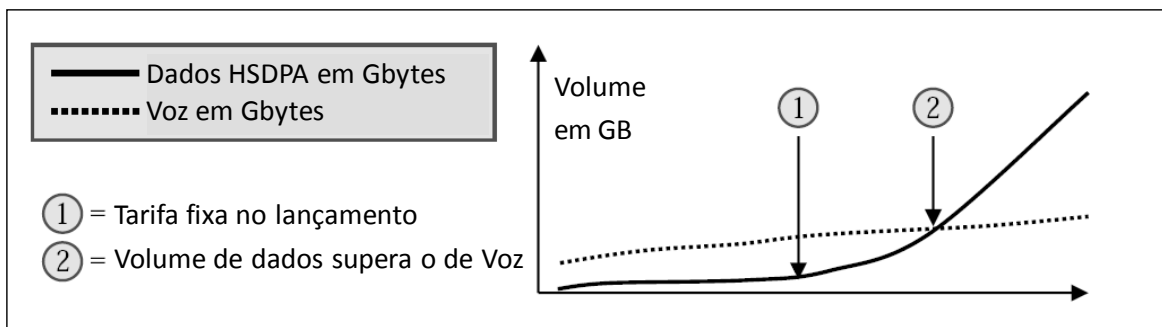


Figura 2.3 - Utilização de Voz e Dados em HSDPA. Ref. [3] adaptado.

A implantação das redes HSDPA, tem impulsionado o uso de dados consideravelmente. Tão rápido crescimento dos dados mostra que os usuários finais encontram valor no acesso à banda larga sem fio. Em muitos casos, o volume de tráfego de dados já ultrapassou o volume de tráfego de voz quando o tráfego de voz é convertido em gigabytes, assumindo uma taxa de dados de voz de 12 kbps. Um caso típico é ilustrado na Figura 2.3 que é o crescimento de dados em HSDPA desenvolvido pela característica de rádio de alta velocidade, pelos regimes de taxa fixa de preços e pela fácil instalação do dispositivo. Em suma, a introdução do HSDPA mudou as redes móveis dominadas por voz para redes de dados dominadas por pacotes. [3]

A utilização de dados é alavancada por um número de aplicações que exigem altas taxas de dados, incluindo acesso à Internet e Intranet, compartilhamento de arquivos, serviços de distribuição de conteúdo de vídeo e TV móvel, além de jogos interativos. Além disso, os pacotes de serviços de vídeo, dados e voz, também conhecida como competidor triplo (*triple play*), estão entrando no mercado de telefonia móvel em substituição da voz fixa tradicional e serviços de dados em banda larga, com serviços móveis em casa e no escritório.

Um assinante de voz típico usa 300 minutos por mês, o que equivale a cerca de 30 megabytes de dados com uma taxa de dados de voz de 12,2 Kbps. Um usuário de dados de banda larga podem facilmente consumir mais de 1.000 megabytes (1 gigabyte) de dados. O uso intenso de banda larga de dados tem capacidade de 10 a 100 vezes mais de uso da voz, que estabelece requisitos de alta capacidade e eficiência da rede de dados. [3]

Espera-se que em 2015, 5 bilhões de pessoas estarão conectadas à Internet. Ligações à Internet de banda larga estarão disponíveis em praticamente qualquer lugar do mundo. Já hoje, as instalações existentes de telefonia fixa podem chegar a aproximadamente 1 bilhão de agregados familiares e as redes móveis com mais de 3 bilhões de assinantes. Estas instalações deverão evoluir para acesso à Internet de banda larga. Além disso, o uso extensivo de acesso sem fios, bem como novas instalações de rede fixa com recursos avançados são obrigadas a oferecer conectividade de banda larga fiel aos 5 bilhões de clientes. [3]

2.3 Requisitos e Metas para o LTE

O trabalho para o LTE começou em 2004 com a definição das metas [4]. Mesmo com o HSDPA ainda não tendo sido implantado na época, tornou-se evidente que o trabalho para o sistema de rádio seguinte deveria ser iniciado [4]. Historicamente leva-se mais de cinco anos a partir da criação do sistema de metas para implantação comercial utilizando padrões de interoperabilidade [3]. Portanto, a normalização do sistema deve ser iniciada suficientemente cedo para estar pronta no momento em que houver a necessidade [3].

Discussões dos requisitos fundamentais para o novo sistema LTE levaram à criação de um “item de estudo” no 3GPP com o objetivo específico de evolução da tecnologia de acesso rádio 3GPP para garantir a competitividade ao longo de 10 anos [1]. Sob o amparo deste item, os requisitos para a LTE foram refinados, e finalizados em junho de 2005. Eles podem ser resumidos como segue:

- Redução de atrasos, tanto em termos de estabelecimento de conexão e latência de transmissão, a fim de melhorar o desempenho do usuário final;

- Aumento das taxas de dados dos usuários;
- Aumento da taxa de dados na borda da célula, para a uniformidade da prestação dos serviços;
- Reduzir o custo por bit, implicando melhora na eficiência espectral;
- Maior flexibilidade na utilização do espectro, em ambas as bandas novas e pré-existentes;
- Arquitetura de rede simplificada;
- Mobilidade total, inclusive entre diferentes tecnologias de acesso de rádio;
- Consumo de energia razoável para o terminal móvel para permitir mais o uso de aplicações multimídia sem recarregar a bateria. [1]

O LTE deve ser capaz de proporcionar um desempenho superior em comparação com a tecnologia HSPA. As metas de desempenho são definidos em relação ao HSPA “Versão 6” ou HSPA V6.

As principais metas de desempenho são mostradas na Figura 2.4 e estão listados abaixo:

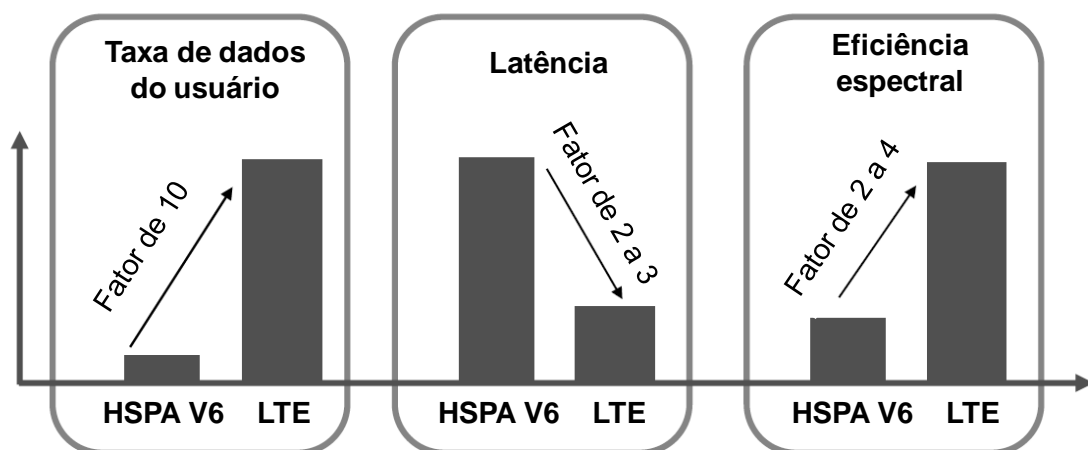


Figura 2.4 - Metas de Desempenho do LTE em relação ao HSPA V6. Ref [3] adaptado.

O melhor desempenho do sistema em relação aos sistemas existentes é um dos principais requisitos das operadoras de rede para garantir a competitividade do LTE e, portanto, para despertar o interesse do mercado [1]. Neste sentido, devem-se destacar as métricas de desempenho dos principais elementos utilizados na definição dos requisitos LTE e a sua avaliação de desempenho.

A Tabela 2.1 resume os principais requisitos de desempenho para a primeira versão do LTE. Muitas exemplificações são dados relacionados ao desempenho da versão mais avançada do UMTS, que no momento da definição dos requisitos LTE foi o HSPA V6, aqui referido como base de referência. Pode ser visto que os requisitos alvo para o LTE representam um passo significativo com a experiência do usuário e capacidade oferecida pelos sistemas móveis da Terceira Geração de comunicação que estavam sendo implantados no momento em que o LTE estava sendo desenvolvido. Os valores absolutos previstos são baseados em avaliações do desempenho do sistema de referência efetuados por fornecedores de tecnologia como parte dos estudos no 3GPP.

Tabela 2.1 - Resumo dos principais requisitos para o LTE. Ref. [1] adaptado.

Critério	Requisitos Absolutos	Comparação HSPA V6	Comentários	
Enlace Direto	Taxa de Dados de Pico	> 100 Mbps	7 × 14,4 Mbps	LTE em 20 MHz FDD, 2 × 2 multiplexação espacial. Referência: HSDPA em 5 MHz FDD, a transmissão de uma única antena
	Eficiência Espectral de Pico	> 5 bps/Hz	3 bps/Hz	
	Eficiência Espectral Média da Célula	> 1,6 – 2,1 bps/Hz/célula	3 – 4 × 0,53 bps/Hz	LTE: 2 × 2 multiplexação espacial, receptor com Rejeição de Interferência Combinada (IRC). Referência: HSDPA, receptor Rake, duas antenas receptoras
	Eficiência Espectral na Borda da Célula	> 0,04 – 0,06 bps/Hz/usuário	2-3 × 0,02 bps/Hz	Considerado 10 usuários por célula
	Eficiência Espectral de Difusão	> 1 bps/Hz	NA	Portadora dedicada para o Modo Difusão
Enlace Reverso	Taxa de Dados de Pico	> 50 Mbps	5 × 11 Mbps	LTE em 20 MHz FDD, a transmissão de uma única antena. Referência: HSUPA em 5 MHz FDD, a transmissão de uma única antena
	Eficiência Espectral de Pico	> 2,5 bps/Hz	2 bps/Hz	
	Eficiência Espectral Média da Célula	> 0,66 – 1,0 bps/Hz/cell	2 – 3 × 0,33 bps/Hz	LTE: transmissão de uma única antena, um receptor IRC. Referência: HSUPA, um receptor Rake, duas antenas receptoras
	Eficiência Espectral na Borda da Célula	> 0,02 – 0,03 bps/Hz/usuário	2 – 3 × 0,01 bps/Hz	Considerado 10 usuários por célula
Sistema	Latência no Plano do Usuário (caminho duplo)	< 10 ms	1/5	
	Latência na Conexão	< 100 ms		Estado Inativo para Ativo
	Banda de Operação	1,4 – 20 MHz	5 MHz	Requisito inicial começou em 1,25 MHz
	Capacidade VoIP	Meta NGMN > 60 sessões / MHz / célula		

Conforme mencionado, as tecnologias HSPA também continuam a ser desenvolvidas para oferecer maior eficiência espectral do que foram assumidas para o caso da “base de referência”. Vale ressaltar que o LTE tem se beneficiado ao evitar as restrições de compatibilidade com versões anteriores, permitindo a inclusão de sistemas MIMO avançados na concepção do sistema desde o início e sendo altamente flexível na utilização do espectro em torno de novos modos de acesso múltiplo. [1]

2.3.1 Taxa de Dados de Pico e Eficiência Espectral

Para fins de comercialização, o primeiro parâmetro pelo qual diferentes tecnologias de acesso de rádio são geralmente comparadas é a taxa de dados de pico por usuário que pode ser alcançada. Essa taxa em geral é proporcional ao espectro utilizado e para sistemas MIMO varia de acordo com o número mínimo de antenas de transmissão e recepção. [1]

A taxa de pico pode ser definida como a vazão máxima por usuário assumindo toda a largura de banda alocada para um único usuário com o maior esquema de codificação e modulação e o número máximo de antenas de suportadas. Dados adicionais típicos da interface de rádio (canais de controle, sinal piloto, intervalos de guarda, etc.) são estimados e contabilizados para um dado ponto na operação. Para os sistemas TDD, a taxa de pico é geralmente calculada separadamente para os enlaces direto e reverso. Isso torna possível a obtenção de um valor único, independente do enlace direto ou reverso, no modo duplex. A eficiência espectral de pico é obtida simplesmente dividindo a taxa de pico pelo espectro alocado. [1]

O LTE suporta uma ampla gama de larguras de banda (1.4/1.6/3/3.3/5/10/15/20 MHz) [4]. A maior parte do trabalho em 3GPP está focada em fornecer uma nova interface de rádio e arquitetura do sistema para atender o rápido crescimento do tráfego de dados IP, fornecendo taxas teóricas de pico acima de 100 Mbps para o enlace direto e 50 Mbps para enlace reverso [4]. Considerando-se a banda máxima de 20 MHz, corresponde à eficiência espectral de pico de 5 e 2,5 bps / Hz, respectivamente.

Contudo, não se deve restringir o projeto a oferecer taxa de pico elevadas aos usuários perto da estação rádio base. O desafio é proporcionar altas taxas de dados com boa cobertura e mobilidade, e são exatamente esses últimos aspectos que contribuem

mais fortemente para a satisfação do usuário. Um diferencial do LTE quando comparado a outros sistemas é que essas restrições foram consideradas desde o início, já na sua concepção.

O desempenho ao nível da célula é um critério importante, pois influencia diretamente no número estações rádio base e, portanto, o custo da implantação do sistema. Para o LTE foi escolhido para avaliar o desempenho a nível celular os modelos de fila cheia de tráfego. Ou seja, pressupondo que nunca há escassez de dados a transmitir se for dada a oportunidade ao usuário e uma carga do sistema relativamente alta, tipicamente de 10 usuários por célula. As exigências ao nível da célula foram definidas em termos das seguintes métricas: taxa de dados média da célula em bps/célula e eficiência espectral da célula em bps/Hz/célula; taxa de dados média por usuário em bps/usuário e eficiência espectral por usuário em bps/Hz/usuário; taxa de dados média por usuário em bps/usuário e eficiência espectral por usuário em bps/Hz/usuário ambos na borda da célula.

Nos sistemas de serviços de multimídia por difusão, tais como TV móvel, a taxa de dados do sistema é limitada ao que é possível para os usuários nas piores condições. Por conseguinte, a exigência de desempenho para a difusão foi definida em termos do limite da taxa de dados (bps) e eficiência espectral (bps/Hz) do sistema, assumindo uma cobertura de 98% da área de cobertura nominal do sistema. Isso significa que apenas 2% das localidades na área de cobertura nominal está fora de serviço, ou seja, onde os serviços de difusão têm uma taxa de perda de pacote superior a 1%. A exigência de eficiência espectral de difusão foi definida como 1 bps/Hz. [1]

2.3.2 Capacidade VoIP

Ao contrário do tráfego de fila cheia, como baixar um arquivo, que é normalmente tolerante a demora e não exige uma taxa de bits garantida, o tráfego em tempo real, como voz sobre IP (VoIP), tem restrições críticas com relação ao atraso. É importante definir requisitos de capacidade do sistema para esses serviços, que é um desafio particular em sistemas totalmente baseados em pacotes como o LTE, pois dependem de agendamento adaptativo de recursos. [1]

A exigência da capacidade do sistema é definida como o número de usuários VoIP satisfeitos, dado um modelo de tráfego e limitações específicas de atraso. Considera-se um usuário de VoIP fora de serviço, ou seja, não satisfeito, se mais de 2% dos pacotes de VoIP não chegarem com sucesso ao receptor de rádio em 50ms sendo, portanto, descartados. Isso pressupõe um conjunto de atraso ponta a ponta, entre os terminais móveis, abaixo de 200ms. A capacidade do sistema VoIP pode ser definida como o número de usuários presentes por célula, quando mais de 95% dos usuários estão satisfeitos. O grupo das operadoras de Redes Móveis de Próximas Gerações (NGMN, do inglês *Next Generation Mobile Networks*) manifestou a sua preferência para a capacidade de suportar 60 sessões de usuários VoIP satisfeitos por MHz, um aumento de 2 a 4 vezes o que normalmente pode ser alcançado no caso da referência “Versão 6”. Esta é uma área onde há espaço para o reforço do LTE para versões posteriores. [1]

2.3.3 Mobilidade

O cenário principal para a operação a velocidades altas é o uso de trens de alta velocidade, um cenário que está crescendo em importância em todo o mundo com o número de linhas ferroviárias de alta velocidade aumentando e o objetivo os operadores de trem por proporcionar um ambiente de trabalho atraente para os seus passageiros. Estes requisitos significam que a transferência (*handover*) entre células tem que ser possível sem interrupção. Em outras palavras, com atraso e perda de pacotes imperceptíveis para chamadas de voz, e com transmissão confiável de serviços de dados [1]. O suporte a mobilidade é definido com o objetivo de otimizar o desempenho para velocidades menores do que 15 km / h e obter alto desempenho para velocidades até 120 km / h, sendo que a ligação deve ser mantida para terminais com velocidades de até 350 km / h [5].

2.3.4 Latência

A latência no plano do usuário é uma importante medida de desempenho para serviços em tempo real e interativo. Na interface de rádio, a latência mínima no plano do usuário pode ser calculada com base na análise de sinalização para o caso de um sistema sem carga. É definida como o tempo médio entre a primeira transmissão de um pacote de dados e a recepção da Confirmação (ACK, do inglês *Acknowledgement*), na camada física. O cálculo deve incluir taxas típicas de retransmissão na Requisição de

Repetição Automática Híbrida (HARQ, do inglês *Hybrid Automatic Repeat Request*), como, por exemplo, de 0 a 30%. Esta definição considera, portanto, a capacidade de projeto do sistema, sem ser distorcida pelos atrasos de agendamento que iriam aparecer no caso do sistema com carga. A latência do caminho completo, ou seja, ida e volta, é obtida simplesmente multiplicando a latência no plano do usuário do caminho único pelo fator de dois. [1]

O LTE deve operar com menos de 10ms de atraso de ida e volta para o plano do usuário [6]. Ou seja, deve ser capaz de operar na camada IP com latência dos pacotes de dados no caminho único através da rede de acesso rádio abaixo de 5 ms em condições ótimas. No entanto, é reconhecido que o atraso real experimentado em um sistema real dependerá da carga do sistema e as condições de propagação de rádio. [1]

Além do requisito de latência no plano do usuário, é necessário que o atraso no estabelecimento da chamada seja significativamente reduzido quando comparado com os atuais sistemas celulares. Isto não só permite uma boa experiência do usuário, mas também afeta a duração da bateria dos terminais, desde que o projeto do sistema permita uma rápida transição de um estado inativo para um estado ativo permite que os terminais passem mais tempo no estado de baixo consumo de energia. A latência no plano do controle é medida como o tempo necessário para realizar as transições entre diferentes estados no LTE, que é baseado em apenas dois estados principais: ativo e inativo. [1]

A exigência é que o sistema LTE tenha menos de 100ms de tempo de transição para o plano de controle entre o estado inativo e estado ativo. [6]

2.4 Aspectos de Implantação e Interoperabilidade do LTE

Além do desempenho do sistema, uma série de outras considerações são importantes para as operadoras no planejamento de novas redes. Isto inclui a redução do custo de implantação, a flexibilidade do espectro e da interoperabilidade com sistemas legados, requisitos essenciais para permitir a implantação de redes LTE em uma variedade de cenários e para facilitar a migração para o LTE. [1]

O LTE deve permitir a implantação de um projeto de rádio acesso e arquitetura de rede de melhor custo-benefício, incluindo arquitetura plana composta por apenas um tipo de nó, a estação rádio base, conhecida no LTE como Nó B Evoluído (eNodeB ou eNB). Deve também ter protocolos efetivos para suportar os serviços de comutação por pacotes; interfaces abertas e suporte a interoperabilidade de equipamentos de múltiplos fornecedores; mecanismos eficientes para a operação e manutenção, incluindo funcionalidades de auto-otimização; suporte a fácil implantação e configuração como, por exemplo, para estações rádio base residenciais, também conhecidas como *femto-cells*.

O LTE pode operar em uma ampla gama de faixas de frequências e atribuição de espectro no enlace direto e reverso, variando a banda de 1,4 a 20 MHz. Esta característica é importantíssima, pois a alocação do espectro de frequência é um fator crítico para redes sem fio. Além disso, o LTE oferece suporte para operação em FDD, TDD e FDD semi duplex em um único projeto, garantindo um alto grau de compatibilidade que facilita a implementação de terminais em modo múltiplo e permite o deslocamento com abrangência mundial.

A implantação das eNB merece destaque porque tem muita influência de fatores extrínsecos, como a grande variação da propagação em cada localidade, a dificuldade da aquisição dos pontos físicos e o quase esgotamento da capacidade de infraestrutura das estações existentes.

Conforme a faixa de frequências definidas pelos órgãos reguladores para o LTE, é importantíssimo o estudo das condições de propagação para a definição da localização e quantidade de eNB necessária para que se tenha um bom nível de sinal aos usuários. Quanto mais preciso for o estudo de propagação, maior será a eficiência da alocação das eNB, permitindo-se ter uma melhor relação da cobertura pela quantidade de estações.

Com a explosão do mercado imobiliário, principalmente nas grandes cidades, a obtenção do local físico para a implantação das eNB tornou-se um grande desafio. Prefeituras e administrações locais preocupadas com a poluição visual devido ao crescente volume de torres que se proliferaram nos últimos anos criaram leis que impõem tantas limitações à localização das novas estações que torna praticamente inviável o seu licenciamento. Ainda a preocupação da população com questões ligadas a

desvalorização do imóvel e a radiação nos arredores da estação ainda dificulta mais o processo.

A restrição a novos pontos para as estações limita muito o planejamento de cobertura, pois raramente se tem o local ideal. Neste contexto as operadoras, apesar de serem concorrentes comercialmente, são obrigadas a aliar-se no compartilhamento de infraestrutura, contemplando energia e espaço físico para a instalação de equipamentos e locação de antenas na torre. Porém, a rigidez das leis, conforme citado, acaba atingindo também as estações que foram implantadas anteriormente a elas quando se tornam necessárias obras de ampliação de infraestrutura, sobretudo em torres. Ou seja, além da quase impossibilidade de implantarem-se estações em novos pontos, a infraestrutura de estações existentes tende ao esgotamento.

A interoperação flexível com outras tecnologias de acesso de rádio é essencial para a continuidade dos serviços, especialmente durante a fase de migração nas implantações iniciais do LTE com cobertura parcial, onde a transição com sistemas legados irá ocorrer muitas vezes. O LTE se baseia em uma rede evoluída de comutação por pacotes, que permite a interoperação com diversas tecnologias de acesso, em especial as tecnologias anteriores 3GPP, como GSM / EDGE e a Rede Terrestre de Acesso via Rádio do UMTS (UTRAN, do inglês UMTS *Terrestrial Radio Access Network*), bem como tecnologias não 3GPP como WiFi, CDMA2000 e WiMAX. No entanto, a continuidade dos serviços e um curto tempo de interrupção só podem ser garantidos se as medições dos sinais de outros sistemas e mecanismos rápidos de transição estiverem integrados no projeto de acesso via rádio do LTE. [1]

Uma consideração chave para a competitividade do LTE é a disponibilidade de terminais de baixo custo com longa duração de bateria, tanto em modo espera como ativo. Portanto, a baixa complexidade do terminal foi levada em conta, fato relevante em todo o sistema LTE, bem como projetar o sistema, sempre que possível, para suportar o baixo consumo de energia do terminal. [1]

2.5 Técnicas Utilizadas

O cumprimento da extensa gama de requisitos descritos só é possível graças aos avanços na tecnologia de rádio móvel. Como uma visão geral, pode-se destacar três

técnicas fundamentais que deram forma ao projeto de interface de rádio do LTE: Técnica multiportadoras, técnica de antenas múltiplas e a aplicação da comutação por pacotes na interface de rádio. Vale ainda destacar que os terminais móveis do LTE permitem combinações de capacidades, conforme suas diferentes categorias. [1]

2.5.1 Técnica de Multiportadoras OFDMA e SC-FDMA

A primeira grande escolha do projeto LTE foi adotar uma abordagem multiportadora para acesso múltiplo [1]. O estudo de viabilidade foi iniciado em março de 2005 e os principais problemas foram o acordo sobre o método de acesso múltiplo e a separação funcional da arquitetura de rede entre o acesso e o núcleo [4]. Após a consolidação das propostas iniciais, os candidatos para o enlace direto foram OFDMA e Múltiplos WCDMA, enquanto que os candidatos para o enlace reverso foram SC-FDMA, OFDMA e Múltiplos WCDMA [1]. O estudo de viabilidade sobre as alternativas de técnica UTRAN evoluída (E-UTRAN, do inglês *Evolved UTRAN*) foi concluído em Setembro de 2006, e a conclusão foi de que o OFDMA deve ser utilizado no enlace direto e o SC-FDMA no enlace reverso [4]. Ambos os métodos abriram uma nova dimensão de flexibilidade para o domínio da frequência do sistema, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 2.5.

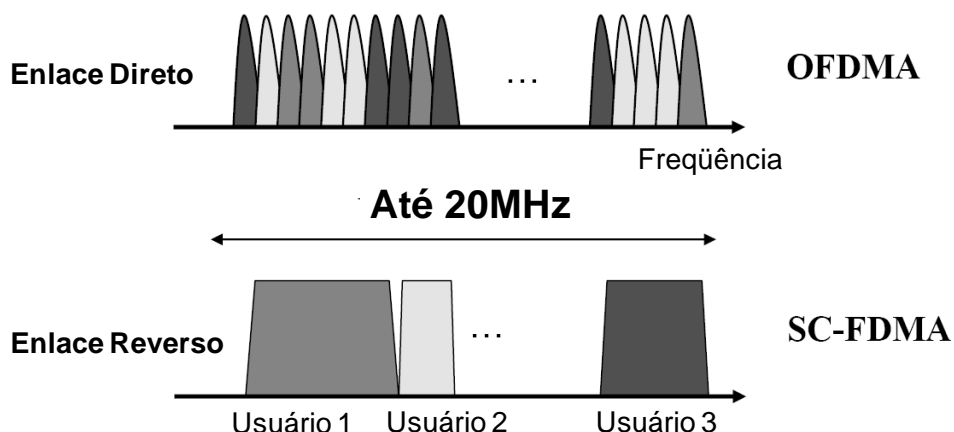


Figura 2.5 - Visão no Domínio da Frequência das Técnicas de Acesso Múltiplo do LTE. Ref. [3] adaptado.

A técnica de multiportadoras OFDMA é uma extensão do OFDM para fornecer um esquema de múltiplo acesso bastante flexível. O OFDM divide a banda disponível para transmissão de sinal em uma multidão de subportadoras de banda estreita ortogonais

entre si, que individualmente ou em grupos podem transportar fluxos independentes de informação. No OFDMA, esta subdivisão da banda disponível é explorada no compartilhamento de subportadoras entre vários usuários. [1]

A motivação geral para o OFDMA em LTE e em outros sistemas foi devido às suas propriedades, tanto que nos últimos anos a técnica OFDMA tem sido amplamente adotada em muitas áreas, como áudio digital, transmissão de vídeo (DAB, DVB e DMB) e aplicações WLAN. Essa experiência trouxe à tona algumas das principais vantagens do OFDM, que incluem:

- Ótimo desempenho em canais com desvanecimento seletivo em frequência [3]. Robustez para os canais de rádio com dispersão temporal, graças à subdivisão do sinal de banda larga transmitida em várias subportadoras de banda estreita, permitindo que a interferência inter-símbolo seja em grande parte restrita ao intervalo de guarda no início de cada símbolo [1];
- Boas propriedades espectrais [3] e suporte a várias larguras de banda que podem ser utilizadas sem alterar os parâmetros fundamentais do sistema ou o projeto do equipamento [1]. Os recursos de transmissão da banda variável podem ser atribuídos a diferentes usuários e agendados livremente no domínio da frequência [1];
- A reutilização fracionária da frequência e a coordenação da interferência entre células são facilitadas. [1]
- Receptores de baixa complexidade, através da exploração de equalização por frequências [1], e suporte a técnicas avançadas de antenas [3].

Um aspecto importante do uso do OFDMA no transmissor da estação rádio base é que aos usuários podem ser atribuídas basicamente qualquer uma das sub-portadoras no domínio da frequência. Este é um elemento adicional para a operação de agendamento com relação ao HSDPA, onde as alocações são apenas no domínio do tempo e do código, mas sempre ocupando a banda completa. A possibilidade de haver diferentes sub-portadoras para alocar usuários permite ao agendador o benefício da

diversidade no domínio da frequência, sendo esta diversidade devido à interferência momentânea e diferentes desvanecimentos nas diferentes partes da banda do sistema. Uma limitação prática é que a resolução da sinalização devido à sobrecarga fez com que a alocação não seja feita numa base individual de sub-portadora, mas baseada em blocos de recursos, cada um composto de 12 sub-portadoras, resultando em uma alocação mínima de banda de 180 kHz. Quando a respectiva resolução da alocação no domínio do tempo é de 1 ms, significa que a alocação de recursos de transmissão no enlace direto completou as reservas de recursos com blocos de 180 kHz de resolução de 1 ms, como mostrado na Figura 2.6. Vale notar que os blocos de recursos nas especificações referem-se ao intervalo de 0,5 ms [4], mas a alocação de recursos é feita de qualquer maneira com a resolução 1 ms no domínio do tempo. Este princípio de alocar recursos de forma dinâmica no domínio da frequência é comumente chamado de agendamento no domínio da frequência ou diversidade no domínio da frequência. Diferentes sub-portadoras podem, idealmente, ter diferentes modulações para que possam se adaptar ao canal sem restrições. Por razões práticas, seria muito ineficiente tentar obter medições com resolução de sub-portadora de 15kHz ou aplicar modulação individualmente a sub-portadoras. Assim, parâmetros como modulação são fixados com base nos blocos de recursos. [3]

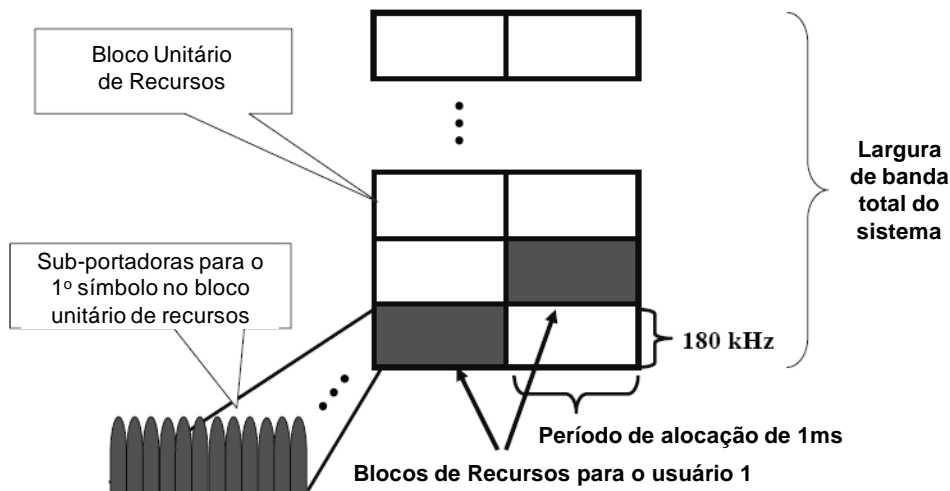


Figura 2.6 - Alocação de Recursos de OFDMA no LTE. Ref. [3] adaptado.

No enlace reverso, no entanto, o PAPR elevado do OFDM é desfavorável para o transmissor do terminal móvel, mesmo porque se deve ter um compromisso entre a potência necessária para uma boa cobertura, o consumo de energia, e o custo do amplificador de potência. O SC-FDMA, oferece uma técnica de acesso múltiplo que tem

muito em comum com OFDMA, em especial a flexibilidade no domínio da frequência, bem como a incorporação de um intervalo de guarda no início de cada símbolo transmitido para facilitar a baixa complexidade na equalização das frequências no receptor. Ao mesmo tempo, o SC-FDMA tem um PAPR significativamente menor. Por isso, resolve de certo modo o dilema de como o enlace reverso pode se beneficiar das vantagens da técnica multiportadora, evitando custos excessivos para o transmissor do terminal móvel e mantendo um razoável grau de semelhança entre as técnicas dos enlaces direto e reverso. [1]

A forma básica do SC-FDMA poderia ser vista como igual à modulação QAM, onde cada símbolo é enviado um de cada vez de forma semelhante ao TDMA, como o sistema GSM. A geração do sinal no domínio da frequência, como mostrado na Figura 2.7, acrescenta a boa propriedade espectral do OFDMA, em contraste com o gerador de sinal no domínio tempo de um modulador QAM regular. Daí pode ser evitada a necessidade de bandas de guarda entre os diferentes usuários, semelhante ao princípio do OFDMA no enlace direto.

Como no sistema OFDMA, um prefixo cíclico também é adicionado periodicamente na transmissão para evitar a interferência inter-símbolo e simplificar o projeto do receptor. Porém, o CP não é inserido depois de cada símbolo porque a taxa de símbolo é mais rápida no domínio do tempo do que no OFDMA. Então, o receptor ainda precisa lidar com a interferência inter-símbolo, porque o prefixo cíclico impede somente a interferência inter-símbolo entre um bloco de símbolos, mas ainda haverá a interferência inter-símbolo entre os prefixos cíclicos. O receptor, portanto, executará a equalização para um bloco de símbolos até chegar o prefixo cíclico que impede a propagação da interferência inter-símbolo. [3]

A transmissão ocupa a parte contínua do espectro de frequências atribuídas para o usuário, e o sistema LTE facilita a alocação da resolução de 1 ms de taxa. Quando a alocação dos recursos no domínio da frequência dobrar, dobrará a taxa de dados, assumindo o mesmo nível de sobrecarga.

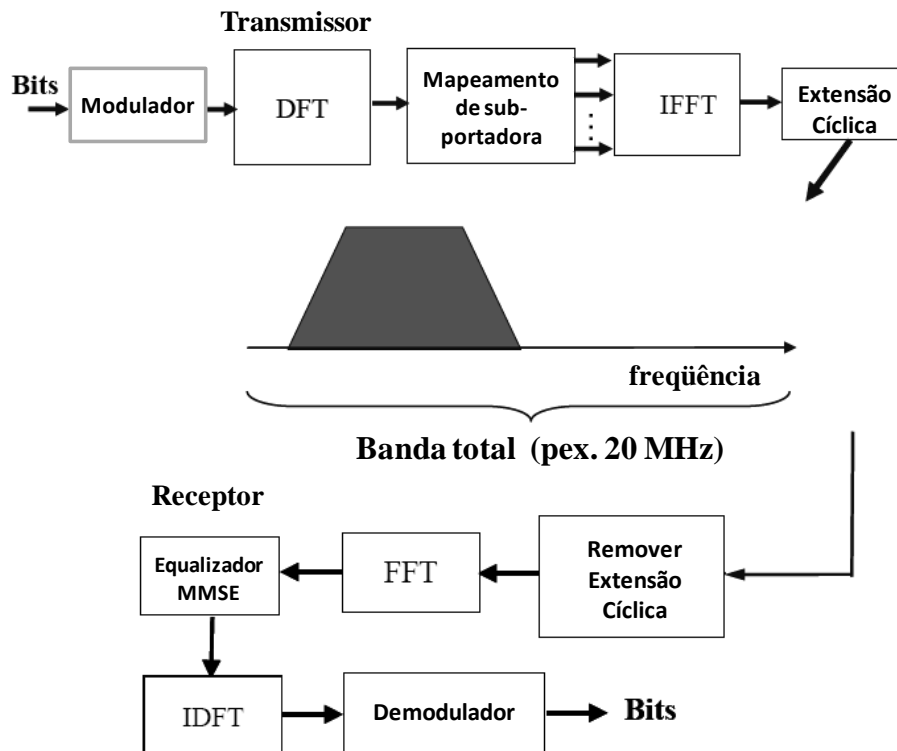


Figura 2.7 - Transmissor e Receptor SC-FDMA com Gerador de Sinal no Domínio da Frequência. Ref. [3] adaptado.

A transmissão individual com modulação torna-se menor no tempo, mas maior no domínio da frequência, como mostrado na Figura 2.8. Esse exemplo admite que em uma nova alocação sejam mantidos os recursos de frequências existentes e a mesma quantidade de espectro é adicionalmente alocada, duplicando assim a capacidade de transmissão. Na verdade, as alocações não precisam ter continuidade no domínio da frequência, mas podem pegar qualquer conjunto de recursos de alocação contínua no domínio da frequência. As restrições práticas de sinalização definem a quantidade permitida de 180 kHz de blocos de recursos que podem ser alocados. A banda máxima alocada depende da largura de banda utilizada, que pode ser de até 20 MHz. A banda máxima alocada de fato é um pouco menor que a largura de banda definida do sistema, pois inclui uma banda de guarda para a operadora vizinha. [3]

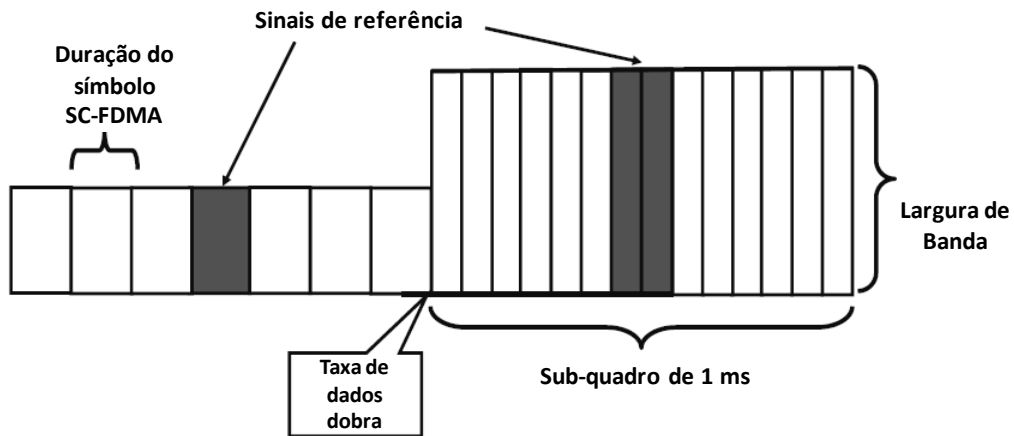


Figura 2.8 - Ajuste da taxa de dados no sistema SC-FDMA. Ref. [3] adaptado.

O bloco de recursos do SC-FDMA para a geração de sinal no domínio da frequência é definido de acordo com os mesmos valores utilizados no enlace direto OFDMA, com base no espaçamento de 15 kHz entre sub-portadoras. Assim, mesmo tendo o nome de única portadora (*single carrier*), a fase de geração de sinal utiliza o termo sub-portadora. Na forma mais simples o recurso mínimo alocado utiliza 12 sub-portadoras, ou seja, 180 kHz. Após feito o mapeamento dos recursos, o sinal é alimentado no gerador de sinais no domínio do tempo, que gera o sinal SC-FDMA, incluindo o comprimento selecionado do prefixo cíclico. Símbolos de referência estão localizados no meio do intervalo e são usados pelo receptor para realizar a estimativa de canal. Diferentes usuários, portanto, partilham os recursos no tempo, bem como na frequência. No domínio do tempo a granularidade de alocação é de 1 ms e no domínio da frequência é de 180 kHz. A estação rádio base precisa controlar cada transmissão de modo que elas não se sobreponham nos recursos. Também deve evitar longos tempos de guarda com a utilização de medições do avanço no tempo do sinal. Ao modificar as informações de entrada do IFFT, o transmissor pode posicionar a transmissão diretamente na parte desejada da frequência, como mostrado na Figura 2.9. Assim, o receptor da estação rádio base pode detectar a transmissão na frequência e no tempo correto. Como toda a utilização do enlace reverso é baseada no agendamento da estação rádio base, com exceção do canal de acesso aleatório, a estação rádio base sempre saberá qual usuário esperar em um determinado recurso. [3]

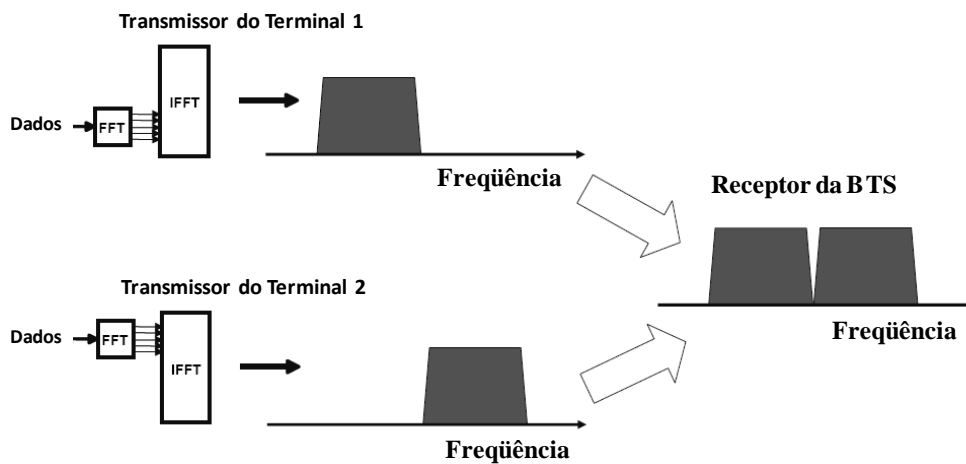


Figura 2.9 - Acesso múltiplo SC-FDMA com compartilhamento de recursos e geração de sinal no domínio da frequência. Ref. [3] adaptado.

De posse das características mencionadas do OFDMA e SC-FDMA, vale notar que durante as fases iniciais do desenvolvimento do LTE outra solução a base de multiportadora para o regime de acesso múltiplo também foi ativamente considerada, ou seja, múltiplas portadoras WCDMA. Isto teria a vantagem de reutilizar a técnica existente a partir dos sistemas estabelecidos no UMTS. No entanto, como o sistema LTE deve permanecer competitivo por muitos anos no futuro, os benefícios iniciais da reutilização da técnica do UMTS tornar-se-iam menos vantajosos em longo prazo. A continuidade da mesma técnica implicaria em perder a oportunidade de se aproveitar das novas possibilidades e se beneficiar do OFDM (OFDMA e SC-FDMA) com sua flexibilidade, baixa complexidade do receptor e alto desempenho em canais dispersos no tempo. [1]

2.5.2 Técnica de Múltiplas Antenas MIMO

O uso da técnica MIMO permite a exploração do domínio espacial como uma nova dimensão. Isto se torna essencial na busca de maior eficiência espectral. Com a utilização de múltiplas antenas a eficiência espectral teoricamente realizável gradua linearmente com o mínimo do número antenas de transmissão e recepção empregadas, pelo menos em ambientes de propagação adequados. [1]

A técnica de múltiplas antenas abre as portas para uma grande variedade de recursos, mas nem todas elas cumprem facilmente suas promessas teóricas quando se trata de aplicação em sistemas práticos. Múltiplas antenas podem ser usadas de várias

maneiras, principalmente com base em três princípios fundamentais descritos abaixo e esquematicamente ilustrados na Figura 2.10. [1]

- (a) Ganho de diversidade. Uso da diversidade espacial proporcionada pelas múltiplas antenas para melhorar a robustez da transmissão contra o desvanecimento de multipercurso.
- (b) Matriz de ganho. Concentração de energia em uma ou mais direções via pré-codificação ou via direcionamento de sinal. Isso também permite a múltiplos usuários localizados em diferentes direções serem servidos ao mesmo tempo, também chamado MIMO multiusuário.
- (c) Ganho de multiplexação espacial. A transmissão do sinal de múltiplos fluxos de um único usuário em múltiplas camadas espaciais criadas pela combinação das antenas disponíveis. [1]

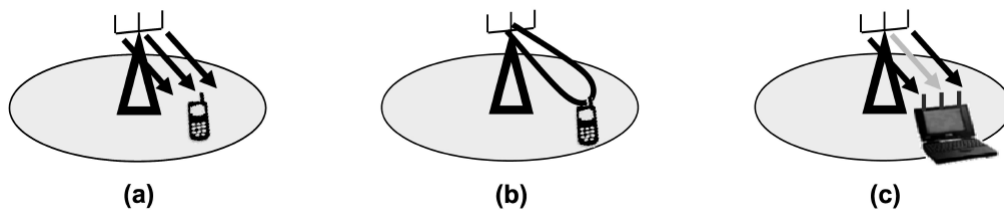


Figura 2.10 - Ilustração dos 3 benefícios fundamentais das múltiplas antenas. Ref [1] adaptado.

A natureza do OFDMA é bem adequada para a operação MIMO. Como a operação bem-sucedida do MIMO requer uma relação sinal-ruído (S/R) razoavelmente alta, o sistema OFDMA tem vantagens para obter o mais alto S/N possível, no domínio do tempo e da frequência. O princípio básico do MIMO é apresentado na Figura 2.11, onde os diferentes fluxos de dados são alimentados à operação de pré-codificação e, em seguida para o mapeamento e geração do sinal OFDMA. [3]

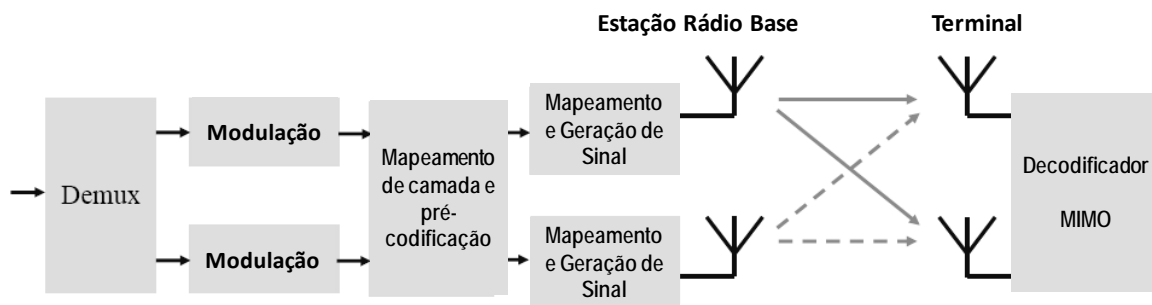


Figura 2.11 - Princípio MIMO com configuração 2 x 2. Ref. [3] adaptado.

Uma grande parte da fase “item de estudo” do LTE foi dedicada à seleção e projeto das diversas características das múltiplas antenas. O sistema final inclui várias opções complementares que permitem a adaptabilidade de acordo com as condições de propagação dos diferentes usuários. [1]

2.5.3 Interface de Rádio com Comutação por Pacotes

Conforme já informado, o LTE foi concebido como um sistema multiserviços completo orientado a pacotes, sem a dependência da comutação orientada a circuitos que era o protocolo predominante em seus antecessores. No LTE, essa filosofia é aplicada em todas as camadas da pilha de protocolo. O rumo para o agendamento rápido de pacotes através da interface de rádio já estava disponibilizado pelo HSDPA, o que permitiu a transmissão de pequenos pacotes com duração da mesma ordem de grandeza que o tempo de coerência do canal de desvanecimento rápido, como mostrado na Figura 2.12. [1]

Isto exige uma otimização conjunta da configuração da camada física e a gestão de recursos realizada pelos protocolos da camada de conexão, conforme as condições de propagação presentes. Este aspecto do HSDPA envolve uma forte ligação entre as duas camadas inferiores da pilha do protocolo, a camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC, do inglês *Medium Access Control Layer* ou *Media Access Control Layer*) e a camada física (PHY, do inglês *Physical Layer*). No HSDPA, este acoplamento já inclui recursos como medições sobre o estado do canal, adaptação dinâmica da conexão, agendamento aproveitando-se da diversidade multiusuário e dos protocolos de retransmissão rápida. [1]

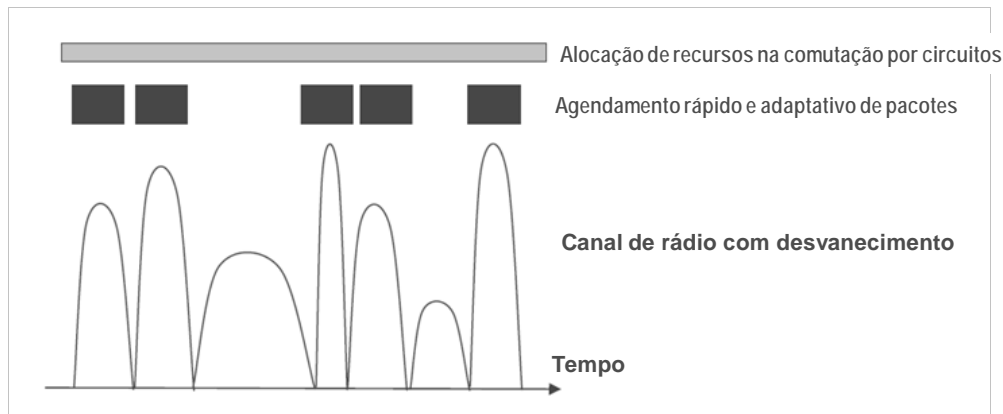


Figura 2.12 - Agendamento Rápido e Adaptação da Conexão. Ref. [1] adaptado.

No LTE, a fim de melhorar a latência do sistema, a duração do pacote foi reduzida de 2 ms usada no HSDPA para apenas 1 ms. Este curto intervalo de transmissão, juntamente com as novas dimensões da frequência e do espaço, aumentou a abrangência das técnicas de cruzamento de camadas entre a camada MAC e a física, incluindo as seguintes técnicas no LTE: [1]

- Agendamento adaptativo nas dimensões de frequência e espacial;
- Adaptação da configuração MIMO, incluindo a seleção do número de camadas espaciais transmitidas simultaneamente;
- Adaptação da conexão em termos de modulação e taxa de código, incluindo o número de códigos transmitidos;
- Vários modos de informação sobre o estado do canal. [1]

Estes diferentes níveis de otimização são combinados com um sofisticado controle de sinalização, que provou ser um dos grandes desafios para transformar o conceito do LTE em um sistema funcional. [1]

2.5.4 Características do Equipamento do Usuário

Todo o sistema LTE é construído em torno das três tecnologias fundamentais descritas, combinadas com uma nova arquitetura plana de rede. Juntas, essas

tecnologias permitem que os requisitos estabelecidos sejam cumpridos. Ao explorar essas tecnologias ao máximo, seria possível para todos os terminais LTE, conhecidos como equipamentos do usuário (UE, do inglês *User Equipment*) alcançarem um desempenho que supera as taxas de transmissão de pico e a eficiência espectral. No entanto, na prática é importante reconhecer que o mercado de UEs é grande e diversificado, e há, portanto, a necessidade que o LTE suporte uma série de categorias de UE com diferentes características para atender diferentes segmentos de mercado. [1]

Funcionalmente o UE é uma plataforma para aplicações de comunicação, que sinalizam com a rede para o estabelecimento, manutenção e terminação da comunicação relativa às necessidades do usuário final. Isso inclui funções de gerenciamento de mobilidade, tais como transições (*handover*), relatórios de localização de terminais, e nestes os UEs executam as instruções dadas pela rede. Talvez o mais importante, o UE fornece a interface de usuário para o usuário final para que aplicativos como um cliente VoIP possa ser utilizado para configurar uma chamada de voz. [3]

Em geral, cada segmento de mercado atribui prioridades aos diferentes aspectos tais como taxa de dados de pico, tamanho do UE, o custo e a duração da bateria. Algumas escolhas típicas são as seguintes:

- Suporte para taxas de dados mais altas é a chave para o sucesso de algumas aplicações, mas geralmente requer grande quantidade de memória para processamento de dados, o que aumenta o custo do UE.
- UEs que podem ser incorporados em dispositivos de grande porte como os computadores portáteis muitas vezes não são significativamente limitados em termos de consumo de energia ou no número de antenas que podem ser utilizadas. Por outro lado, outros segmentos de mercado exigem terminais de mão ultrafinos que têm pouco espaço para múltiplas antenas ou baterias grandes. [1]

Quanto maior a gama de categorias de UE suportados, mais equiparados estarão as capacidades dos UE e as exigências de um segmento específico do mercado. No entanto, o suporte a um grande número de categorias de UE também tem desvantagens em termos de sobrecarga (*overhead*) de sinalização necessária para cada UE informar a

rede sobre as suas características, bem como o aumento de custos devido à perda de economia de escala e a maior complexidade para testar a interoperabilidade de várias configurações diferentes. O sistema LTE, portanto, foi projetado para suportar um conjunto reduzido de cinco categorias de UE, que vão desde terminais relativamente de baixo custo com características semelhantes ao UMTS HSPA, até os terminais de altíssima capacidade que exploram a tecnologia LTE na sua máxima extensão possível e superam as metas de taxa de dados de pico. As capacidades das cinco categorias estão resumidas na Tabela 2.2. Pode-se observar que a maior categoria de UE LTE possui capacidade de taxa de dados de pico muito superior as metas do LTE. [1]

Tabela 2.2 - Categorias dos Terminais LTE. Ref. [1] adaptado.

	Categorias dos Terminais LTE				
	1	2	3	4	5
Taxa de Dados Máxima do Caminho Direto (Mbps)	10	50	100	150	300
Taxa de Dados Máxima do Caminho Reverso (Mbps)	5	25	50	50	75
Quantidade de Antenas de Recepção Necessárias	2	2	2	2	4
Quantidade de Fluxos <i>MIMO</i> Suportados no Caminho Direto	1	2	2	2	4
Suporte para Modulação 64 QAM no Caminho Direto	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Suporte para Modulação 64 QAM no Caminho Reverso	Não	Não	Não	Não	Sim
Necessidade Relativa de Memória para Processamento na Camada Física (normalizada para a Categoria 1)	1	4,9	4,9	7,3	14,6

2.6 LTE Versão 9 e LTE Avançado

Em paralelo ao trabalho para as correções e uma maior otimização do LTE na Versão 9, lançada em Fevereiro de 2010, o 3GPP também trata o processo do IMT Avançado no ITU-R, que está estruturando as redes sem fio de próxima geração, lançando o LTE Avançado na Versão 10. [7]

A Versão 9 se concentra em melhorias para HSPA+ e LTE. O foco para o LTE inclui:

- Características adicionais e aprimoramentos para oferecer no subsistema de multimídia IP (IMS, do inglês *IP Multimedia Subsystem*) o suporte a Serviços de Emergência. O IMS será descrito juntamente com a arquitetura do LTE;
- Sistemas comerciais de alarme móvel;

- Serviços de localização;
- Serviços de domínio CS, ou seja, voz;
- Serviços de difusão, incluindo E-MBMS;
- Melhorias nas características de auto-organização da rede (SON);
- Melhorias no direcionamento de sinal no enlace direto;
- Adaptação da taxa do codificador de voz para o LTE;
- Melhorias para suportar NodeB e eNodeB Residenciais, como, por exemplo, femtocells;
- Evolução da arquitetura IMS. [7]

A seguir estão os requisitos por parte do ITU-R para as tecnologias candidatas ao IMT Avançado:

- Suporte para taxas de dados de pico de até 1 Gbps para o caso de mobilidade reduzida e 100 Mbps para o caso de alta mobilidade;
- Suporte para bandas maiores e, portanto, o 3GPP está considerando especificar até 100 MHz de largura de banda para o LTE Avançado;
- Requisitos para a eficiência espectral mínima esperada em diferentes ambientes. [3]

O 3GPP também tem suas próprias exigências. Um dos requisitos específicos do 3GPP é a compatibilidade com versões anteriores. A exigência é definida de modo que um dispositivo baseado no LTE Versão 8 pode operar no sistema LTE Avançado e, reciprocamente, um dispositivo LTE Avançado Versão 10 pode acessar a rede LTE na Versão 8. É óbvio que um terminal Versão 9 também seria da mesma forma acomodado.

Isso poderia ser resolvido, por exemplo, com multiportadoras, como mostrado na Figura 2.13. A mobilidade entre o LTE Avançado precisa funcionar com o LTE, assim como GSM / EDGE, HSPA e CDMA2000. [3]

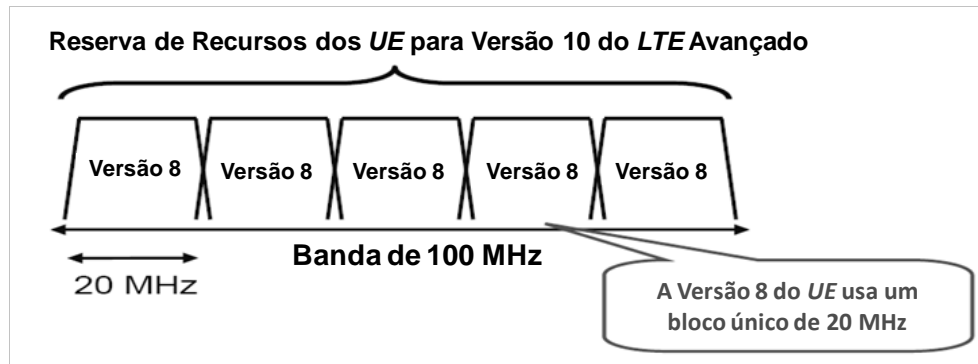


Figura 2.13 - Solução com Multiportadoras para Compatibilidade entre Versões. Ref. [3] adaptado.

O 3GPP tem mantido uma série de discussões sobre o LTE Avançado e as tecnologias a serem investigados, que incluem:

- Nós repetidores. São orientados para ampliar a cobertura, permitindo ao equipamento do usuário (UE) estar mais longe da estação rádio base para enviar seus dados através dos nós repetidores que podem receber melhor o eNodeB do que, por exemplo, um UE localizado dentro de casa;
- Solução de duas antenas no UE para Usuário Isolado MIMO (SU-MIMO, do inglês *Single User MIMO*) e diversidade MIMO no enlace reverso;
- Largura de banda escalonável superior a 20 MHz, potencialmente até 100 MHz. Estão sendo investigados aspectos relacionados à tecnologias de acesso múltiplo em sistemas com até 100 MHz de largura de banda, e prevê-se basearem-se fortemente sobre as soluções existentes para LTE com extensões maiores larguras de banda. Como ampliar a largura de banda, e como isso se reflete no acesso múltiplo, é o primeiro tema onde as conclusões são esperadas nos estudos LTE Avançado;
- Rede de área local e soluções de mobilidade;
- Utilização flexível do espectro;

- Configuração e operação da rede automática e autônoma;
- Coordenação de múltiplos pontos (CoMP) para transmissão e recepção. Refere-se à transmissão MIMO coordenada entre os diferentes transmissores, em diferentes setores ou até mesmo sites diferentes em casos extremos. [3]

2.7 Arquitetura de Rede

A arquitetura de rede do LTE é projetada com o objetivo de suportar o tráfego de comutação por pacotes com mobilidade total, Qualidade de Serviço (QoS, do inglês *Quality of Service*) e uma latência mínima. Uma abordagem de comutação por pacotes permite o suporte a todos os serviços, incluindo voz através de conexões por pacotes. O resultado em uma arquitetura plana e altamente simplificada, com apenas dois tipos de nó, ou seja, o nó B evoluído (eNB, do inglês *Evolved Node B*) e a Entidade de Gerenciamento da Mobilidade / Porta de Ligação (MME / GW, do inglês *Mobility Management Entity / Gateway*). Isto contrasta com a atual arquitetura hierárquica de rede do sistema 3G, que tem muitos mais nós de rede. [2]

Uma mudança importante é que a controladora de rádio da rede (RNC, do inglês *Radio Network Controller*) é eliminada do caminho de dados e suas funções são incorporadas pela eNB. Alguns dos benefícios de um único nó na rede de acesso são a redução da latência e a distribuição da carga de processamento da RNC nas múltiplas eNBs. A eliminação da RNC na rede de acesso foi possível em parte porque o sistema LTE não suporta a macro diversidade ou a transição suave (*soft handover*). [2]

Todas as interfaces de rede são baseadas em protocolos IP. Os eNBs são interligados por meio de uma interface denominada X2 e para a MME / GW por meio de uma interface S1, como mostrado na Figura 2.14. A interface S1 suporta um relacionamento múltiplo entre MME / GW e eNBs. [2]

A Figura 2.15 descreve os elementos da arquitetura de rede relativa a E-UTRAN. Os nós e conexões lógicas mostrados nesta figura representam a configuração da arquitetura básica do sistema. Estes elementos e funções são necessários em todos os casos em que a E-UTRAN estiver envolvida. Esta figura mostra também a divisão da arquitetura de alto nível em quatro principais domínios: UE, UTRAN Evoluída (E-UTRAN,

do inglês *Evolved UTRAN*), EPC, e no domínio dos Serviços. Os domínios de arquitetura de alto nível são funcionalmente equivalentes aos dos sistemas 3GPP existentes. O desenvolvimento da arquitetura limita-se ao acesso e ao núcleo da rede, a E-UTRAN e EPC, respectivamente. Os domínios do UE e de Serviços permanecem com a arquitetura inalterada, mas a evolução funcional continuou também nessas áreas. [3]

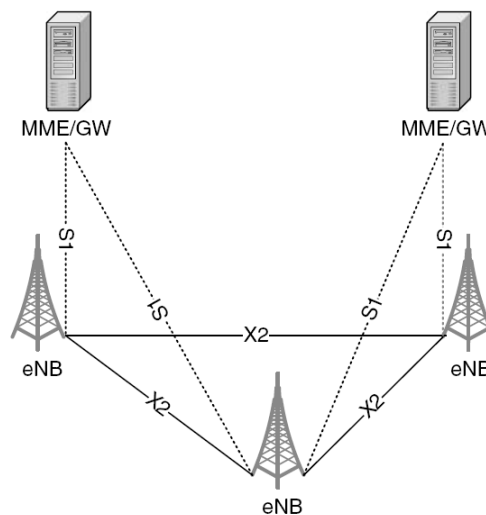


Figura 2.14 - Interfaces entre eNB e MME / GW. Ref. [2] adaptado.

UE, E-UTRAN e EPC, juntos, representam a camada de conectividade IP. Esta parte do sistema é também chamada EPS. A principal função desta camada é fornecer conectividade IP básica, e é altamente otimizada exclusivamente para esse fim. Todos os serviços serão oferecidos sobre IP. Os nós e interfaces de comutação por circuitos vistos em arquiteturas anteriores 3GPP não estão presentes na E-UTRAN e EPC. As tecnologias IP também são dominantes no transporte, onde tudo é projetado para ser operado sobre o transporte IP. [3]

O IMS é um bom exemplo de mecanismo de serviço que pode ser usado na camada de conectividade de serviços de para prestar serviços em cima da conectividade IP fornecido pelas camadas inferiores [3]. Por exemplo, para suportar o serviço de voz, o IMS pode fornecer serviços VoIP e interconexão com redes legadas comutadas por circuito como a Rede Pública de Telefonia Comutada e a Rede Digital de Serviços Integrados, através de portas de ligação (GW) de mídia que controla [3]. Neste ponto vale destacar que o IMS é uma arquitetura funcional para a entrega de serviços de multimídia IP [8]. Ele foi originalmente projetado pelo 3GPP como parte da visão para a

evolução das redes móveis além do GSM. Sua formulação original no 3GPP Versão 5 representou uma aproximação para entregar os chamados serviços de Internet através do GPRS [8]. Essa visão foi posteriormente atualizada pelo 3GPP, 3GPP2 e TISPAN, exigindo o suporte a outras redes além do GPRS, como o WLAN, CDMA2000 e telefonia fixa [4] [7].

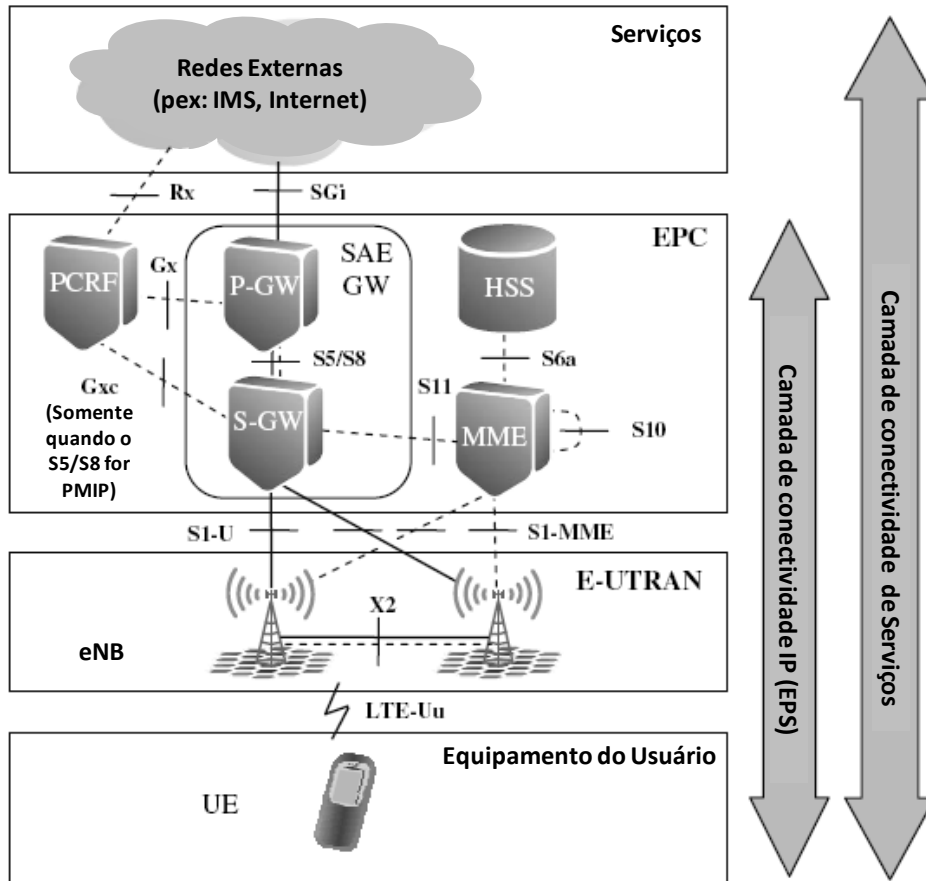


Figura 2.15 - Arquitetura Básica da Rede LTE. Ref. [3] adaptado.

O elemento chamado SAE GW representa a combinação das duas portas de ligação, S-GW e P-GW definido para a UP no tratamento do EPC. Implementá-los juntos como o GW SAE representa um cenário de implantação possível, mas as normas definem a interface entre eles, e todas as operações também foram especificados para eles serem separados. A configuração de arquitetura básica do sistema e suas funcionalidades estão documentadas no 3GPP TS 23.401. Esse documento mostra o funcionamento quando a interface S5/S8 usa o protocolo de tunelamento do GPRS (GTP, do inglês *GPRS Tunneling Protocol*). No entanto, quando a interface S5/S8 usa um Procurador Móvel IP (PMIP, do inglês *Proxy Mobile IP*), a funcionalidade destas interfaces é um pouco diferente, e a interface denominada Gxc também é necessária

entre a Função de Políticas e de Carga de Recursos (PCRF, do inglês *Policy and Charging Resource Function*) e S-GW. [3]

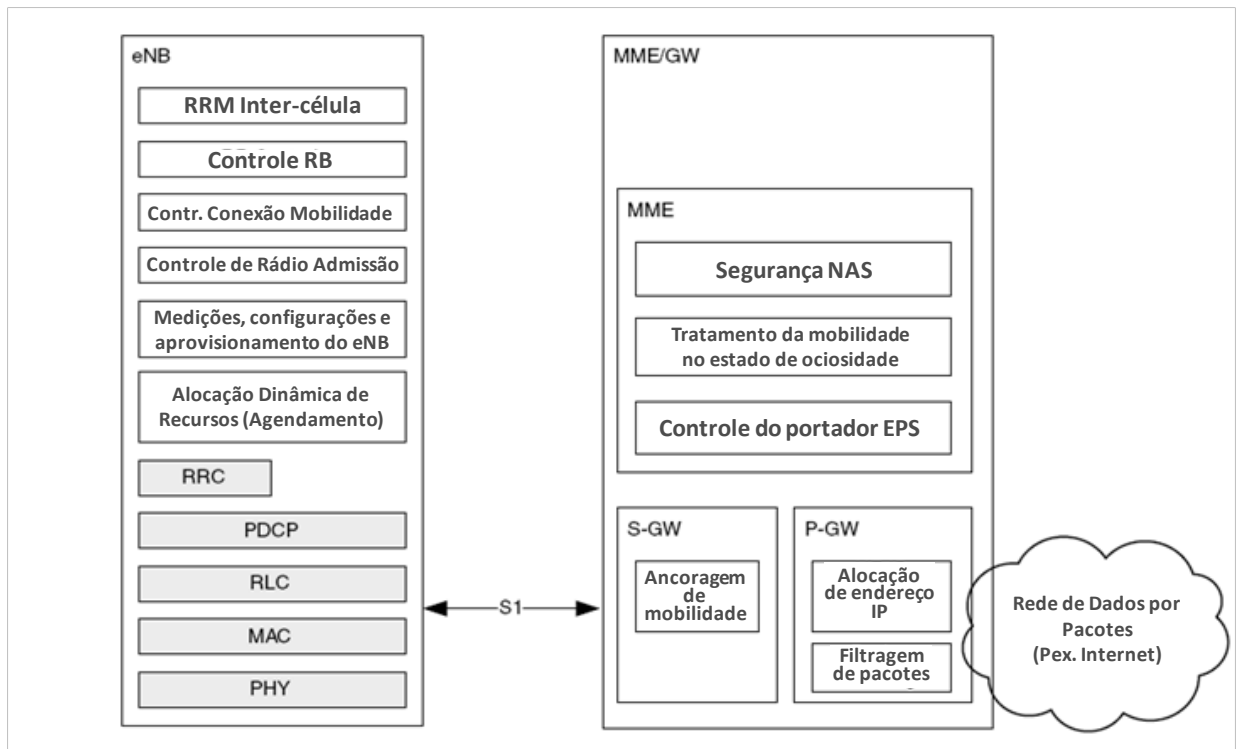


Figura 2.16 - Divisão Funcional entre eNB e MME / GW. Ref. [2] adaptado.

A separação funcional entre o eNB e MME / GW é mostrada na Figura 2.16. Define-se duas entidades lógicas denominadas Servidora da Porta de Ligação (S-GW, do inglês: *Server Gateway*) e Porta de Ligação de Pacotes de Dados (P-GW, do inglês *Packet Gateway*). A S-GW funciona como uma âncora de mobilidade local para encaminhamento e recebimento de pacotes de e para o eNB, servindo a UE. A P-GW faz interface com as Redes de Dados por Pacotes (PDN, do inglês *Packet Data Network*) externas, tais como Internet e IMS. O P-GW também desempenha várias funções IP, como a atribuição de endereços, execução de políticas, filtragem de pacotes e roteamento. [2]

O MME é o elemento principal de controle no EPC. Normalmente, o MME é um servidor em um local seguro, nas instalações da operadora. Ele só funciona no plano de controle (CP, do inglês *Control Plane*), e não está envolvida no caminho de dados do plano do usuário (UP, do inglês *User Plane*). [3]

Assim, o MME é uma entidade apenas de sinalização e, portanto, os pacotes IP do usuário não passam pelo MME. Uma das vantagens de uma entidade de rede separada para sinalização é que a capacidade da rede de sinalização e de tráfego podem crescer de forma independente. As principais funções do MME são a acessibilidade do UE em modo ocioso, incluindo o controle e execução da retransmissão da busca de terminais, gerenciamento da lista da área de busca, roaming, autenticação, autorização, escolha entre P-GW e S-GW, gerenciamento do portador (*bearer*) incluindo estabelecimento dedicado do portador, negociações de segurança e controle de acesso no protocolo NAS, etc. [2]

O único nó da E-UTRAN é o eNB, que é uma estação rádio base que está no controle de todas as funções relacionadas com rádio na parte fixa do sistema. As estações rádio base, tais como o eNB são normalmente distribuídas em toda a área de cobertura da rede e ficam próximas das antenas. [3]

O eNB executa as funções do Node-B, bem como protocolos aplicados tradicionalmente na RNC. As principais funções do eNB são compressão de cabeçalho, criptografia e entrega confiável dos pacotes. No lado controle, o eNB incorpora funções como controle de admissão e gerenciamento dos recursos de rádio. Conforme informado, alguns dos benefícios de um único nó na rede de acesso são a redução da latência e a distribuição de carga de processamento da RNC entre múltiplas eNBs. [2]

Na configuração básica arquitetura do sistema, a função de alto nível da S-GW é a gestão do túnel UP de e comutação. A S-GW é parte da infra-estrutura de rede e é mantido centralmente nas instalações da operadora. Quando a interface é baseada no GTP S5/S8, a S-GW terá túneis GTP em todas as suas interfaces UP. O mapeamento entre fluxos de serviços IP e túneis GTP é feito na P-GW, e o S-GW não precisa ser conectado a PCRF. Todo o controle está relacionado aos túneis GTP, e é proveniente do MME ou P-GW. Quando a interface S5/S8 usa o PMIP, o S-GW irá realizar o mapeamento entre os fluxos de serviço IP no S5/S8 e os túneis na interface GTP S1 do plano do usuário (S1-U) e irá conectar a PCRF para receber as informações de mapeamento. O S-GW tem um papel bem menor em funções de controle. Ele só é responsável por seus próprios recursos, e atribuí-los com base nas solicitações do MME, P-GW ou PCRF, que por sua vez agem sobre a necessidade de criar, modificar ou apagar os portadores dos UE. [2]

2.8 Conclusões

Para atender as metas do LTE, sobretudo o aumento da taxa de transmissão, redução de latência e eficiência espectral, foram propostas técnicas de múltiplo acesso baseadas em OFDM e MIMO, com arquitetura de rede simplificada e totalmente IP. A quantidade de eNB em uma rede necessárias para prover cobertura com boa qualidade e possibilitar o atendimento a estas metas está diretamente ligada às condições de propagação locais.

3. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

O planejamento celular é baseado na cobertura de sinal e no tráfego. A cobertura de sinal pode ser prevista pelos modelos de predição de cobertura e geralmente é aplicado no início do sistema.

Uma vez que existe a expectativa dos sistemas LTE serem implantados na prática e em larga escala a partir de 2012, as análises de cobertura e conseqüentemente de propagação tornam-se particularmente importantes. A tarefa é cobrir toda a área com um número mínimo de estações rádio base. Devido ao fato da cobertura de 100% da área não ser possível, as células devem ser planejadas de modo que as falhas de cobertura sejam localizadas em locais sem tráfego. [9]

O modelo de predição é na verdade ponto a ponto e os resultados gerados serão diferentes dependendo da área de serviço utilizada em que se deve analisar a existência dos seguintes ambientes: áreas com algumas construções, abertas, suburbanas, urbanas; terrenos planos, acidentados, com água e com vegetações. Existem muitos modelos de predição na literatura e um modelo é considerado bom quando 68% dos valores previstos estão dentro de um desvio padrão máximo na faixa de 6 a 8 dB quando comparado com os valores medidos. [9]

Pode-se afirmar que nenhum modelo atende todos os ambientes e assim uma avaliação cuidadosa é necessária [11]. Para esta pesquisa serão abordados os modelos mais utilizados e reconhecidamente mais eficientes para macro células, com as variações de região, como densa, urbana, suburbanas, bem como as demais características morfológicas. Experimentos de campo na localidade alvo do projeto aliam-se a estes modelos para que se tenha maior precisão no estudo da propagação e conseqüentemente no planejamento da cobertura das estações.

3.1 Modelo de Okumura

O modelo de Okumura é baseado em uma extensa série de medições feitas em Tóquio, em 1960, entre 200 e 1920 MHz. Okumura publicou um método de predição empírico para a predição do sinal. Ou seja, baseando-se unicamente nos dados medidos. As predições de perda de percurso são feitas com base em gráficos a partir

dos seus resultados, com diferentes fatores de correção aplicados para alguns parâmetros. [11] [12]

Este modelo é um dos mais amplamente utilizados para a predição de sinal em áreas urbanas. Conforme os testes é aplicável para frequências até 1920 MHz, embora seja tipicamente extrapolado até 3 GHz, e distâncias de 1 a 100 Km. Pode ser utilizado para altura das antenas da estação rádio base de 30 a 1000 m. [13]

A base do método é que a perda de espaço livre entre os pontos de interesse seja determinada e adicionada ao valor de $A_{mu}(f, d)$, obtidos a partir da Figura 3.1. A_{mu} é a atenuação mediana em relação ao espaço livre em uma área urbana e em terrenos quase planos (intervalo interdecílico menor do que 20 m), com altura efetiva da antena h_{te} da estação rádio base de 200 metros e uma altura da antena móvel h_{re} de 3 m. É expresso em uma função da frequência, de 100 a 3.000 MHz, e distância da estação rádio base de 1 a 100 km. Os fatores de correção têm de ser introduzidos para contabilizar antenas com alturas diferentes da referência. [11]

A fórmula básica pode ser expressa como: [11]

$$L_{50}(\text{dB}) = L_F + A_{mu} - H_{tu} - H_{ru} + G_{\text{área}} ; \quad (5.1)$$

em que:

- L_F é a perda de propagação no espaço livre;
- H_{tu} é o fator de ganho em altura da antena da estação rádio base, mostrado na Figura 3.2, como função da altura efetiva da antena da estação radio base e da distância;
- H_{ru} é o fator de ganho em altura da antena da estação móvel, como mostrado na Figura 3.3. $G_{\text{área}}$ é o ganho devido ao tipo de ambiente, como mostrado na Figura 3.4;
- H_{tu} é da ordem de 20 dB por década, ou seja, a potência recebida é proporcional a h_{te}^2 ;

- H_{ru} varia em 10 dB por década se h_{re} for menor do que 3m, que é a condição das estações móveis atualmente. [11] [13]

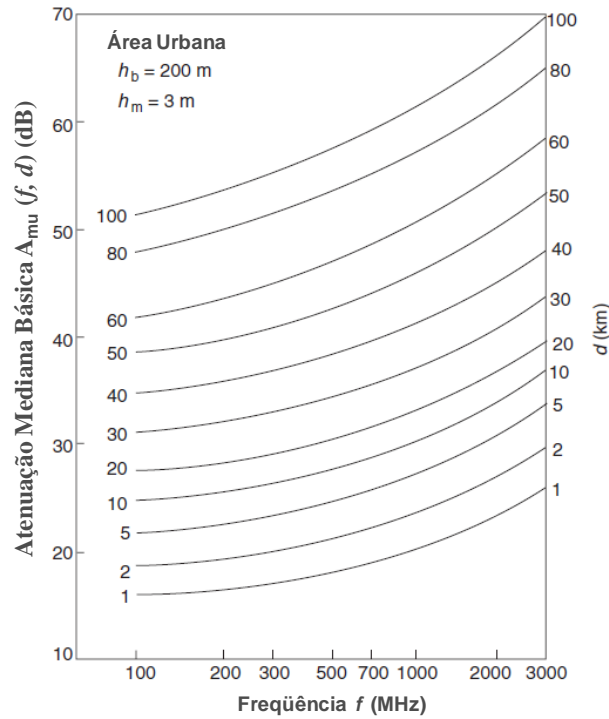


Figura 3.1 - Atenuação mediana básica em relação ao espaço livre em áreas urbanas e terrenos quase planos. Ref. [12] adaptado.

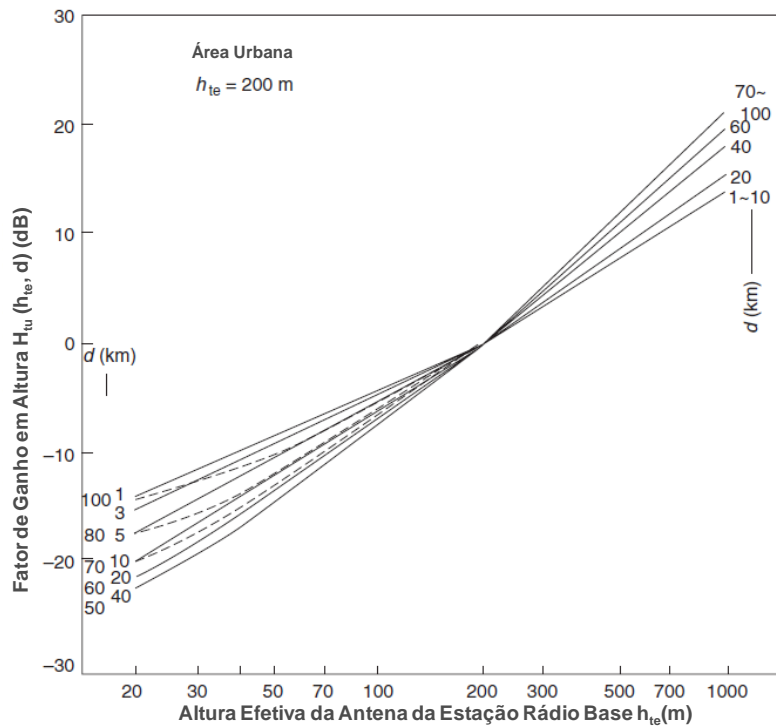


Figura 3.2 - Fator de correção em altura H_{tu} da estação rádio base. Ref. [12] adaptado.

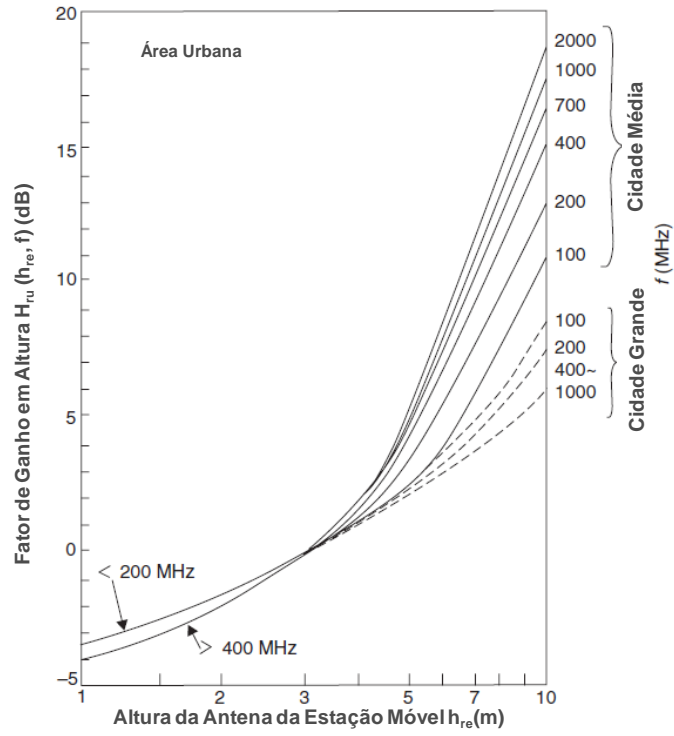


Figura 3.3 - Fator de correção em altura H_{ru} da estação móvel. Ref. [12] adaptado.

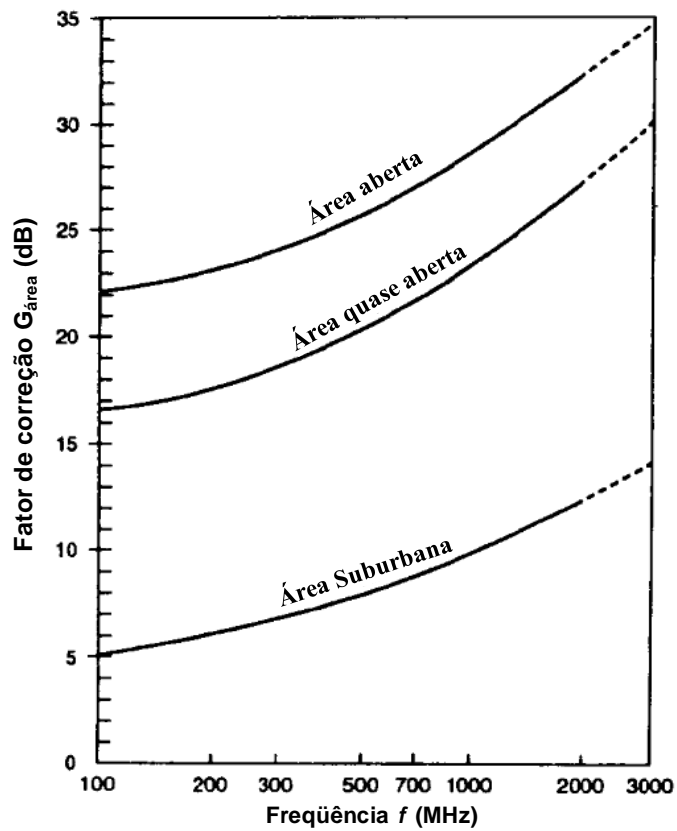


Figura 3.4 - Fator de correção para vários tipos de ambientes. Ref. [13] adaptado.

O terreno irregular é subdividido em montanhoso, montanha isolada, em declive e mesclado de terra e mar. Os parâmetros relacionados com o terreno que devem ser avaliados para determinar os fatores de correção diversos são os seguintes:

- Altura efetiva da antena da estação rádio base (h_{te}): é a altura da antena da estação acima do nível do médio do solo, calculado sobre o intervalo de 3 a 15 km, ou menos, se o intervalo for inferior a 15 km em direção ao receptor, conforme Figura 3.5.
- Altura da ondulação do terreno (Δh): é o parâmetro irregularidade do terreno, definido como a altura interdecílica a uma distância de 10 km a partir do receptor em direção ao transmissor.
- Altura do pico isolado: se o caminho de propagação inclui uma única montanha como obstrução, sua altura é medida em relação ao nível médio do solo entre ela e a estação rádio base.
- Inclinação média: se o solo é inclinado, o ângulo θ , positivo ou negativo, é medido ao longo 5 a 10 km.
- Parâmetro de mescla terra e mar: é o percentual do comprimento total do caminho coberto pela água. [11]

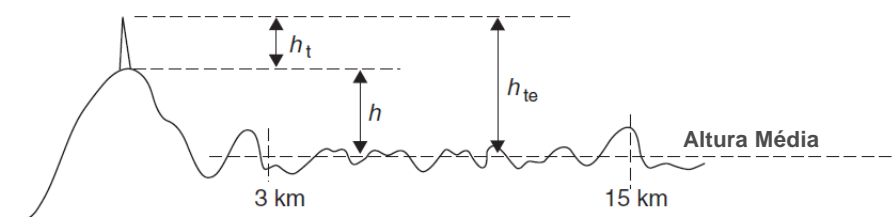


Figura 3.5 - Método de cálculo da altura efetiva da antena da estação rádio base. Ref. [12] adaptado.

O modelo de Okumura é muito prático e é considerado um dos mais simples e melhor em termos de precisão na predição de perdas de propagação para sistemas celulares maduros e de rádio móvel terrestre em ambientes desordenados. Os desvios-padrão comuns entre os valores de perda de propagação preditos e medidos estão entre 10 dB e 14 dB. [13]

A desvantagem do modelo é a lenta resposta às mudanças bruscas de terreno, sendo razoavelmente bom na área urbana e suburbana, mas não é tão bom em áreas rurais [13]. Na prática, a técnica de Okumura produz predições que se correlacionam razoavelmente bem com as medições, embora, pela sua natureza, tenda a média em algumas situações extremas [11].

3.2 Formulação de Hata

Na tentativa de tornar o método de Okumura fácil de aplicar, Hata estabeleceu relações matemáticas empíricas para descrever a informação dada pelo gráfico de Okumura. A formulação de Hata, que também chamado de modelo de Okumura-Hata, é limitada a determinadas faixas de parâmetros de entrada e só é aplicável em terreno quase liso. As expressões matemáticas e suas faixas de aplicação são os seguintes: [11]

- Para áreas urbanas:

$$L_{50}(\text{dB}) = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_t - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log h_t) \log d ;$$

com

$$\begin{aligned} 150 \leq f_c \leq 1500 \text{ (} f_c \text{ em MHz);} \\ 30 \leq h_t \leq 200 \text{ (} h_t \text{ em m);} \\ 1 \leq d \leq 20 \text{ (} d \text{ em km);} \end{aligned} \quad (5.2)$$

e $a(h_r)$ representa o fator de correção para a altura da antena móvel e é calculado da seguinte forma:

- Para cidades pequenas ou médias:

$$a(h_r) = (1,1 \log f_c - 0,7) h_r - (1,56 \log f_c - 0,8); \quad (5.3)$$

com

$$1 \leq h_r \leq 10 \text{ m}$$

- Para cidades grandes:

$$a(h_r) = \begin{cases} 8,29 (\log 1,54 h_r)^2 - 1,1 & f \leq 200 \text{ MHz} \\ 3,2 (\log 11,75 h_r)^2 - 4,97 & f \geq 400 \text{ MHz} \end{cases} \quad (5.4)$$

- Para áreas suburbanas:

$$L_{50}(\text{dB}) = L_{50}(\text{urbana}) - 2 [\log (f_c/28)]^2 - 5,4; \quad (5.5)$$

- Para áreas abertas:

$$L_{50}(\text{dB}) = L_{50}(\text{urbana}) - 4,78 (\log f_c)^2 + 18,33 \log f_c - 40,94; \quad (5.6)$$

- Para áreas quase abertas:

$$L_{50}(\text{dB}) = L_{50}(\text{abertas}) + 5. \quad (5.7)$$

A formulação de Hata torna o modelo de Okumura muito mais fácil de usar e é geralmente a forma como o modelo de Okumura é aplicada [12]. As expressões de Hata são muito fáceis de inserir em um computador [11]. Essas expressões têm melhorado consideravelmente o valor prático do método de Okumura, apesar das formulações de Hata não incluírem nenhuma das correções de perda específicas disponíveis no modelo original [11] [13]. As predições dadas por estas equações são muito próximas com os resultados obtidos a partir das curvas originais, desde que a distância seja superior a 1 km [13]. Este modelo é adequado para sistemas de grandes células móveis, mas não para sistemas de comunicações pessoais (PCS, do inglês *Personal Communications Systems*), que têm células na ordem de 1 km de raio [13].

3.3 Modelo COST 231-Hata

A cooperativa europeia para a pesquisa científica e técnica (EuroCOST, do inglês *European Co-operative for Scientific and Technical Research*) formaram a comissão de trabalho COST-231 para desenvolver uma versão estendida do modelo de Hata [13]. O modelo COST 231-Hata, às vezes chamado de modelo de extensão para PCS de Hata, é uma versão melhorada do modelo de Hata, que inclui as frequências de 1800 a 1900 MHz [12]. Embora os dados de Okumura estendam a 1920 MHz, o modelo de Hata é válido apenas entre 150 e 1500 MHz [12]. No entanto, no âmbito do programa europeu COST-231 as curvas de Okumura foram analisadas na faixa de frequência superior, e um modelo estendido foi produzido [11]. O modelo COST 231-Hata é válido entre 1500 e 2000 MHz [12].

A mediana da perda de propagação do modelo COST 231-Hata é dada por: [12]

$$L_{50}(\text{dB}) = 46,3 + 33,9 \log f_c - 13,82 \log h_t - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log h_t) \log d + C; \quad (5.8)$$

em que:

$C = 0$ dB para cidades médias ou centros suburbanos com densidade média de árvores.

$C = 3$ dB para áreas metropolitanas.

Esta equação é válida para os mesmos intervalos de valores de h_t , h_r e d de Hata, mas a faixa de frequência é agora de 1500 a 2000 MHz. A aplicação deste modelo é restrita a macrocélulas onde a antena da estação rádio base está acima do nível dos edifícios adjacentes. Nem o original e nem os modelos estendidos são aplicáveis ao microcélulas, onde a altura da antena está abaixo. [11]

Hata e COST 231-Hata são base para a maior parte das ferramentas comerciais de planejamento de RF para telefonia móvel. [12]

3.4 Modelo Walfisch-Bertoni

Walfisch e Bertoni apontaram que, embora as medições demonstrassem que em terreno quase plano a perda média de propagação é proporcional a $(\text{percurso})^n$, em que n está entre 3 e 4, a influência de parâmetros como altura dos edifícios ou a largura das ruas são mal compreendidos e muitas vezes são contabilizados por fatores de correção adicionais. Assim, foi desenvolvido um modelo teórico baseado na geometria do percurso, mostrado na Figura 3.6. O principal percurso até o terminal móvel está ao longo do topo dos edifícios nos arredores, sendo mais importantes os edifícios mais próximos ao terminal móvel, mostrado no percurso 1. Apesar do campo no ponto de recepção ter domínio total de componentes devido a múltiplas reflexões e difrações (percurso 4) e da penetração em construções (percurso 3), existem outros mecanismos de propagação possíveis, mas são geralmente insignificantes. [11]

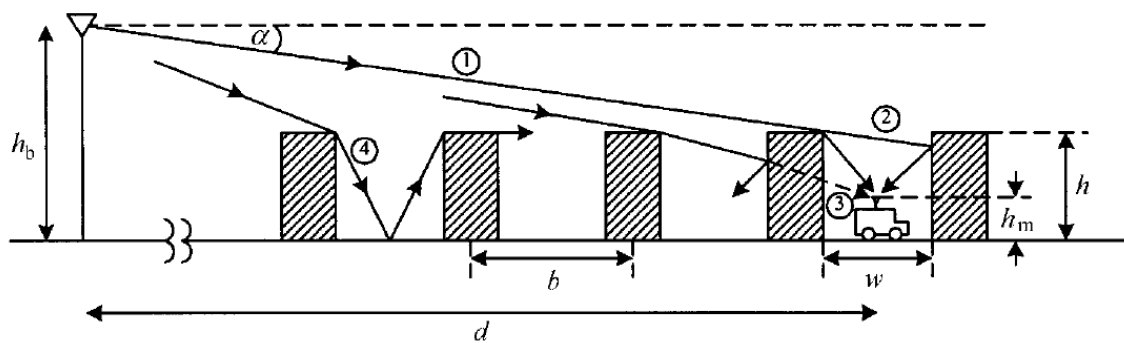


Figura 3.6 - Geometria da difração no topo das edificações. Ref. [11] adaptado.

Além disso, as distâncias b entre os edifícios estão localizadas aleatoriamente e não estão alinhadas entre si, de rua em rua ou com no percurso entre a estação rádio base e o terminal móvel, de modo que a propagação entre os edifícios não produz grandes contribuições para o sinal recebido. O modelo representa os edifícios através de uma série de obstáculos do tipo gume de faca e estabelece quais, para um dado valor do ângulo α , entram na primeira zona de Fresnel. A perda de difração é calculada por métodos numéricos. Para obter uma solução para o problema da difração por vários edifícios que se encontram ao longo do percurso e que têm influência, especialmente quando α é pequeno, devem ser feitas aproximações. O fundamental entre elas é que todas as linhas dos edifícios são da mesma altura, que a propagação é perpendicular às linhas de edifícios e que é utilizada a polarização vertical. [11]

Para determinar o campo difratado no nível da rua, é necessário estabelecer o campo incidente de sobre o topo do edifício imediatamente antes do terminal móvel. Walfisch e Bertoni mostraram que, para n grande isso pode ser obtido a partir de: [11]

$$Q(\alpha) \approx 0,1 \left(\frac{\alpha \sqrt{b/\lambda}}{0,03} \right)^{0,9} \quad (5.9)$$

Isto é adicional a dependência de d^{-1} do campo irradiado, resultando numa dependência total de $d^{-1,9}$. Isso produz uma lei de $d^{-3,8}$ para a potência do sinal recebido, muito perto do d^{-4} da lei de propagação sobre em terra plana que é comumente usada em modelos empíricos. A perda de percurso total, assim, consiste em três fatores: a perda de espaço livre no percurso entre as antenas, a perda de difração de múltiplos obstáculos até o topo da edificação mais próxima do terminal móvel, e a

perda de difração e dispersão a partir desse ponto até o terminal móvel no nível na rua. Assumindo antenas isotrópicas, a primeira e básica perda de percurso é a do espaço livre: [11]

$$L_B(\text{dB}) = 32,4 + 20 \log f_{\text{MHz}} + 20 \log d_{\text{km}}. \quad (5.10)$$

A equação usada para encontrar $Q(\alpha)$ permite contabilizar a declividade do terreno, para o terminal móvel e para a curvatura da Terra, desde que o intervalo d não se aproxime do horizonte. Para o nível de terreno, a declividade α em radianos é dada por: [11]

$$\alpha = \frac{h_b - h}{d} - \frac{d}{2r_e}; \quad (5.11)$$

em que r_e é o raio efetivo da Terra ($\approx 8,5 \times 10^3$ km) e h é a média das alturas dos prédios. [11]

A perda adicional devido à difração final no nível de rua é estimada assumindo uma linha de prédios funcionando como um obstáculo de absorção localizado no centro da linha. Neste caso, a amplitude do campo no terminal móvel é obtida multiplicando-se o campo no topo do prédio pelo fator: [11]

$$\frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi} \left[\left(\frac{b}{2} \right)^2 + (h - h_m)^2 \right]^{-1/4} \left[\frac{-1}{\gamma - \alpha} + \frac{1}{2\pi + \gamma - \alpha} \right]; \quad (5.12)$$

em que h é a altura dos edifícios e h_m é a altura da antena do terminal móvel. Os ângulos α e γ são medidos em radianos, com: [11]

$$\gamma = \tan^{-1}[2(h - h_m)/b]. \quad (5.13)$$

O fato do acentuado desvanecimento no sinal recebido pelo terminal móvel indica que a componente do campo recebida pela reflexão dos prédios próximos ao móvel é de amplitude semelhante à recebida por difração do topo dos prédios. Esses dois componentes têm fases aleatórias, porém, o valor RMS do campo total é a soma dos valores de RMS dos componentes individuais. Neste caso, é $\sqrt{2}$ x RMS do campo

difratado. Usando as equações de espaço livre, da difração final, de α e γ e incluindo o fator de $\sqrt{2}$ produz uma expressão para a redução do campo referente à registrada pelas mesmas antenas separadas por uma distância d no espaço livre. Esta é a "perda excedente" sobre a perda de percurso no espaço livre e é dada por: [11]

$$L_{ex}(\text{dB}) = 57,1 + A + \log f_c + 18 \log d - 18 \log (h_b - h) - 18 \log \left(1 - \frac{d^2}{17 (h_b - h)} \right). \quad (5.14)$$

O termo final nesta expressão contabiliza a curvatura da Terra e muitas vezes pode ser omitida. A geometria dos prédios está integrada ao termo. [11]

$$A = 5 \log \left[\left(\frac{b}{2} \right)^2 + (h - h_m)^2 \right] - 9 \log b + 20 \log \{ \tan^{-1} [2 (h - h_m) / b] \}. \quad (5.15)$$

A perda total do caminho é encontrada adicionando $L_{ex}(\text{dB})$ na perda de percurso do espaço livre $L_B(\text{dB})$ para antenas isotrópicas. Walfisch e Bertoni testaram seu modelo com medições publicadas e encontraram boa conformidade. [11]

3.5 Modelo de Ikegami

Esse modelo tenta produzir uma previsão totalmente determinista das intensidades dos campos em pontos específicos. Usando um mapa detalhado das alturas das edificações, formatos e posições, são traçadas linhas do percurso entre o transmissor e o receptor, com a restrição de que são contabilizadas apenas reflexões únicas nas paredes. A difração é calculada usando a aproximação de um único obstáculo no prédio mais próximo do terminal móvel, e a perda de reflexão na parede é assumida como um valor constante. A potência dos dois sinais, refletido e difratado, pode ser somada, resultando no seguinte modelo aproximado: [14]

$$L_E(\text{dB}) = 10 \log f_c + 10 \log (\sin \phi) + 20 \log (h - h_m) - 10 \log w - 10 \log \left(1 + \frac{3}{L_r^2} \right) - 5,8; \quad (5.16)$$

em que ϕ é o ângulo entre a rua e a linha direta da estação rádio base ao terminal móvel e $L_r = 0,25$ é a perda de reflexão. A análise pressupõe que o móvel está no centro da

rua. O modelo representa a situação ilustrada na Figura 3.7. Além disso, assume-se que o ângulo de elevação da estação rádio base em relação ao topo dos obstáculos é insignificante quando comparado com o ângulo de difração para baixo ao nível do móvel e deste modo não há dependência da altura da estação rádio base. [14]

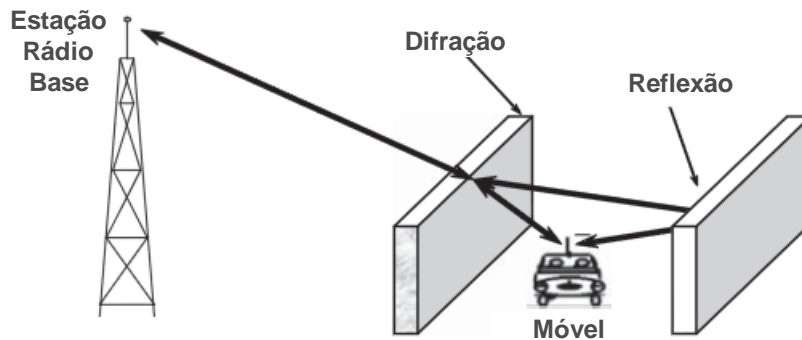


Figura 3.7 - Interpretação física do modelo. Ref. [14] adaptado.

A comparação dos resultados deste modelo com as medições em 200, 400 e 600 MHz mostra que a tendência geral das variações ao longo de uma rua é contabilizada com sucesso. As previsões sugerem que a intensidade do campo é amplamente independente da posição de um móvel transversalmente a rua. Isto é confirmado pelos valores médios de um grande número de medidas, embora a dispersão dos valores seja bastante elevada. Um índice bom de acerto também é obtido com as variações de ângulo e largura da rua. [14]

Embora represente razoavelmente bem para variações próximas na intensidade de campo, é falha a suposição de que a altura da antena da estação rádio base não afeta a propagação. A mesma suposição significa que o expoente de perda de espaço livre no percurso é considerado e, portanto, o modelo tende a subestimar a perda de grandes distâncias. Da mesma forma, a variação com frequência é subestimada em comparação com as medições. [14]

3.6 Modelo COST-Walfisch-Ikegami

Durante o projeto COST 231 o subgrupo sobre modelos de propagação propôs uma combinação do modelo Walfisch-Bertoni com o de Ikegami, para melhorar a

estimativa de perda de percurso através da inclusão de mais dados. Quatro fatores foram incluídos:

- Alturas das edificações;
- Largura das ruas;
- Separação das edificações;
- Orientação das ruas em relação ao percurso em linha de visada (LOS, do inglês *Line-Of-Sight*). [11]

O modelo distingue entre percursos LOS e não-LOS (NLOS). Para caminhos LOS a equação de perda é a seguinte: [11]

$$L_b = 42,6 + 26 \log d + 20 \log f_c \quad (5.17)$$

Foi desenvolvido a partir de medições realizadas em Estocolmo. Tem a mesma forma que a equação da perda de percurso em espaço livre e as constantes são escolhidas de tal forma que L_b é igual à perda de espaço livre para $d = 20\text{m}$. No caso de não-LOS a perda de propagação básica inclui a perda de espaço livre L_B , a perda de difração múltipla L_{msd} e a perda de difração do topo das edificações para a rua juntamente com a perda por dispersão L_{rts} . [11]

$$L_b(\text{dB}) = \begin{cases} L_B + L_{rst} + L_{msd} & L_{rst} + L_{msd} > 0 \\ L_B & L_{rst} + L_{msd} < 0 \end{cases} \quad (5.18)$$

Assim, a determinação do L_{rts} é baseado no princípio dado no modelo de Ikegami, mas com uma função diferente da orientação da rua. A geometria é mostrada na Figura 3.8 e os valores de L_{rts} são as seguintes: [11]

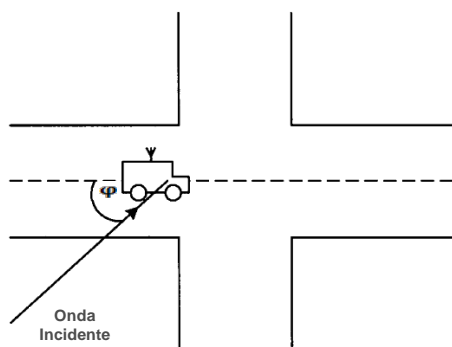


Figura 3.8 - Definição da orientação da rua φ . Ref. [11] adaptado.

$$L_{rst} = -16,9 - 10 \log w + 10 \log f_c + 20 \log(h - h_m) + L_{ori}$$

$$L_{ori}(\text{dB}) = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35) & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\varphi - 55) & 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases} \quad (5.20)$$

Note que o L_{ori} é um fator que tem sido estimado a partir de apenas um número muito pequeno de medições.

L_{msd} foi estimada por Walfisch e Bertoni para o caso quando a antena da estação rádio base está acima das edificações, ou seja, $h_b > h$. Isso também foi estendido pelo COST no caso quando a antena está abaixo da altura do topo das edificações, usando uma função empírica baseada em medições. As equações relevantes são: [11]

$$L_{msd}(\text{dB}) = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f_c - 9 \log b$$

$$L_{bsh}(\text{dB}) = \begin{cases} -18 \log[1 + (h_b - h)] & h_b > h \\ 0 & h_b \leq h \end{cases}$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & h_b > h \\ 54 - 0,8(h_b - h) & h_b \leq h \text{ e } d \geq 0,5 \text{ km} \\ 54 - 0,8(h_b - h) \frac{d}{0,5} & h_b \leq h \text{ e } d < 0,5 \text{ km} \end{cases} \quad (5.23)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & h_b > h \\ 18 - 15 \frac{(h_b - h)}{h} & h_b \leq h \end{cases} \quad (5.24)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0,7 \left(\frac{f_c}{925} - 1 \right) & \text{cidades médias e centros suburbanos} \\ & \text{com densidade média de árvores} \\ 1,5 \left(\frac{f_c}{925} - 1 \right) & \text{centros metropolitanos} \end{cases} \quad (5.25)$$

O termo k_a representa o aumento na perda de percurso quando a antena da estação rádio base está abaixo da altura das edificações. Os termos k_d e k_f permitem a dependência da perda de difração na distância e frequência, respectivamente. [11]

Os limites para este modelo estão descritos abaixo: [11]

- $f_c = 800$ a 2000 MHz;

- $h_b = 4$ a 50 m;
- $h_m = 1$ a 3 m;
- $d = 0,02$ a 5 km.

As previsões são bem aderentes com as medições quando a antena da estação rádio base está acima da altura das edificações, produzindo erro médios por volta de 3 dB, e desvio padrão na faixa de 4 a 8 dB. No entanto, o desempenho se deteriora quando h_b se aproxima de h e torna-se ruim quando h_b é menor do que h . O modelo, tal como está, portanto, pode produzir grandes erros no caso de microcélulas. [11]

Como seria de esperar, os resultados diferem significativamente, dependendo da situação em que os modelos são aplicados. Uma combinação de adaptação das diferentes abordagens tem sido utilizado em macrocélulas urbanas e produz melhores resultados do que qualquer modelo único. [11]

3.7 Conclusões

Os modelos de propagação mais utilizados e consagrados foram determinados empiricamente a partir de medições em campo em algumas regiões de maior interesse. O melhor modelo ou combinação de modelos para uma determinada localidade será obtido com medições efetuadas nas condições realísticas da mesma.

4. MONTAGEM DO EXPERIMENTO DE PROPAGAÇÃO

Conforme citado, o experimento em campo complementa o estudo dos modelos teóricos para a melhor precisão na definição das condições de propagação e no planejamento da cobertura das estações.

Em agosto de 2010 o conselho diretor da Anatel definiu a faixa de frequência de 2,5GHz a 2,69GHz para utilização do LTE [10]. Uma das premissas para o experimento é que o transmissor esteja dentro desta faixa, sendo escolhida a frequência de 2,6GHz. Outro aspecto muito importante é que na região dos testes a mesma não esteja sendo utilizada. Assim, antes de se iniciar os testes, em cada uma das cinco estações escolhidas foi verificado que o espectro estava de fato livre no momento do experimento.

A Tabela 4.1 contém um resumo dos principais parâmetros descritos na recomendação do IMT para o LTE [1]. Este experimento se assemelha a cobertura básica urbana para macro células.

Na Tabela 4.2 têm-se os dados das cinco estações utilizadas no experimento. Vale ressaltar a importância da escolha das mesmas, pois devem ser representativas da localidade em estudo e conter a maior quantidade possível de variações morfológicas.

Para a geração do sinal a ser transmitido foi utilizado o instrumento Hewlett-Packard modelo HP8648C, que é um gerador sintetizado de sinais. As especificações são informadas na Tabela 4.3 e foto na Figura 4.1. Foi utilizado sinal de onda contínua.

Tabela 4.1 - Principais Parâmetros do IMT. Ref. [1] adaptado.

Cenário de Implementação	Cobertura Básica			Alta Velocidade
	Urbana	Urbana	Ambiente Interno	
Macro Célula	Macro Célula	Micro Célula	Ponto de Concentração	Rural Macro Célula
Desenho de Rede	Padrão Hexagonal	Padrão Hexagonal	Andares Internos	Padrão Hexagonal
Modelo de Canal	Urbana Macro (LOS/NLOS)	Urbana Micro (LOS/NLOS)	Interno (LOS/NLOS)	Rural Macro (LOS/NLOS)
		(externo para interno)		
Distância entre ERBs	500m	200m	60m	1.732m
Altura das Antenas das ERBs	25m (acima edif.)	10m (abaixo edif.)	6m (fixada no teto)	35m (acima edif.)
Frequência da Portadora de RF	2GHz	2,5GHz	3,4GHz	800MHz
Número de antenas das ERBs	até 8	até 8	até 8	até 8
Potência de Transmissão das ERBs	46dBm / 10MHz 49dBm / 20MHz	41dBm / 10MHz 44dBm / 20MHz	21dBm / 10MHz 24dBm / 20MHz	46dBm / 10MHz 49dBm / 20MHz
Número de Antenas do Terminal Móvel	até 2	até 2	até 2	até 2
Potência de Transmissão do Terminal Móvel	24dBm	24dBm	24dBm	24dBm
Velocidade do Terminal Móvel	30Km/h	3Km/h	3Km/h	120Km/h

Tabela 4.2 - Dados das Estações do Experimento.

	Estação 01	Estação 02	Estação 03	Estação 04	Estação 05
Localização	Asa Norte	Asa Sul	Águas Claras	Setor Com. Norte	Setor Com. Sul
Coordenadas Geográficas	-15,76945 -47,87915	-15,83282 -47,92447	-15,83928 -48,01643	-15,78757 -47,88295	-15,79674 -47,88718
Morfologia	Urbana	Urbana	Urbana Densa	Urbana	Urbana
Cenário de Implementação	Macro Célula	Macro Célula	Macro Célula	Macro Célula	Macro Célula
Altura das Antenas de Transmissão	28,8m (acima edif.)	29,6m (acima edif.)	48,8m (acima edif.)	64,5m (acima edif.)	68,8m (acima edif.)
Frequência da Portadora de RF	2,6GHz	2,6GHz	2,6GHz	2,6GHz	2,6GHz
Número de antenas de Transmissão	1	1	1	1	1
Potência de Transmissão	20dBm	20dBm	20dBm	20dBm	20dBm
Velocidade de Medição	30Km/h	30Km/h	30Km/h	30Km/h	30Km/h

Tabela 4.3 - Especificações do Gerador de Sinais HP8648C. Ref. [16].

Especificação	Valores
Frequência do Sinal	9 kHz a 3,2GHz
Resolução da Frequência	0,001Hz
Precisão da Frequência	± 7,8KHz
Velocidade de Chaveamento	< 100ms
Harmônicas	< -30dBc
Sub-harmônicas	< -40dBc
Não-Harmônicas	< -48dBc
Potência de Saída	-136dBm a +13dBm
Resolução da Potência	0,1dB
Precisão da Potência	± 1,5dB
ROE até 2,5GHz	< 1,5:1
até 4GHz	< 2,0:1
Impedância de Saída	50Ω

A configuração do teste na parte de transmissão consiste na montagem do transmissor a uma antena via cabo de RF flexível de diâmetro $1,27 \times 10^{-2}$ m ($\frac{1}{2}$ polegada) e 3m de comprimento, conforme ilustrado na Figura 4.2.



Figura 4.1 - Foto do Gerador de Sinais HP8648C.

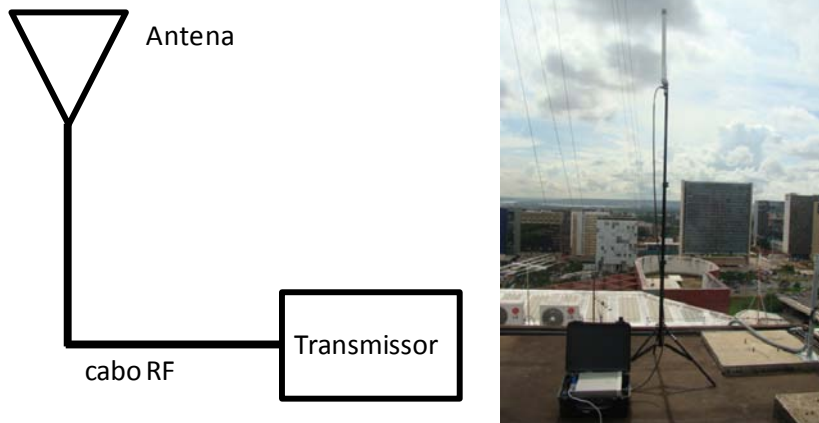


Figura 4.2 - Esquema e foto da montagem do transmissor.

A antena de transmissão utilizada foi omnidirecional do fabricante Stella Doradus modelo 261360 com as especificações informadas na Tabela 4.4 e o diagrama de radiação na Figura 4.3.

Tabela 4.4 - Especificações da Antena de Transmissão. Ref. [18].

Especificação	Valores
Ganho	8dBi
Largura de Banda	2,5 a 2,7GHz
ROE	1,8:1
Polarização	Vertical
Potência de Entrada	< 50W
Abertura Vertical (½ Potência)	17 graus
Impedância	50Ω

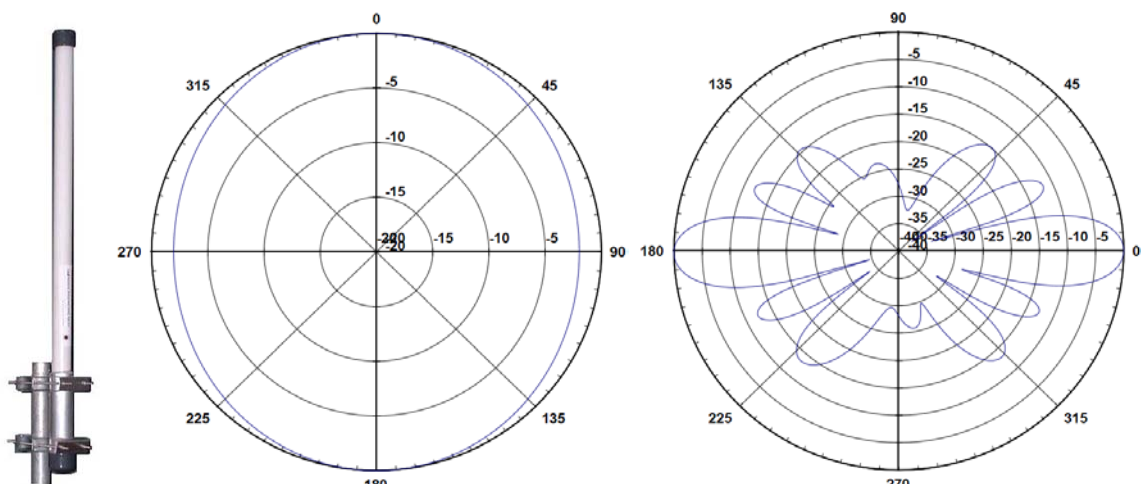


Figura 4.3 - Foto e Diagrama de Radiação da Antena de Transmissão. Ref. [18].

A potência da saída do transmissor foi configurada na máxima, de 13dBm. O ganho da antena é de 8dBi e a perda no cabo e conexões de 1dB. Assim, a potencia efetivamente irradiada (ERP) é de 20dBm.

A antena de recepção utilizada foi do fabricante MARS modelo MA-DBO2455-3, também omnidirecional, posicionada a 1,6 m de altura, com as especificações descritas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Especificações da Antena de Recepção. Ref. [19].

Especificação	Valores
Ganho	2dBi
Largura de Banda	2,3 a 2,7GHz
ROE	1,9:1
Polarização	Vertical
Potência de Entrada	< 20W
Impedância	50Ω

Para a recepção do sinal foi utilizado o instrumento Rohde & Schwarz modelo FSH3, que é um analisador de espectro, acoplado a um aparelho com sistema de posicionamento global (GPS), modelo 60CSX do fabricante Garmin, o que permite obter medições concatenadas com as coordenadas geográficas.

A alimentação dos instrumentos foi efetuada através de um inversor conectado a saída de 12VCC do cinzeiro do veículo.

Pelos parâmetros do IMT [1] descritos, no que tange a potência de transmissão das ERBs, seria recomendável utilizar-se um amplificador acoplado a saída do gerador de sinais, mas como não se tinha o mesmo disponível, foi compensado com a ativação do pré-amplificador interno que o FSH3 possui para aumentar a sensibilidade. Conforme a frequência, este amplificador tem 15 dB até 18 dB de ganho e aumenta a sensibilidade de 10 a 15 dB [17]. Isto também foi possível porque o espectro da faixa de 2,6GHz não está em uso nas regiões do experimento. As especificações do instrumento constam na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Especificações do Analisador de Espectro FSH3. Ref. [17].

Especificação	Valores
Frequência de Operação	100kHz a 3GHz
Resolução da Frequência	1 Hz
Extensão da Frequência	100kHz a 3GHz
Potência de Entrada	20dBm, 30dBm até 3 minutos
Piso de ruído	
Sem Pré-Amplificador	< 105dBm, -114dBm típico
Com Pré-Amplificador até 2,5GHz	< -120dBm, -125dBm típico
Com Pré-Amplificador acima 2,5GHz	< -115dBm, -120dBm típico
ROE	1,5:1 típico
Impedância de Entrada	50Ω
2ª Harmônica	< -60dBc típico
Margem de Erro de Medição	< 1,5 dB, 0,5dB típico

O esquema de montagem da recepção está ilustrado na Figura 4.4.

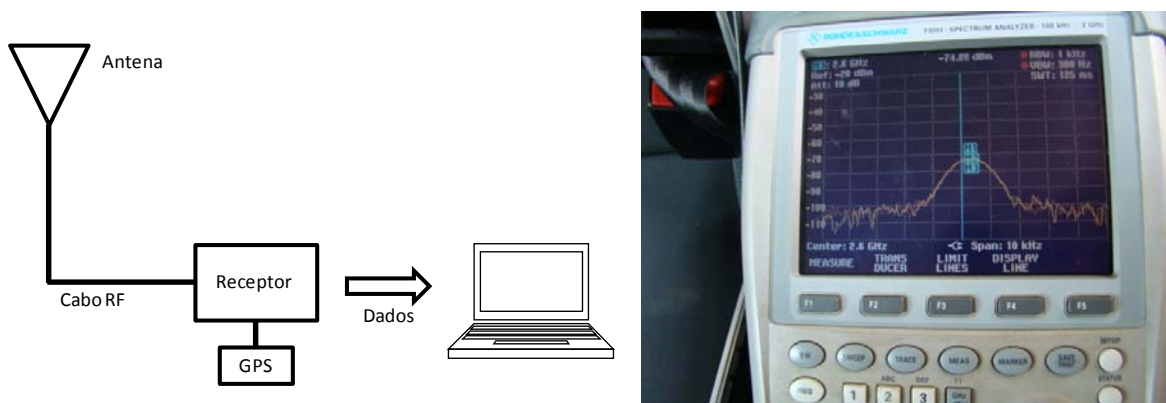


Figura 4.4 - Esquema de montagem da recepção e foto do receptor.

4.1 Conclusões

A montagem do experimento, conforme descrito, estabeleceu condições para efetuar-se uma coleta confiável de dados, bem como seu armazenamento para posterior tratamento.

5. MEDIÇÕES DE CAMPO E RESULTADOS OBTIDOS

A coleta de dados é uma atividade crítica do processo, pois é feita a partir de instalações provisórias em estações disponibilizadas por tempo limitado. Além disso, dificilmente é possível refazê-las, exigindo toda a atenção dos operadores para tomar ações corretivas ao menos sinal de desvios.

Para cada uma das estações foram percorridas as ruas ao redor com distância variável até que os níveis medidos atingissem o piso de ruído. Os dados brutos coletados estão exemplificados na Tabela 5.1. As frequências estão em Hz e o nível de sinal em dBm.

Tabela 5.1 - Exemplo de dados brutos coletados.

Tempo	Latitude	Longitude	Freq1	Nível1	Freq2	Nível2	Freq3
15:42:17.968	1546.1457,S	04752.7424,W	2.6e9	-86.85	2.6e9	-86.85	2.6e9

O pós-processamento dos dados brutos foi feito através da ferramenta proprietária da empresa CelPlan® Technologies. Os dados foram tratados conforme descrito a seguir:

- O arquivo bruto possui atualização de coordenadas por GPS a cada 2 segundos. Os registros obtidos entre as atualizações de coordenadas têm sua posição interpolada em função das coordenadas anterior e posterior.
- O arquivo bruto possui três medições de níveis de sinal para cada coordenada. Através dos dados dessas três medições, é obtida, pela a média simples, a intensidade para cada registro. Assim, cada registro passa então a ter coordenadas interpoladas e nível médio de sinal.
- Para cada registro verificam-se os registros com uma distância menor do que 6m para determinação de nova média local, que é a média simples entre sua intensidade de sinal média e as médias dos registros que se encontram a menos de 6m de distância. Ao final, os registros são espaçados a cada 6m, cada um contendo a média de intensidade de sinal determinada para todas as medições que se realizaram a 6m ou menos de distância. Vale ressaltar que os 6m utilizados na ferramenta para a

interpolação superam a distância de coerência $\lambda/4 = 0,028826\text{m}$ [20], garantindo-se a eliminação do efeito do desvanecimento rápido.

A Tabela 5.2 contém um exemplo dos dados pós-processados na referida ferramenta.

Tabela 5.2 - Exemplo de dados pós-processados.

Longitude	Latitude	Nível
-4787904	-157691	-86,8

Para cada ponto de medição dos dados coletados foi calculada a distância da estação transmissora e os mesmos foram dispostos em um gráfico de dispersão. Os pontos representam os dados medidos e as retas os modelos teóricos de propagação [21] descritos no capítulo 3. Ainda, considerando-se a distribuição lognormal das medições [11], foram levantadas as médias e desvios padrão para análise estatística de todos os casos.

Vale ressaltar que pelo grande volume de amostras, na ordem de grandeza de dez mil em cada estação, e pelo método de coleta, neste experimento não foi diferenciado se no ponto de medição tinha-se ou não linha de visada.

Foram considerados os modelos Espaço Livre (ELivre), Formulação de Hata (Hata), COST 231-Hata (CHata), COST-Walfisch-Ikegami em linha de visada (WfIkeL) e obstruído (WfIkeNL).

Ainda foi aplicado o efeito do diagrama de radiação vertical da antena de transmissão, uma vez que no horizontal o comportamento é praticamente omnidirecional. Para a antena de recepção o comportamento é praticamente omnidirecional tanto no diagrama horizontal como no vertical.

Foram desconsideradas as medidas abaixo de -125dBm , que é o piso de ruído típico com a utilização do pré-amplificador do analisador de espectro, considerando que o valor típico está próximo ao de $2,5\text{GHz}$ [17].

Analogamente, devido ao efeito do diagrama vertical da antena, foram desconsideradas as medidas em que as perdas foram maior do que 25dB, praticamente eliminando os efeitos dos nulos [18].

5.1 Análise da Estação 01

Situa-se na Asa Norte em um prédio residencial, conforme foto na Figura 5.1. A antena e transmissor foram instalados no topo, conforme ilustrado na Figura 5.2.



Figura 5.1 - Foto da Estação 01.

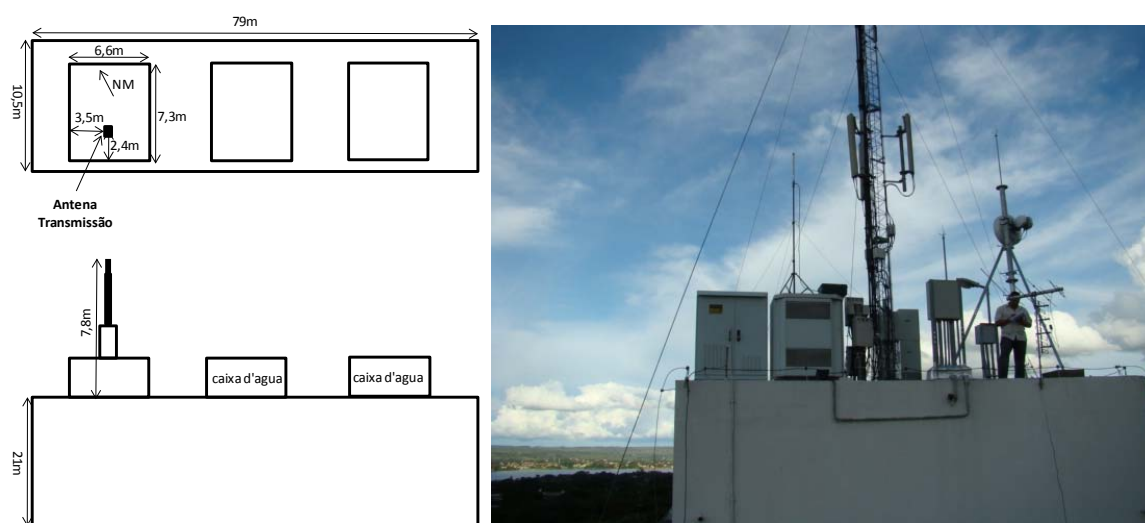


Figura 5.2 - Instalações da Estação 01. Antena de Transmissão a 28,8m.

A região contém prédios espaçados e é bastante arborizada. Pode ser caracterizada claramente como urbana de baixa densidade, conforme Figura 5.3.



Figura 5.3 - Morfologia da região da Estação 01.

A rota percorrida para o experimento e os níveis de sinal medidos sobrepostos ao mapa de arruamento estão ilustrados na Figura 5.4.



Figura 5.4 – Rota das medidas da Estação 01.

Após o pós-processamento obteve-se 9.816 amostras. A Figura 5.5 contém o gráfico de dispersão das medições efetuadas e a comparação com os modelos teóricos.

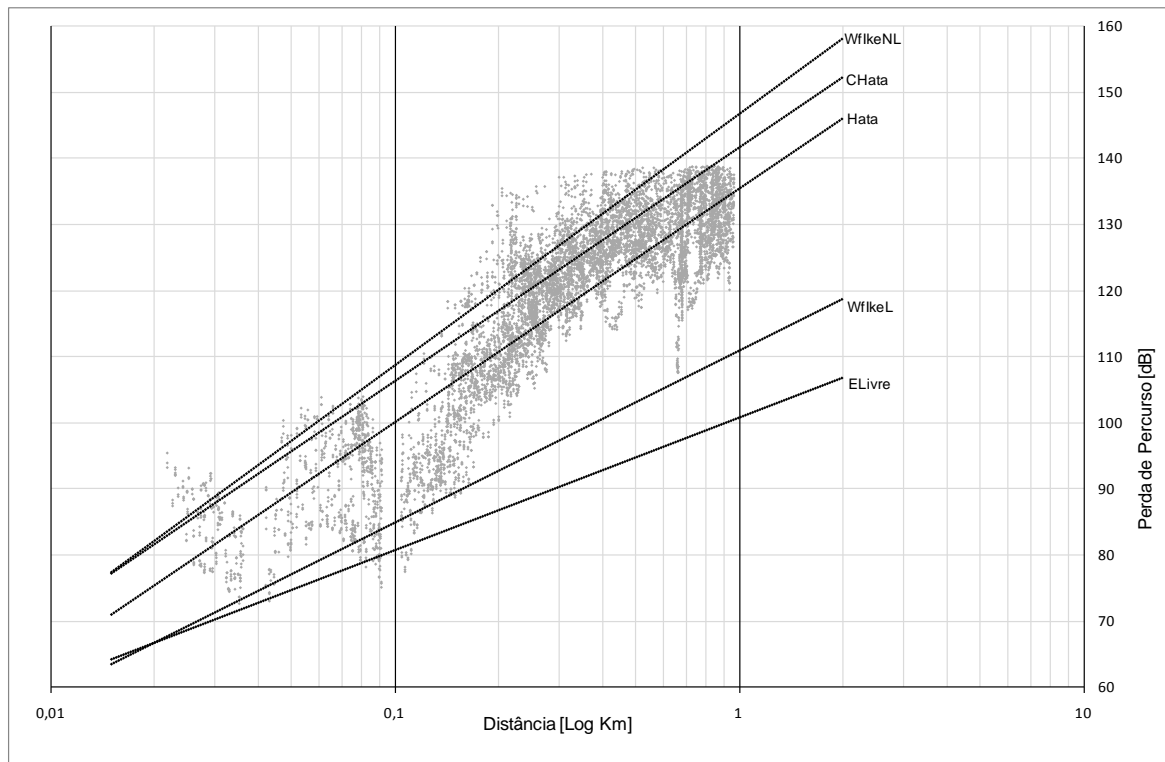


Figura 5.5 - Gráfico com medições e modelos teóricos na Estação 01.

A Tabela 5.3 contém os dados estatísticos de comparação dos modelos teóricos com as medições, em termos de erro médio (média) e desvio padrão.

Tabela 5.3 - Comparação de medições e modelos teóricos na Estação 01.

Modelo	Média	Desvio Padrão
WflikeNL	8,73	6,92
CHata	5,10	6,97
Hata	-1,09	6,97
WflikeL	-20,84	8,06
ELivre	-27,86	9,33

Como pode ser observado, o modelo cujo erro médio mais se aproximou das medições foi o de Hata e o menor desvio padrão foi o WflikeNL. Os modelos que consideram obstrução (Hata, CHata e WflikeNL) ficaram bem mais próximos das medições do que consideram linha de visada (WflikeL e ELivre).

5.2 Análise da Estação 02

Situa-se na Asa Sul em um prédio residencial, conforme Figura 5.6. A antena e transmissor foram instalados no topo, conforme ilustrado na Figura 5.7.



Figura 5.6 - Foto da Estação 02.

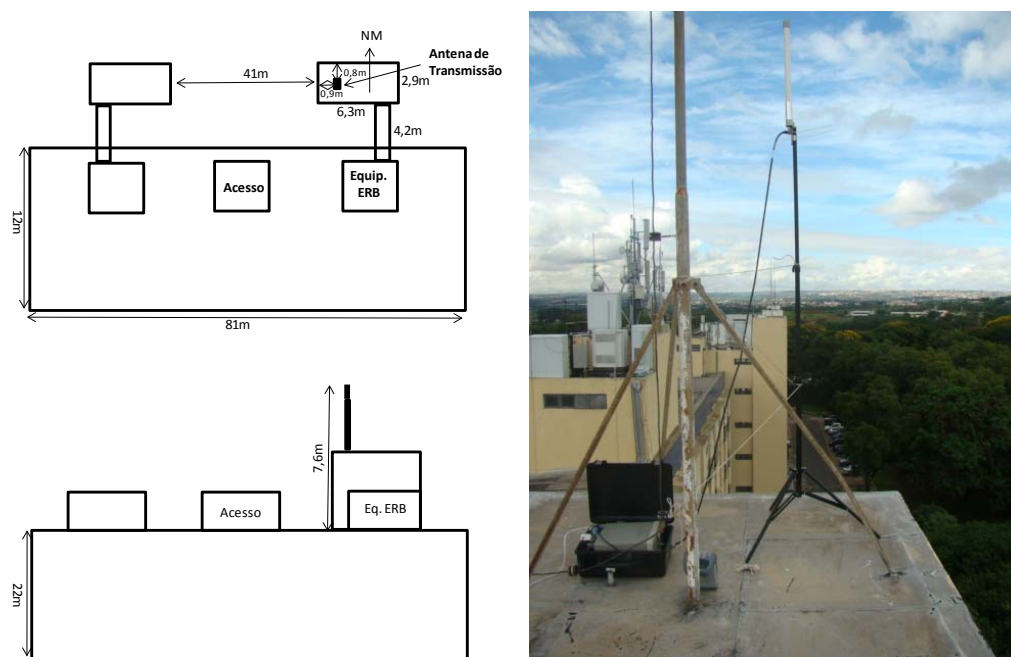


Figura 5.7 - Instalações da Estação 02. Antena de Transmissão a 29,6m.

A região contém prédios espaçados e é arborizada, conforme fotos na Figura 5.8. Pode também ser caracterizada como urbana de baixa densidade. Vale ressaltar que a morfologia da região desta estação não é homogênea.



Figura 5.8 - Morfologia da região da Estação 02.

A rota percorrida para o experimento e os níveis de sinal medidos sobrepostos ao mapa de arruamento estão ilustrados na Figura 5.9.

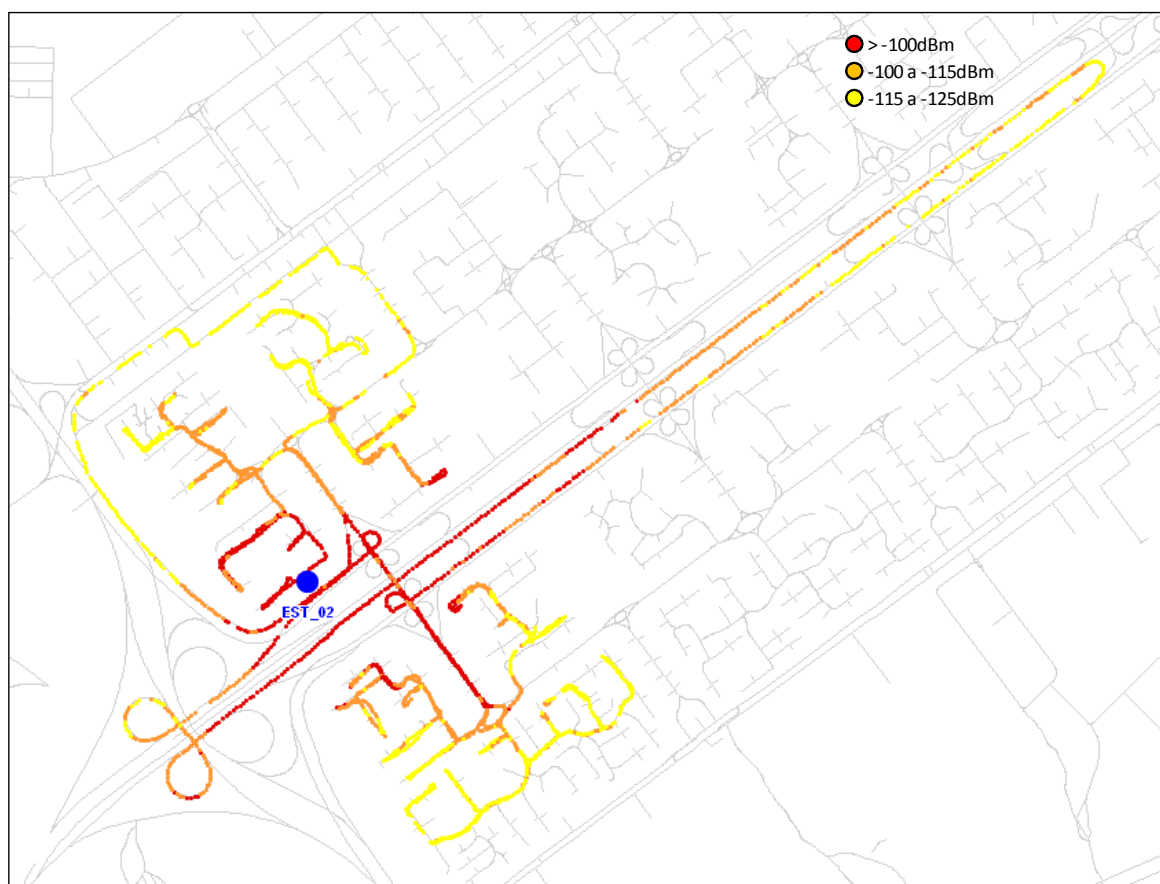


Figura 5.9 – Rota das medidas da Estação 02.

Após o pós-processamento obteve-se 8.739 amostras. A Figura 5.10 contém o gráfico de dispersão das medições efetuadas e a comparação com os modelos teóricos.

Uma peculiaridade da Estação 02 é que em praticamente nos 180 graus da face sul é totalmente desobstruída com prédios bem distantes e menos vegetação, enquanto a face norte tem a morfologia análoga a Estação 01. Essa diferença causa uma melhora nas condições de propagação em parte das amostras e conseqüentemente uma dispersão maior das medições.

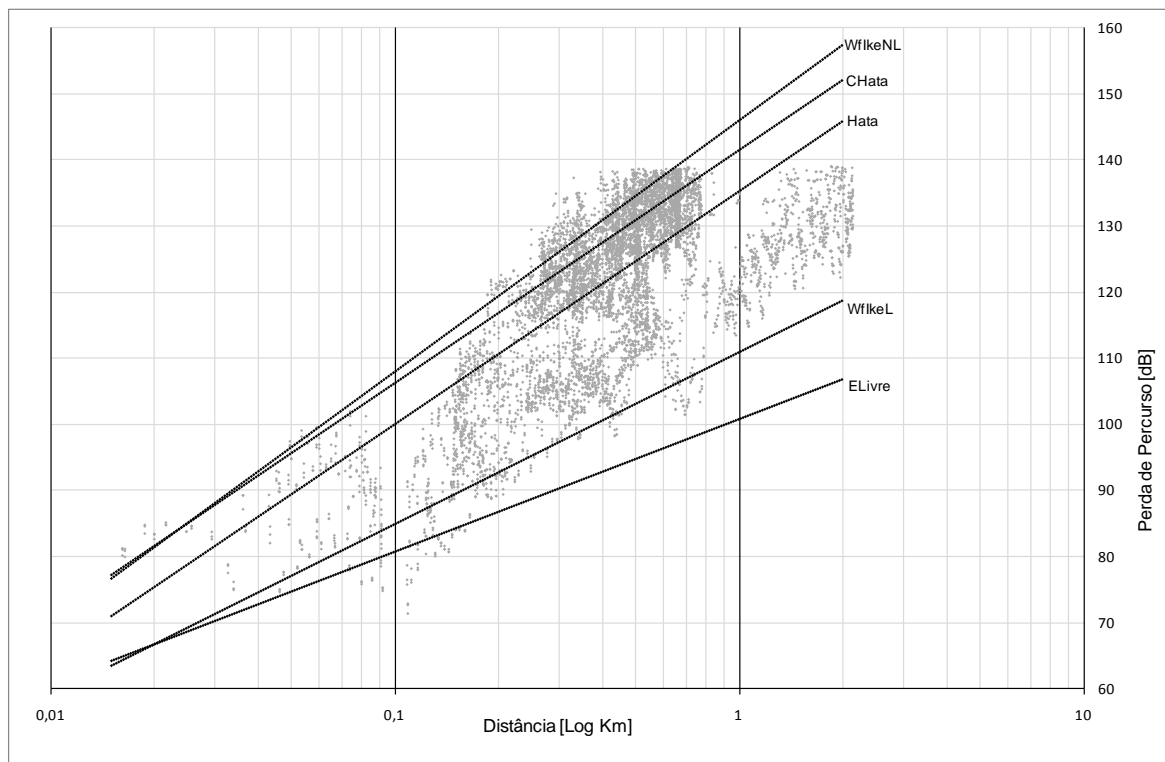


Figura 5.10 - Gráfico com medições e modelos teóricos na Estação 02.

A Tabela 5.4 contém os dados estatísticos de comparação dos modelos teóricos com as medições.

Tabela 5.4 - Comparação de medições e modelos teóricos na Estação 02.

Modelo	Média	Desvio Padrão
WfikeNL	11,32	9,35
CHata	7,85	9,26
Hata	1,67	9,26
WfikeL	-19,27	9,50
ELivre	-27,15	10,05

A grande diferença da morfologia entre as duas faces impacta em um maior desvio padrão em todos os modelos. Pode-se verificar também que o erro médio das medições se deslocou levemente em favor dos modelos que não consideram obstrução, apesar do desvio padrão destes ainda ser maior.

5.3 Análise da Estação 03

Situa-se em Águas Claras em um prédio residencial, conforme Figura 5.11. A antena e transmissor foram instalados no topo, conforme ilustrado na Figura 5.12.



Figura 5.11 - Foto da Estação 03.

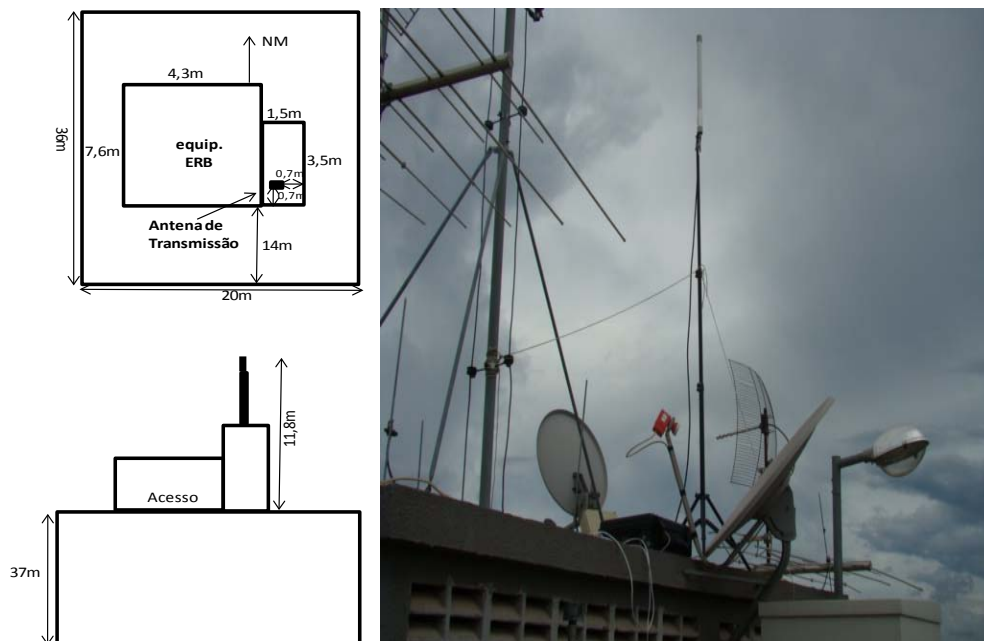


Figura 5.12 - Instalações da Estação 03. Antena de Transmissão a 48,8m.

A região é pouco arborizada e contém prédios muito próximos, conforme fotos na Figura 5.13. Pode ser caracterizada como urbana densa.



Figura 5.13 - Morfologia da região da Estação 03.

A rota percorrida para o experimento e os níveis de sinal medidos sobrepostos ao mapa de arruamento estão ilustrados na Figura 5.14.

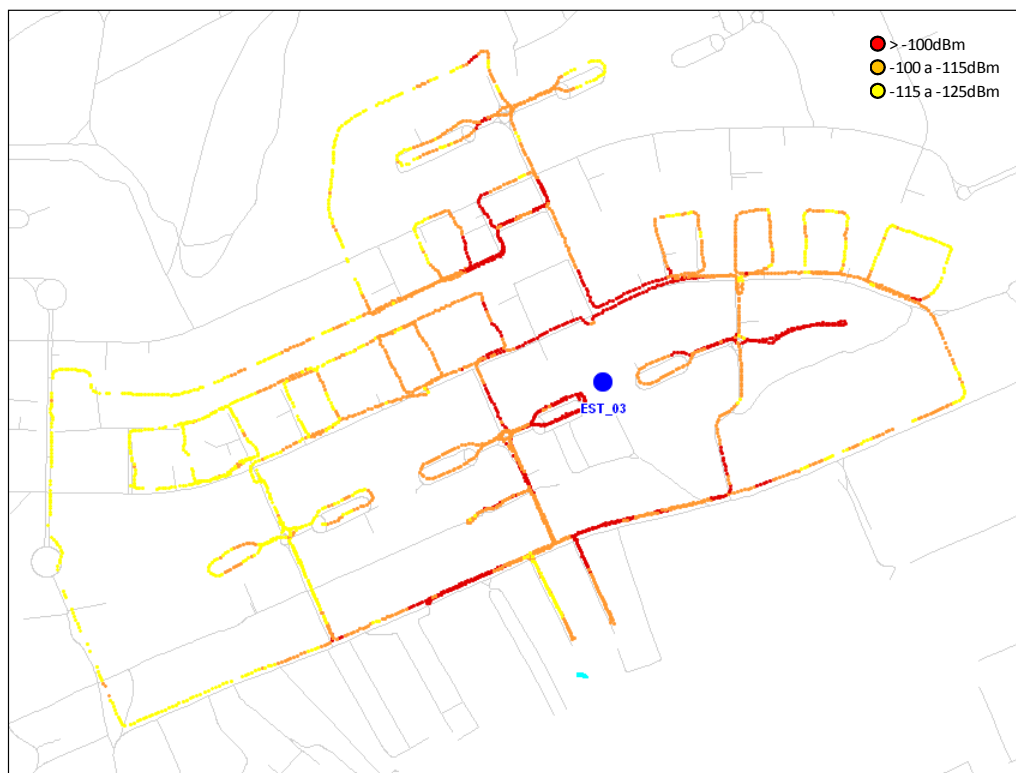


Figura 5.14 – Rota das medidas da Estação 03.

Após o pós-processamento obteve-se 9.645 amostras. A Figura 5.15 contém o gráfico de dispersão das medições efetuadas e a comparação com os modelos teóricos.

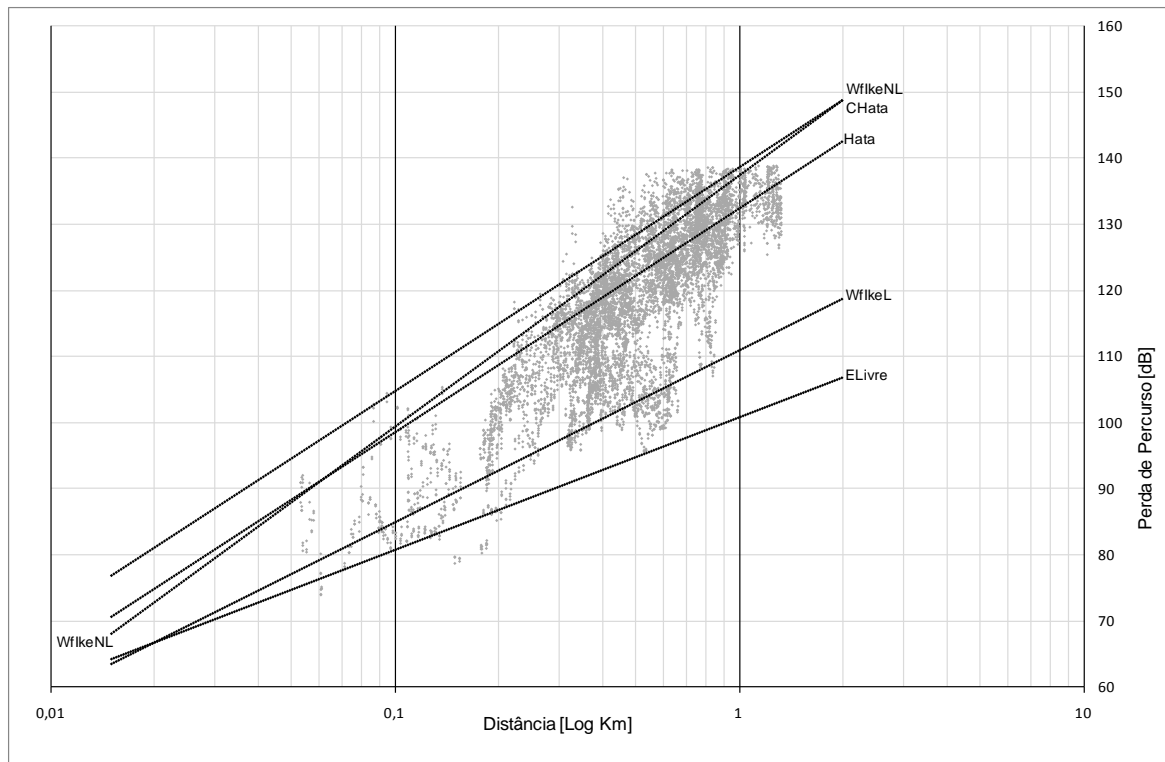


Figura 5.15 - Gráfico com medições e modelos teóricos na Estação 03.

Por ser uma região com grande densidade de prédios relativamente altos, a altura da antena de transmissão da Estação 03 ficou acima da recomendação do IMT [1] para manter-se a premissa de que esteja acima do nível das edificações e, assim, utilizar-se modelos para macro células. A Tabela 5.5 contém os dados estatísticos de comparação dos modelos teóricos com as medições.

Nota-se que próximo a estação e para maiores alturas da antena de transmissão o modelo WflkeNL considera uma perda menor que o Hata e principalmente o CHata. Entretanto, como a declividade é mais acentuada no WflkeNL a perda torna-se maior do que os outros modelos conforme aumenta a distância. Pelo menor desvio padrão, o WflkeNL foi mais aderente a tendência das medições, porém com maior erro médio.

Tabela 5.5 - Comparação de medições e modelos teóricos na Estação 03.

Modelo	Média	Desvio Padrão
WflkeNL	7,31	7,31
CHata	9,70	7,54
Hata	3,52	7,54
WflkeL	-15,48	8,28
ELivre	-23,74	9,04

5.4 Análise da Estação 04

Situa-se no Setor Comercial Norte em um prédio comercial, conforme Figura 5.16. A antena e transmissor foram instalados no topo, conforme Figura 5.17.



Figura 5.16 - Foto da Estação 04.

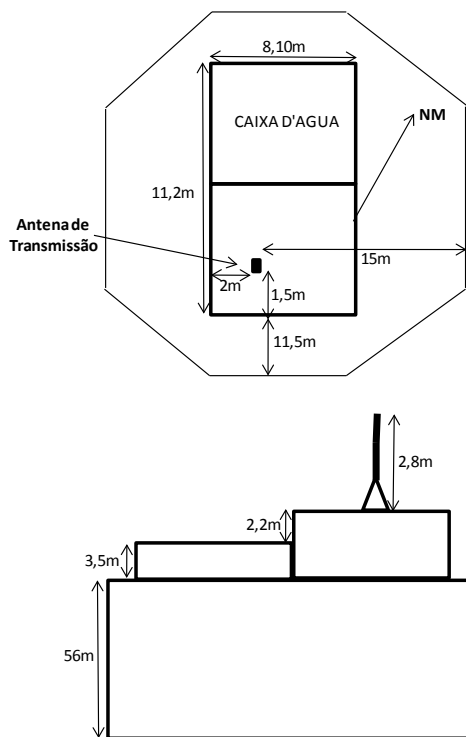


Figura 5.17 - Instalações da Estação 04. Antena de Transmissão a 64,5m.

A região é pouco arborizada e contém poucos prédios próximos, tendo assim também poucas obstruções conforme fotos na Figura 5.18. Pode ser caracterizada como urbana de densidade média.



Figura 5.18 - Morfologia da região da Estação 04.

A rota percorrida para o experimento e os níveis de sinal medidos sobrepostos ao mapa de arruamento estão ilustrados na Figura 5.19.

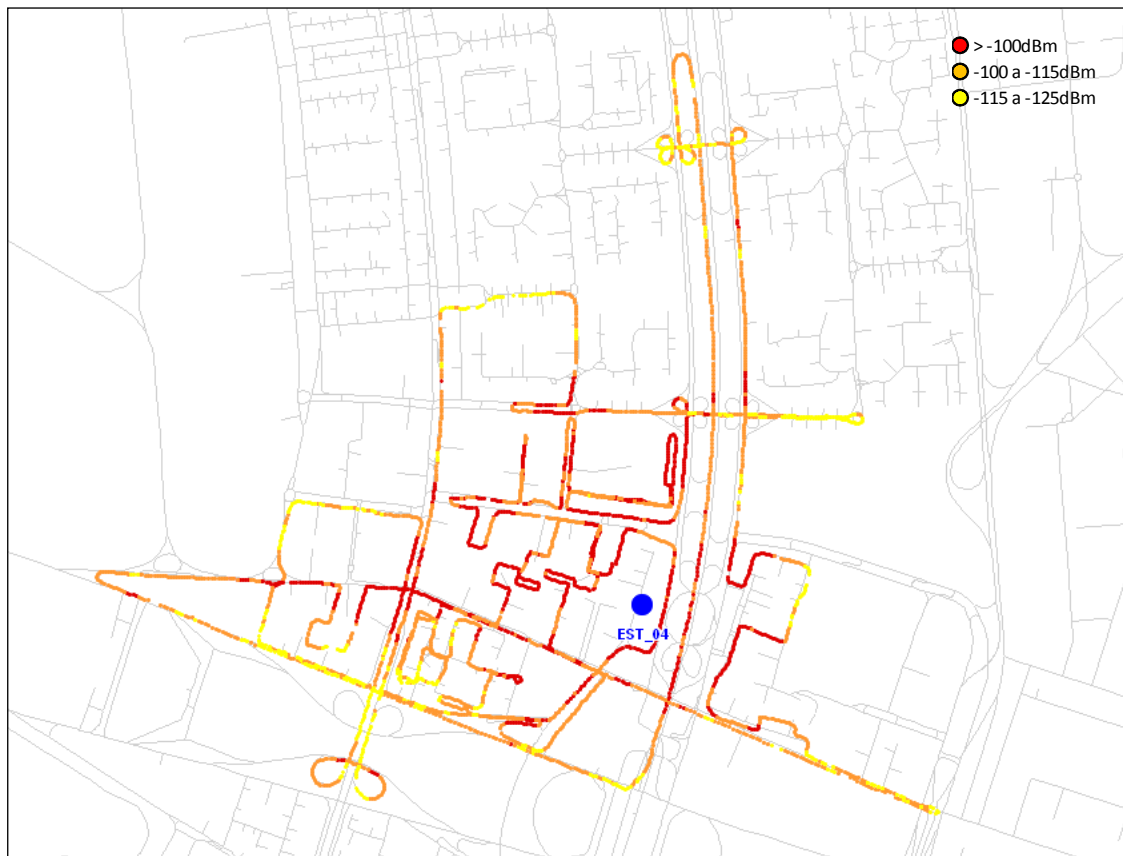


Figura 5.19 – Rota das medidas da Estação 04.

Após o pós-processamento obteve-se 9.675 amostras. A Figura 5.20 contém o gráfico de dispersão das medições efetuadas e a comparação com os modelos teóricos. Por ser uma região de prédios relativamente altos, a altura da antena de transmissão da Estação 04 também ficou acima da recomendação do IMT [1] para manter-se a premissa de que esteja acima do nível das edificações e, assim, utilizar-se modelos para macro células.

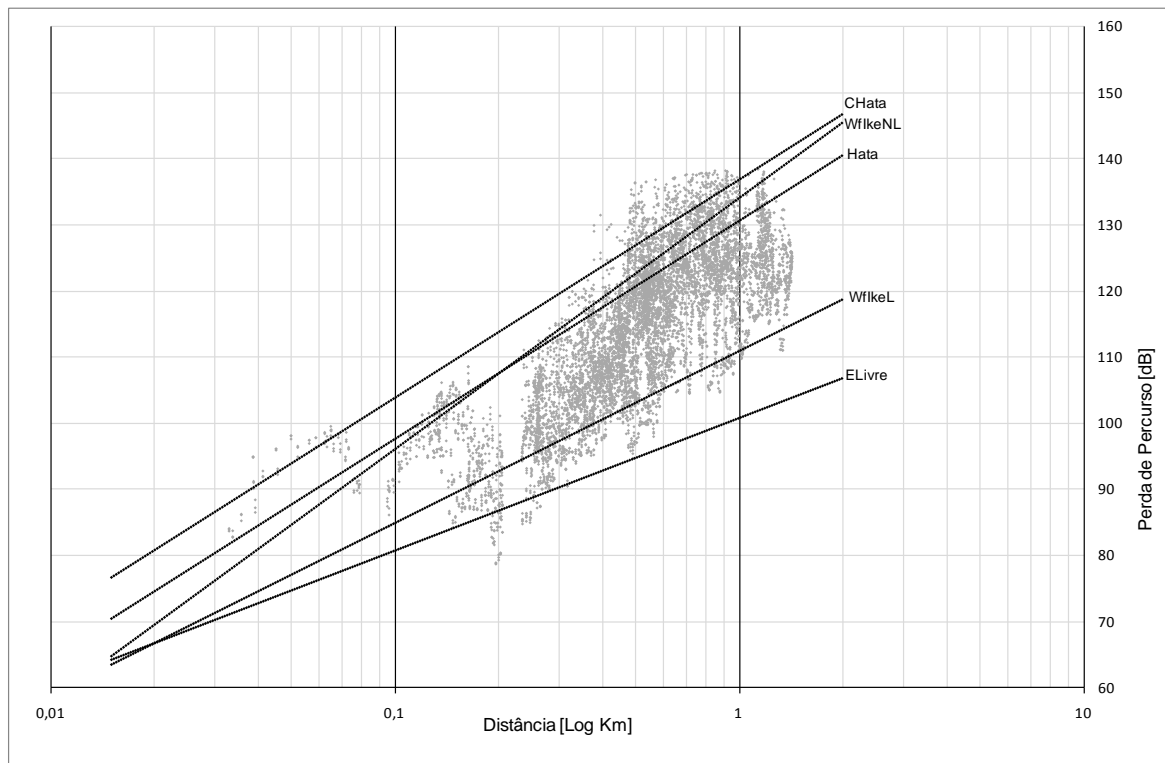


Figura 5.20 - Gráfico com medições e modelos teóricos na Estação 04.

Tabela 5.6 contém os dados estatísticos de comparação dos modelos teóricos com as medições. Próximo da estação o modelo WflikeNL considera uma perda menor que o Hata e principalmente o CHata. Por este motivo o erro médio ficou mais otimista do que o CHata. Pelo menor desvio padrão, o WflikeNL foi mais aderente a tendência das medições, porém com maior deslocamento médio.

Tabela 5.6 - Comparação de medições e modelos teóricos na Estação 04.

Modelo	Média	Desvio Padrão
WflikeNL	8,51	7,55
CHata	12,75	7,59
Hata	6,57	7,59
WflikeL	-11,17	7,97
ELivre	-19,59	8,58

Ainda verifica-se que pelas poucas obstruções, comparativamente as amostras se aproximam mais dos modelos que consideram linha de visada. Contudo, em todos os casos os modelos que consideram obstruções têm menor desvio padrão.

5.5 Análise da Estação 05

Situa-se no Setor Comercial Sul em um prédio comercial, conforme Figura 5.21. A antena e transmissor foram instalados no topo, conforme ilustrado na Figura 5.22.



Figura 5.21 - Foto da Estação 05.

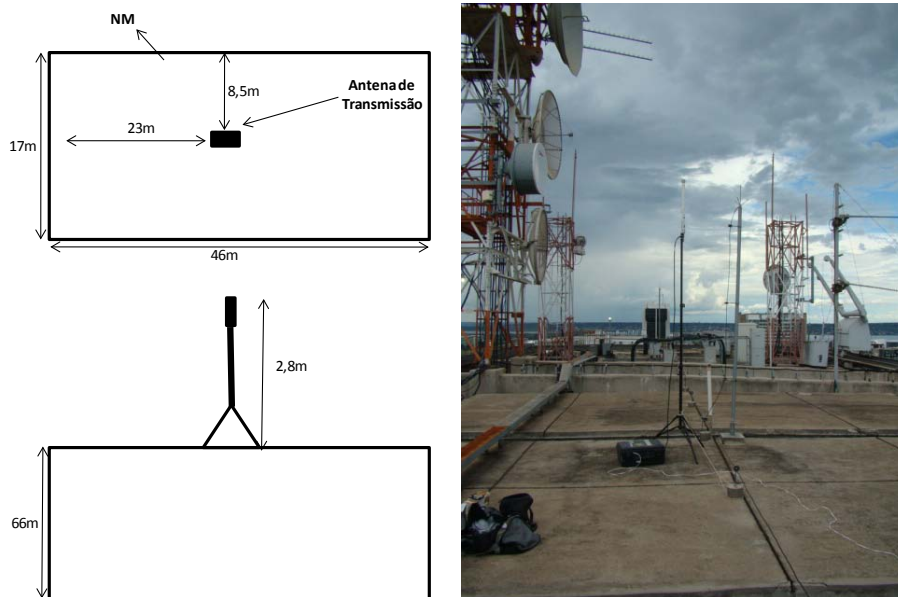


Figura 5.22 - Instalações da Estação 05. Antena de Transmissão a 68,8m.

A região é pouco arborizada e contém alguns prédios próximos, com aproximadamente 60 graus de maior densidade de edificações, mas como são bem mais baixos que a estação, não representam obstrução, conforme fotos na Figura 5.23. Pode ser caracterizada como urbana de densidade média.



Figura 5.23 - Morfologia da região da Estação 05.

A rota percorrida para o experimento e os níveis de sinal medidos sobrepostos ao mapa de arruamento estão ilustrados na Figura 5.24.

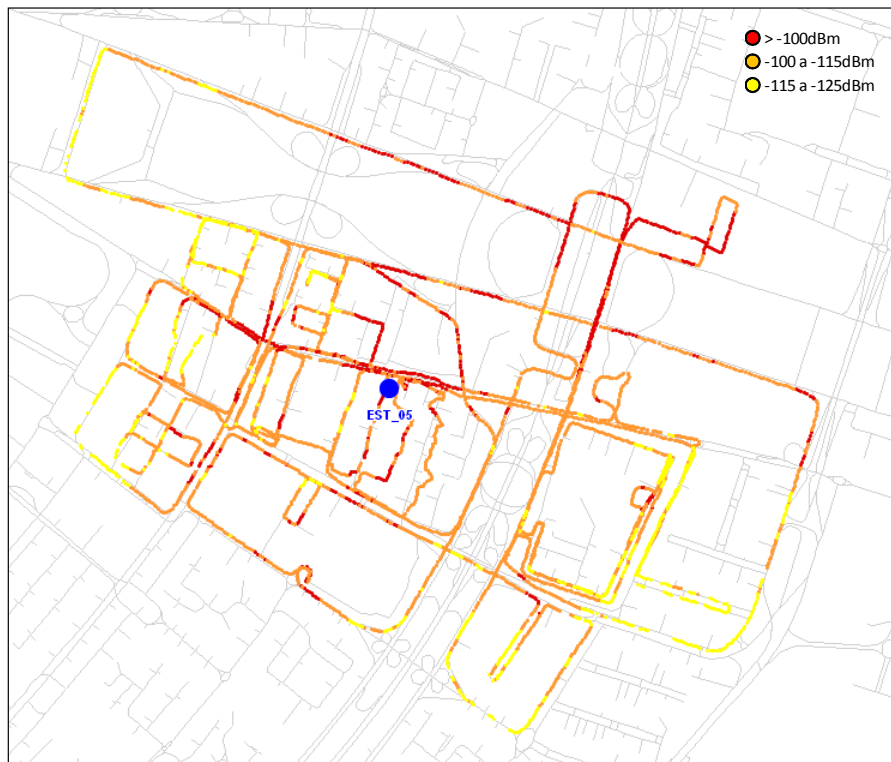


Figura 5.24 – Rota das medidas da Estação 04.

Após o pós-processamento obteve-se 13.662 amostras. A Figura 5.25 contém o gráfico de dispersão das medições efetuadas e a comparação com os modelos teóricos.

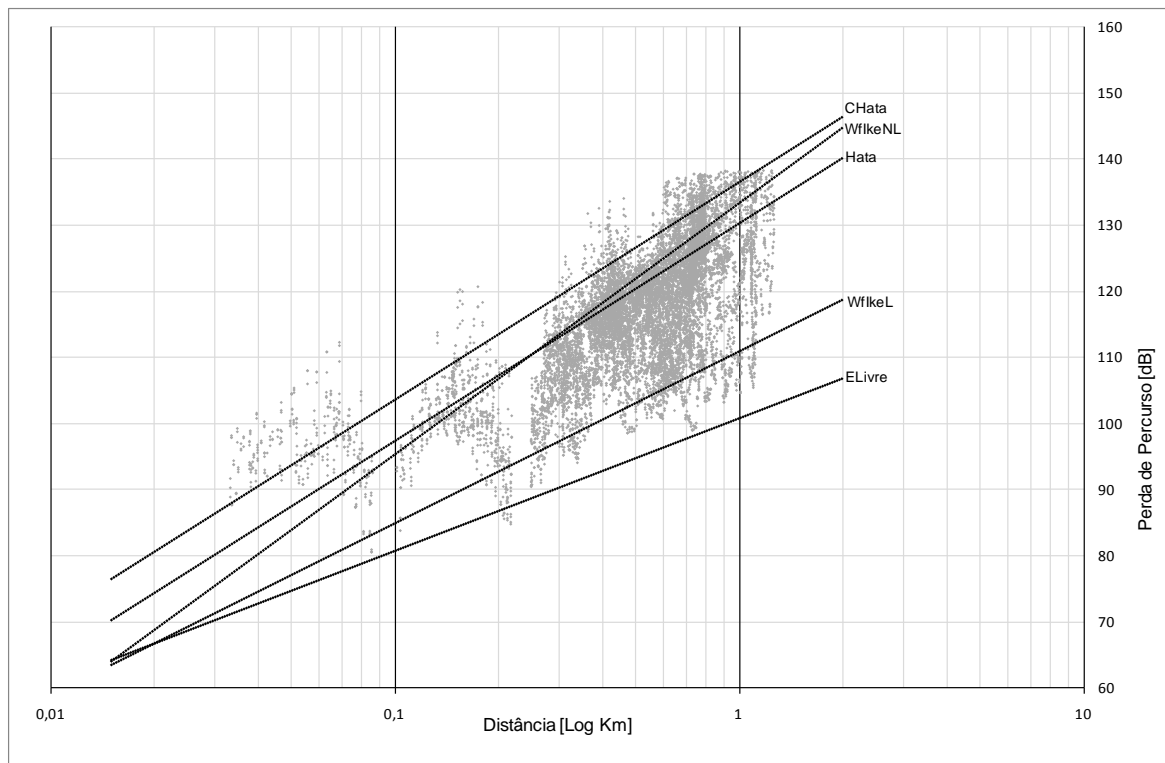


Figura 5.25 - Gráfico com medições e modelos teóricos na Estação 05.

A Tabela 5.7 contém os dados estatísticos de comparação dos modelos teóricos com as medições.

Por ser uma região de prédios relativamente altos, a altura da antena de transmissão da Estação 05 também ficou acima da recomendação do IMT [1] para manter-se a premissa de que esteja acima do nível das edificações e, assim, utilizar-se modelos para macro células.

Próximo da estação o modelo WflikeNL considera uma perda menor que o Hata e principalmente o CHata. O Hata e CHata foram mais aderentes a tendência das medições, porém com deslocamento médio, provavelmente devido a ser uma estação alta, em área urbana e praticamente sem obstruções próximas.

Tabela 5.7 - Comparação de medições e modelos teóricos na Estação 05.

Modelo	Média	Desvio Padrão
WfikeNL	5,27	7,75
CHata	9,96	7,43
Hata	3,78	7,43
WfikeL	-13,55	7,35
ELivre	-21,90	7,59

5.6 Conclusões

O processo de coleta e o pós-processamento resultou em dados confiáveis e bastante coerentes, sobretudo quando comparados aos modelos de propagação mais utilizados, possibilitando utilizá-los como base para a modelagem.

6. MODELAGEM DE CANAL DE RÁDIO E RECOMENDAÇÕES PARA PLANEJAMENTO DE NOVAS REDES LTE

De posse dos resultados dos experimentos e confrontando-os com os modelos de propagação empíricos, estação a estação, pode-se obter um modelo customizado para Brasília, e a partir deste fundamentar as recomendações para o planejamento de cobertura.

A Tabela 6.1 resume os resultados estatísticos de todas as estações do experimento, quando se compara as medições com os modelos teóricos.

Tabela 6.1 - Análise estatística comparativa entre medições e modelos teóricos.

MÉDIA	Modelo	Est01	Est02	Est03	Est04	Est05	Média
	WflikeNL	8,73	11,32	7,31	8,51	5,27	8,23
	CHata	5,10	7,85	9,70	12,75	9,96	9,07
	Hata	-1,09	1,67	3,52	6,57	3,78	2,89
	WflikeL	-20,84	-19,27	-15,48	-11,17	-13,55	-16,06
	ELivre	-27,86	-27,15	-23,74	-19,59	-21,90	-24,05

DESVIO PADRÃO	Modelo	Est01	Est02	Est03	Est04	Est05	Média
	WflikeNL	6,92	9,35	7,31	7,55	7,75	7,78
	CHata	6,97	9,26	7,54	7,59	7,43	7,76
	Hata	6,97	9,26	7,54	7,59	7,43	7,76
	WflikeL	8,06	9,50	8,28	7,97	7,35	8,23
	ELivre	9,33	10,05	9,04	8,58	7,59	8,92

De um modo geral os modelos Hata, CHata e WflikeNL mostraram-se aderentes as medições. Vale lembrar que foram originalmente elaborados para faixas de frequência mais baixas que a utilizada no experimento. Ressalta-se que o CHata foi desenvolvido justamente para estender a frequência máxima de trabalho do Hata de 1,5GHz para 2GHz, com a inserção de algumas perdas. Contudo foi o Hata que em todos os casos ficou com o menor erro médio quando comparado com as medições. O WflikeNL também foi desenvolvido originalmente para frequências menores que 2GHz.

Já com relação a distâncias somente o WflikeNL apresenta o limite menor, de 20m. O Hata e CHata prevêem distâncias superiores a 1Km, o que seria maior que a distância entre ERBs recomendadas pelo IMT.

Especificamente para o Hata foram utilizadas as expressões matemáticas para áreas urbanas e o parâmetro $a(h_r)$ para cidades grandes. Complementarmente para o CHata foi utilizado o fator de correção C para regiões metropolitanas.

O modelo COST-Walfisch-Ikegami sem linha de visada apresentou o menor desvio padrão em três das cinco estações. Assim, o mesmo será utilizado como base para a modelagem.

Conforme descrito anteriormente o WflkeNL tem a expressão abaixo indicada, uma vez que a antena transmissora está acima das edificações e trata-se de centro metropolitano:

$$L_{WflkeNL}(dB) = 32,4 + 20 \log f_c + 20 \log d - 16,9 - 10 \log w + 10 \log f_c + \quad (6.1)$$

$$20 \log(h - h_m) + L_{ori} - 18 \log[1 + (h_b - h)] + k_a + k_d \log d +$$

$$[-4 + 1,5 \left(\frac{f_c}{925} - 1\right)] \log f_c - 9 \log b.$$

Rearranjando-se a expressão e efetuando-se adaptações, pode-se organizá-la em cinco parcelas a seguir:

$$L_{WflkeNL}(dB) = \{32,4 - 16,9\} \quad (6.2)$$

$$+ \left\{ 20 \log f_c + 10 \log f_c + [-4 + 1,5 \left(\frac{f_c}{925} - 1\right)] \log f_c \right\}$$

$$+ \{20 \log(h - h_m) - 18 \log[1 + (h_b - h)] + k_a\}$$

$$+ \{-10 \log w - 9 \log b + L_{ori} + K_{Brasília}\}$$

$$+ \{20 \log d + k_d \log d\}$$

1. Constantes independentes diretamente definidas;
2. Fator da frequência;
3. Fator de altura da estação rádio base e móvel em relação às edificações;
4. Fator da morfologia da região;
5. Fator multiplicativo da variável distância.

A primeira adaptação refere-se à extensão da faixa de frequência para 2,6GHz, expressa na parcela 2:

$$\text{Fator da frequência (dB)} = 20 \log f_c + 10 \log f_c + [-4 + 1,5 \left(\frac{f_c}{925} - 1\right)] \log f_c . \quad (6.3)$$

A Figura 6.1 mostra a curva do fator da frequência em função da frequência. A curva foi estendida até 5,8GHz em que se tem publicações do uso do modelo COST-Walfisch-Ikegami [21]. Pode-se verificar que a taxa de incremento da perda diminui com o aumento da frequência, sendo mais acentuada até em torno de 1GHz. Em 200MHz é de quase 4dB/50MHz e em 2GHz é de pouco mais do que 1/10 deste valor.

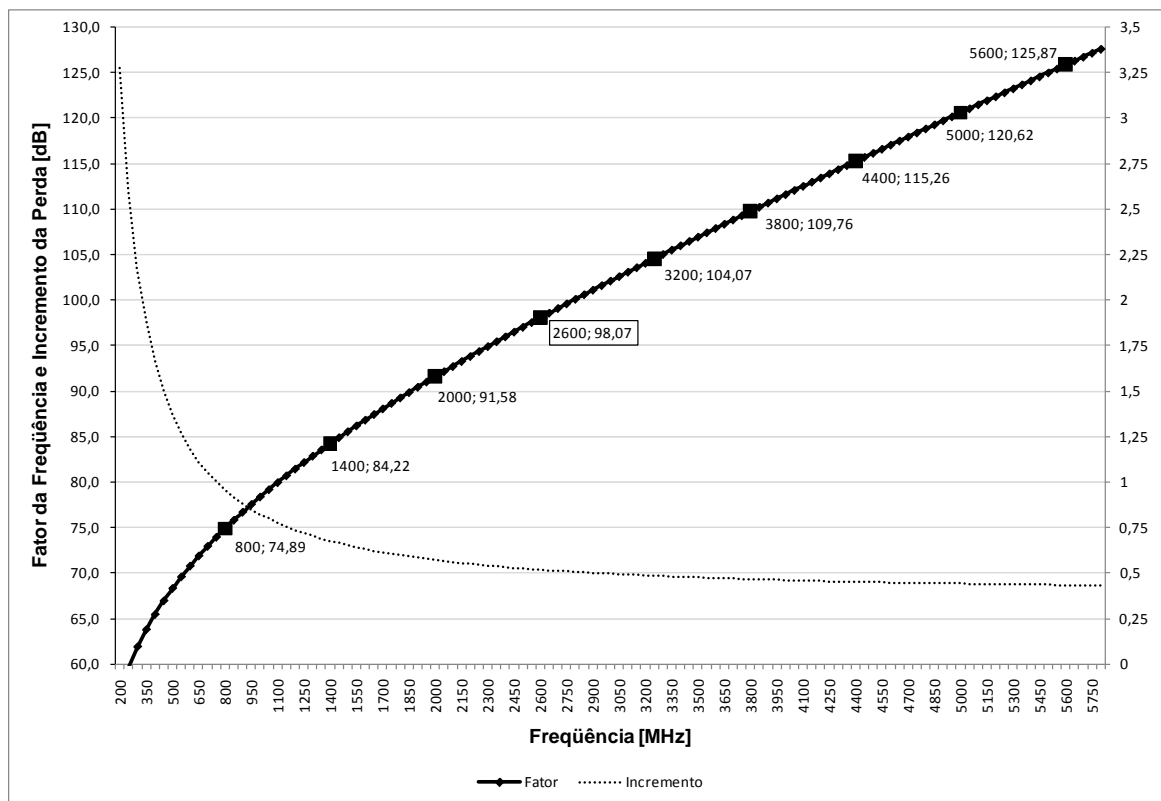


Figura 6.1 - Curva do Fator da Frequência do modelo WflikeNL.

Assim, como a variação do incremento da perda é pequena na faixa de 1GHz a 2GHz, entende-se que a extensão para 2,6GHz não descaracteriza o modelo, principalmente porque na expressão torna-se uma constante, pois não varia com a distância e pode-se ajustar com a próxima adaptação descrita a seguir.

A segunda e mais importante adaptação é a inserção de um fator de adaptação referente à morfologia de Brasília, denominado $K_{\text{Brasília}}$. O objetivo deste fator é que a diferença média do modelo adaptado quando comparado as medições seja mínima. Para

tal utilizou-se as diferenças médias de cada estação ponderadas pela quantidade de amostras de cada uma. Ou seja:

$$K_{\text{Brasília}} = \frac{\sum \text{Desvio Médio da Estação} \times \text{Quantidade Amostras da Estação}}{\text{Total de Amostras de Todas as Estações}} = 7,9 \text{ dB} \quad (6.4)$$

Efetuada-se o cálculo para as 51.537 amostras obteve-se o fator arredondado. Ou seja, $K_{\text{Brasília}} = 8 \text{ dB}$.

Como a média da diferença foi positiva, deve-se decrementar este fator do modelo COST-Walfisch-Ikegami adaptado ($L_{\text{WfIkeNL_Adap}}$). Ainda vale ressaltar que foram utilizados os parâmetros para quando a antena transmissora está acima das edificações e para centros metropolitanos. Para o parâmetro da largura média das ruas w foi adotado 10m e para o espaçamento médio entre edifícios b foi adotado 150m, conforme verificado na ferramenta Google™ Earth para as regiões do experimento. Para o ângulo da onda incidente φ , relativo à orientação das ruas, foi adotado o valor de 90 graus, conforme recomendação [11]. Para a altura média das edificações utilizou-se 21m e do receptor 1,6m.

A expressão, então, fica a seguinte:

$$L_{\text{WfIkeNL_Adap}}(\text{dB}) = \{15,5\} + \{98,1\} + \{79,8 - 18 \log[1 + (h_b - 21)]\} + \{-29,6 - 8\} + \{38 \log d\} \quad (6.5)$$

ou

$$L_{\text{WfIkeNL_Adap}}(\text{dB}) = 155,7 - 18 \log [1 + (h_b - 21)] + 38 \log d \quad (6.6)$$

Que é o modelo COST-Walfisch-Ikegami adaptado para Brasília, com base nas medições efetuadas.

Vale notar que o modelo de propagação proposto pelo 3GPP [22] para uma área urbana e frequência de 2GHz é o seguinte:

$$L_{\text{3GPP}}(\text{dB}) = 128,1 + 37,6 \log d \quad (6.7)$$

Utilizando o mesmo critério de $h_b - h = 15\text{m}$, o modelo obtido neste experimento é o seguinte:

$$L_{WflikeNL_Adap}(\text{dB}) = 134,1 + 38,0 \log d \quad (6.8)$$

O que impressiona pela semelhança, em que basicamente altera-se a constante.

A seguir, para cada uma das estações a expressão (6.6) será aplicada, em que a altura h_b irá definir a constante da mesma.

6.1 Aplicação do Modelo Adaptado na Estação 01

Com base nos dados de altura da Estação 01 ($h_b = 28,8\text{m}$), a expressão fica a seguinte:

$$L_{WflikeNL_Adap}(\text{dB}) = 138,7 + 38,0 \log d \quad (6.9)$$

Inserindo-se as amostras da Estação 01 no software estatístico Minitab[®] obtém-se a regressão linear que ressalta-se ser a reta que melhor se adapta às medições, com erro médio zero e desvio padrão mínimo, e tem a seguinte expressão:

$$L_{Regressão}(\text{dB}) = 137,8 + 37,6 \log d \quad (6.10)$$

A comparação entre as duas expressões consta na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Análise estatística comparativa entre o modelo adaptado e a regressão linear na Estação 01.

Modelo	Média	DesvPad
WflikeNL_Adap	0,73	6,92
Regressão Linear	0,00	6,92

Vale ressaltar que o modelo WflikeNL_Adap ficou muito próximo da regressão linear.

A Figura 6.2 mostra o gráfico comparativo com as medições.

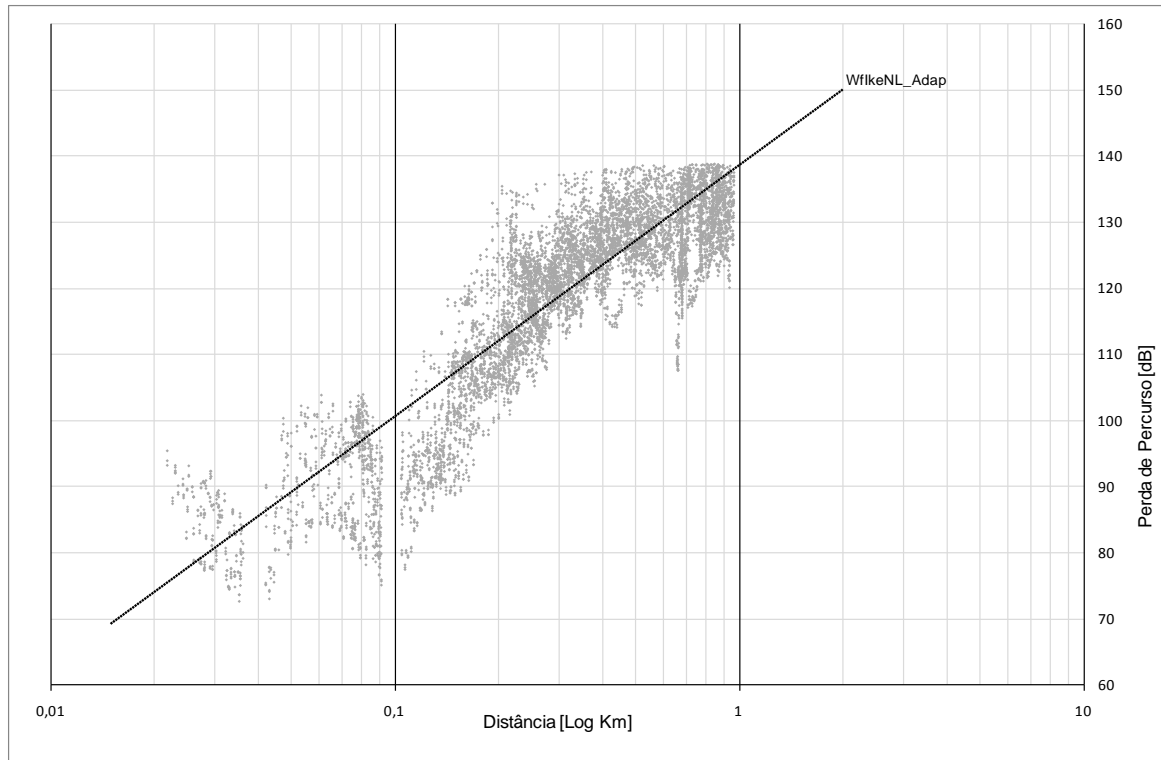


Figura 6.2 - Gráfico com Medições e Modelo Adaptado para a Estação 01.

6.2 Aplicação do Modelo Adaptado na Estação 02

Com base nos dados de altura da Estação 02 ($h_b = 29,6m$), a expressão fica a seguinte:

$$L_{WflikeNL_Adap} \text{ (dB)} = 138,1 + 38,0 \log d \tag{6.11}$$

$$L_{Regressão} \text{ (dB)} = 133,0 + 33,4 \log d \tag{6.12}$$

A comparação entre as duas expressões consta na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Análise estatística comparativa entre o modelo adaptado e a regressão linear na Estação 02.

Modelo	Média	DesvPad
WflikeNL_Adap	3,32	9,35
Regressão Linear	0,00	9,25

A Figura 6.3 mostra o gráfico comparativo com as medições.

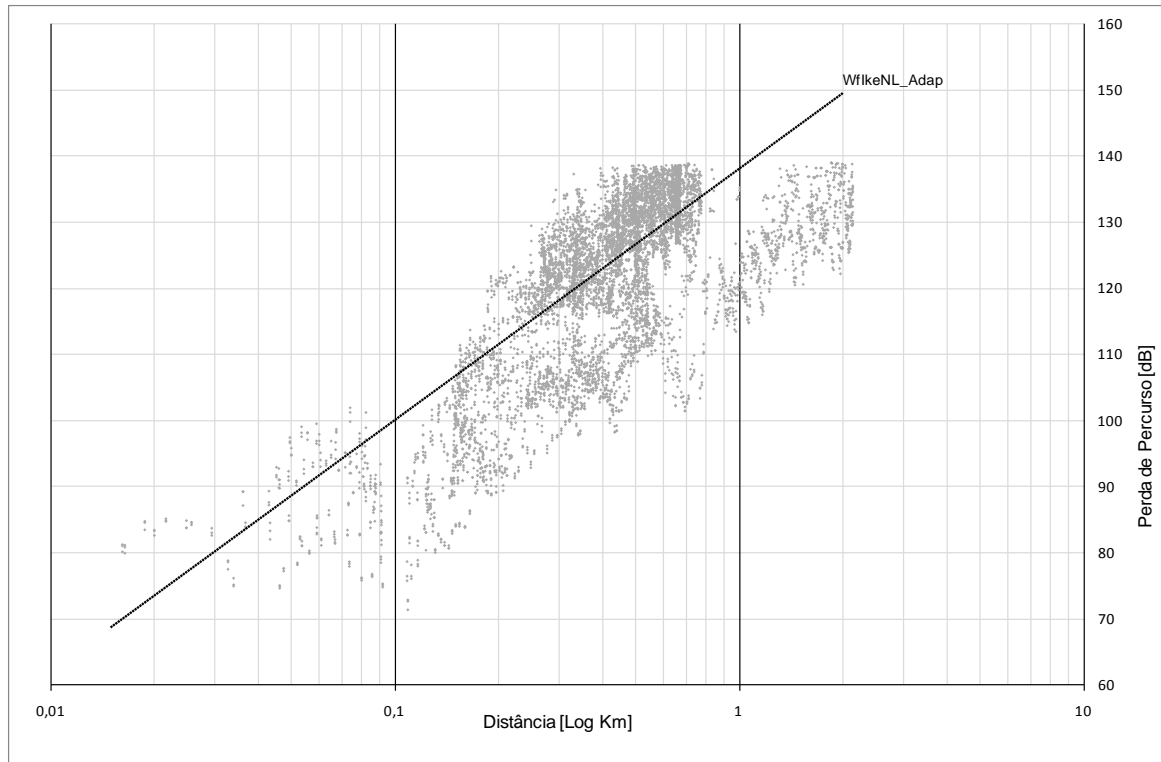


Figura 6.3 - Gráfico com Medições e Modelo Adaptado para a Estação 02.

6.3 Aplicação do Modelo Adaptado na Estação 03

Com base nos dados de altura da Estação 03 ($h_b = 48,8\text{m}$), a expressão fica a seguinte:

$$L_{WfikeNL_Adap} \text{ (dB)} = 129,5 + 38,0 \log d \tag{6.13}$$

$$L_{Regressão} \text{ (dB)} = 132,0 + 43,9 \log d \tag{6.14}$$

A comparação entre as duas expressões consta na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Análise estatística comparativa entre o modelo adaptado e a regressão linear na Estação 03.

Modelo	Média	DesvPad
WfikeNL_Adap	-0,69	7,31
Regressão Linear	0,00	7,18

A Figura 6.4 mostra o gráfico comparativo com as medições.

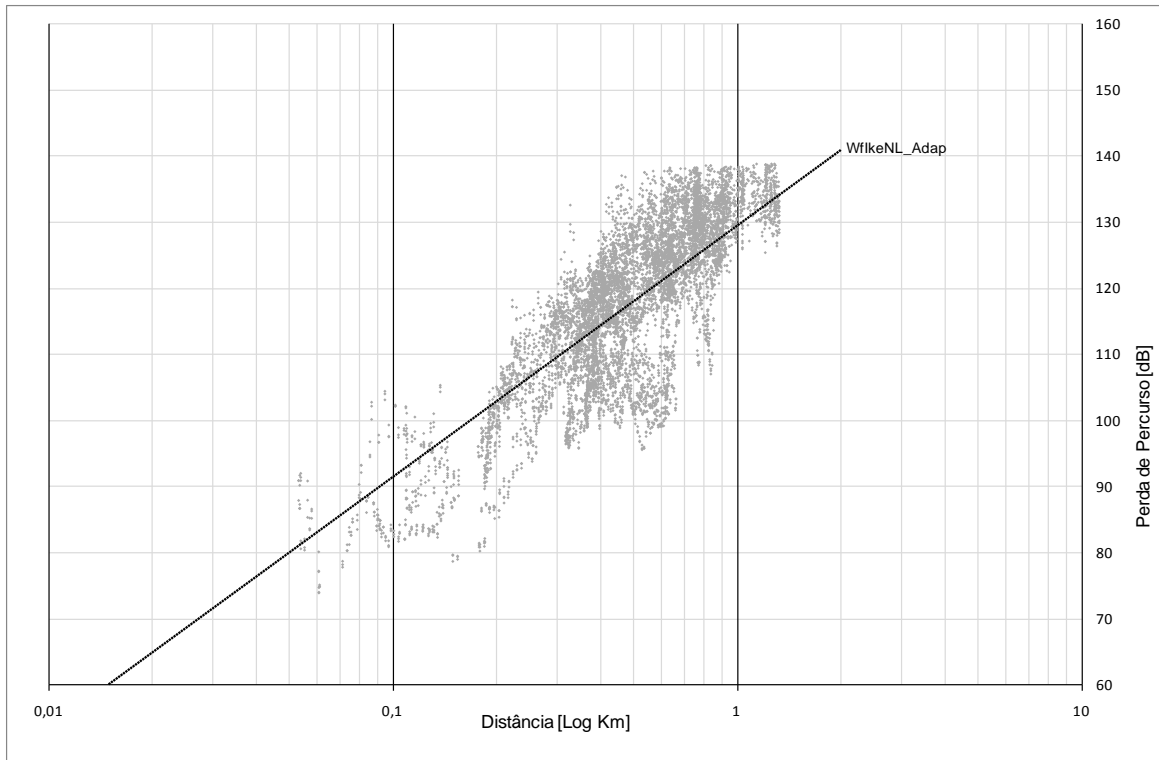


Figura 6.4 - Gráfico com Medições e Modelo Adaptado para a Estação 03.

6.4 Aplicação do Modelo Adaptado na Estação 04

Com base nos dados de altura da Estação 04 ($h_b = 64,5m$), a expressão fica a seguinte:

$$L_{WflikeNL_Adap} \text{ (dB)} = 116,1 + 38 \log d \tag{6.15}$$

$$L_{Regressão} \text{ (dB)} = 125,1 + 36,3 \log d \tag{6.16}$$

A comparação entre as duas expressões consta na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Análise estatística comparativa entre o modelo adaptado e a regressão linear na Estação 04.

Modelo	Média	DesvPad
WflikeNL_Adap	0,51	7,55
Regressão Linear	0,00	7,54

A Figura 6.5 mostra o gráfico comparativo com as medições.

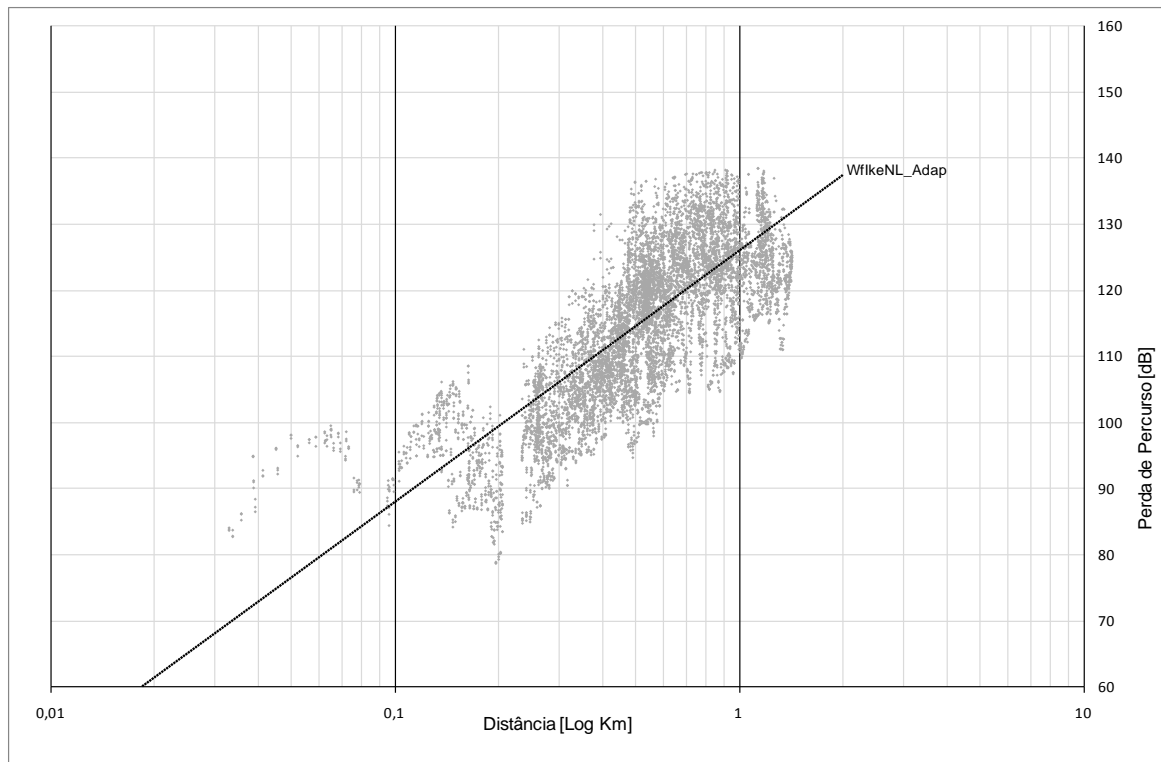


Figura 6.5 - Gráfico com Medições e Modelo Adaptado para a Estação 04.

6.5 Aplicação do Modelo Adaptado na Estação 05

Com base nos dados de altura da estação, a expressão fica a seguinte:

$$L_{WfikeNL_Adap} \text{ (dB)} = 125,3 + 38,0 \log d \tag{6.17}$$

$$L_{Regressão} \text{ (dB)} = 125,0 + 28,0 \log d \tag{6.18}$$

A comparação entre as duas expressões consta na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Análise estatística comparativa entre o modelo adaptado e a regressão linear na Estação 05.

Modelo	Média	DesvPad
WfikeNL_Adap	-2,73	7,75
Regressão Linear	0,00	7,33

A Figura 6.6 mostra o gráfico comparativo com as medições.

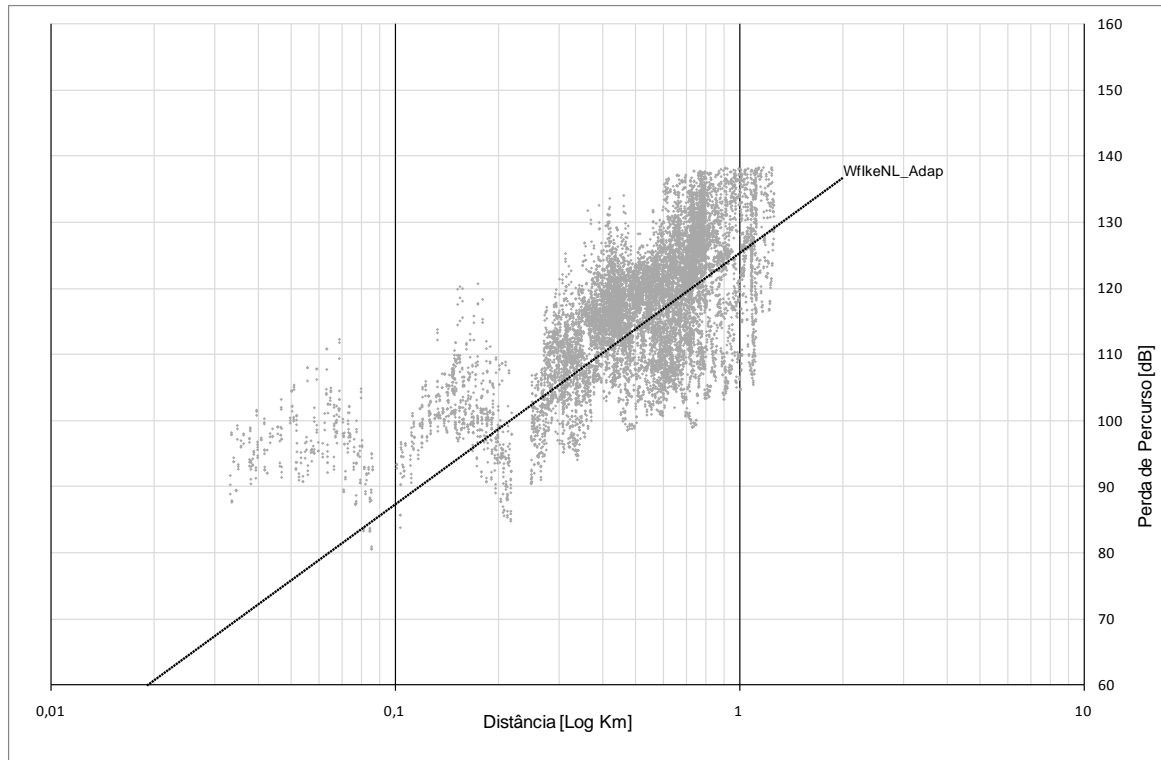


Figura 6.6 - Gráfico com Medições e Modelo Adaptado para a Estação 05.

6.6 Recomendações para Planejamento dos Novos Sistemas LTE

A Tabela 6.7 apresenta os dados estatísticos do modelo proposto quando comparado com as medições.

Tabela 6.7 - Análise estatística comparativa entre medições e o modelo adaptado.

MÉDIA	Modelo	Est01	Est02	Est03	Est04	Est05	Média
	WflikeNL_Adap	0,73	3,32	-0,69	0,51	-2,73	0,23
	WflikeNL_Adap (68%)	-0,08	-1,20	-1,22	0,01	-1,65	-0,83

DESVPAD	Modelo	Est01	Est02	Est03	Est04	Est05	Média
	WflikeNL_Adap	6,92	9,35	7,31	7,55	7,75	7,78
	WflikeNL_Adap (68%)	3,63	4,67	3,76	4,09	4,15	4,06

Segundo o critério de classificação em que um modelo pode ser considerado bom quando 68% dos valores previstos estão dentro de um desvio padrão máximo na faixa de 6 a 8 dB, quando comparado com os valores medidos [9], foram excluídas as medições que ficam fora do intervalo de ± 1 desvio padrão e o resultado para cada estação também consta na Tabela 6.7, denominado WflikeNL_Adap (68%).

Conforme descrito o modelo proposto pode ser considerado bom, permitindo fazer previsões de cobertura em Brasília para novos sistemas LTE com boa confiabilidade. Ainda recomenda-se sua adoção em ferramentas comerciais de planejamento de RF que hoje praticamente utilizam apenas os modelos Hata e COST 231-Hata [12].

Para o planejamento de novos sistemas é imprescindível ter-se uma base comparativa com os sistemas existentes, principalmente para se definir o número de estações no seu lançamento. Neste sentido foram levantadas as estações existentes da Oi em Brasília [10], e especificamente para o sistema GSM que foi escolhido para ser uma referência por ser mais maduro.

Com base nas coordenadas das ERBs foi efetuado cálculo das distâncias entre elas, desconsiderando as isoladas, e obteve-se os seguintes resultados:

$$\text{Raio Médio (Km)} = \frac{1}{6n} \sum_{\text{ERB}=1}^n 1^{\text{a}} \text{Menor Distância} + 2^{\text{a}} \text{Menor Distância} + 3^{\text{a}} \text{Menor Distância} \quad (6.19)$$

O fator $\frac{1}{6n}$ representa a multiplicação de $\frac{1}{2}$ distância para se obter o raio, $\frac{1}{3}$ para se ter a média das 3 menores distâncias e $\frac{1}{n}$ porque foram somadas n estações. Com o resultado da expressão obtem-se o Raio Médio = 0,368 Km.

Analogamente, de posse da altura nas antenas da ERBs obteve-se a altura média, como segue:

$$\text{Altura Média (m)} = \frac{1}{n} \sum_{\text{ERB}=1}^n \text{Altura} = 27,6 \text{ m.} \quad (6.20)$$

Utilizando-se estes valores obtidos e aplicando-se a expressão (6.6) resulta em uma perda $L_{\text{WflikeNL_Adap}}$ (dB) = 122,8 dB.

Esta perda, deduzida da potência de transmissão de 49dBm, recomendada para sistemas LTE pelo IMT [1], resulta no nível de -73,8dBm, suficiente para ter-se cobertura dentro das edificações na borda da ERB, uma vez que está acima do nível de referência, de -75dBm.

Ainda utilizando-se um desvio padrão de 7,8dB, que foi o valor médio obtido nas medições, obtém-se -89,1dBm com 95% de confiança e -93,9dBm com 99%, garantindo um bom nível para *handover*, mesmo utilizando-se de parâmetros de histerese das ERBs.

Vale notar que a aplicação da histerese visa evitar o efeito da troca de *handover* entre as ERBs de origem e destino até que estabilize a zona do melhor servidor, o que aumentaria a probabilidade de queda de chamadas. Ou seja, utilizando-se uma histerese de por volta de 3 a 5dB ainda se teria 99% dos *handover* ocorrendo com níveis acima de -100dBm, que é o valor de referência. Como as metas de queda de chamada utilizadas pelas operadoras em acordo com a Anatel são de 2% [10], este quesito seria plenamente atendido.

Assim, a recomendação para o planejamento dos novos sistemas LTE em Brasília é para que utilizem a proporção de 1:1 com relação ao sistema GSM, garantindo com uma boa confiabilidade a mesma mancha de cobertura para seu lançamento.

No projeto detalhado, recomenda-se utilizar a expressão (6.6), estação a estação, para a predição de cobertura. Para as eventuais regiões críticas em que a operadora tenha que garantir cobertura, poderão ser previstas novas estações.

Logicamente, após a implantação ter-se-á dados estatísticos obtidos a partir de medições de campo e dos sistemas de gerência dos equipamentos, que permitirão os devidos ajustes de otimização de rede, o que não é possível no seu lançamento sem efetuarem-se experimentos de propagação como o aqui descrito.

A boa qualidade de um novo sistema já no seu lançamento adquire suma importância, pois pode comprometer a imagem do produto e conseqüentemente do negócio como um todo pela operadora.

6.7 Conclusões

Utilizando-se como base o sistema GSM da Oi em Brasília, uma nova rede LTE poderia utilizar as mesmas localizações das estações existentes para ter-se a mesma mancha de cobertura no seu lançamento. Vale ressaltar que não se trata de comparação

da cobertura da faixa de frequência de 1,8GHz do GSM com 2,6GHz do LTE. Trata-se da quantidade e localização de estações do sistema GSM maduro de Brasília, que já passou pelo aumento de estações devido a falhas de cobertura e também pela necessidade de tráfego, ser suficiente para que uma nova rede LTE as utilize. Tal constatação tem especial valor tendo-se em vista a grande dificuldade na implantação de novas estações.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

O experimento foi bem sucedido com resultados bastante positivos e conclusivos. A expressão matemática (6.6) para o modelo de propagação foi proposta visando futuras redes LTE na faixa de frequência de 2,6GHz, inclusive ficando bastante próxima a recomendada pelo 3GPP [22], mas sua utilização pode ser ampliada tomando-a como base para desenvolvimento de novas expressões para outras regiões ou frequências, de posse de novos experimentos. Contudo, algumas melhoras podem ser introduzidas para futuras pesquisas.

Uma das melhoras sugeridas seria a utilização de amplificador de potência no caminho da transmissão, com ganho na faixa de 20dB a 30dB para que os níveis radiados fiquem mais próximos aos recomendados pelo IMT [1] para as ERBs.

Como consequência do amplificador poder-se-ia utilizar antena omnidirecional com menor ganho e maior abertura vertical. Ainda seria melhor a utilização de antenas modelo painel com abertura horizontal na faixa de 60 a 120 graus com ajuste elétrico de elevação para eliminar nulos próximos a estação transmissora. Neste caso a logística do experimento se tornaria mais complexa, em que para cada estação seriam necessárias medições setorizadas.

Na prática é bastante complexo, mas extremamente importante separar-se as medições com e sem linha de visada, principalmente quando se opta pela medição de uma grande quantidade de pontos. Isto poderia melhorar significativamente a modelagem no caso do COST-Walfisch-Ikegami. Poder-se-ia melhorar o desvio padrão do modelo adaptado se fosse possível separar as amostras que estão em linha de visada para se aplicar outra expressão matemática, bem como definir para cada uma o ângulo da onda incidente relativo a orientação das ruas.

A utilização de ferramentas de projeto, como CelPlanner do fornecedor CelPlan® Technologies é bastante recomendável. A mesma já possibilita a utilização de bases de dados topográficas, morfológicas, de imagens de alta resolução, de vetores de apoio e referência e de antenas, o que facilita muito a pesquisa. Aliando-se à ferramenta o

modelo adaptado permitiria para cada ponto fazer ajustes que melhorariam muito a confiabilidade da predição.

Outro ponto interessante seria aumentar a taxa de amostragem das medições, permitindo a modelagem do canal também para o desvanecimento rápido.

Idealmente, seria interessante a montagem de uma rede LTE experimental, com os equipamentos de transmissão com as especificações recomendadas pelo 3GPP, bem como os terminais móveis, que acoplados aos equipamentos de medição permitiria fazer um total mapeamento da interface aérea do LTE. Entende-se que 3 ou 4 ERBs ou eNB seriam suficientes. Ainda poder-se-ia aprofundar a pesquisa com os equipamentos integrados a sistemas de gerência, o que abriria uma gama de possibilidades de levantamento de dados estatísticos de desempenho da rede LTE.

-
- [1] Stefania Sesia, Issam Toufik e Matthew Baker, "LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice", 2009 John Wiley & Sons Ltd.
 - [2] Farooq Khan, "LTE for 4G Mobile Broadband - Air Interface Technologies and Performance", 2009 Cambridge University Press.
 - [3] Harri Holma and Antti Toskala, "LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access", 2009 John Wiley & Sons Ltd.
 - [4] Fórum 3G Americas, "The Evolution of Rel-7 to Rel-8 - HSPA and SAE/LTE", pp. 36-39, Dezembro 2007.
 - [5] Fórum 3G Americas, "Mobile Broadband Evolution – The Global Evolution of UMTS/HSPA - 3GPP Release 7 and Beyond", pp. 30-33, Dezembro 2006.
 - [6] Fórum 3G Americas, "The Global Evolution of UMTS/HSDPA - 3GPP Release 6 and Beyond", pp. 26-27, Dezembro 2005
 - [7] Fórum 3G Americas, "3GPP Mobile Broadband Innovation Path to 4G – Release 9 Release 10 and Beyond HSPA+, SAE/LTE and LTE-Advanced", pp. 79-113, Fevereiro 2010.
 - [8] Fórum 3G Americas, "Converge – An Outlook on Device, Service, Network and Technology Trends", pp.19-20, Julho 2005.
 - [9] William C. Y. Lee, "WIRELESS AND CELLULAR TELECOMMUNICATIONS", Third Edition 2006 McGRAW-HILL.
 - [10] www.anatel.gov.br
 - [11] J.D. Parsons, "Mobile Radio Propagation Channel", 2nd Edition 2000 John Wiley & Sons Ltd.
 - [12] John S. Seybold, "INTRODUCTION TO RF PROPAGATION" 2005 by John Wiley & Sons, Inc.
 - [13] Theodore S RAPPAPORT, "Wireless Communications Principles and Practice" 2nd Edition 2002 Prentice Hall PTR.
 - [14] Simon R. Saunders e Alejandro Aragón-Zavala, "Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems", Second Edition 2007 JohnWiley & Sons Ltd.
 - [15] Luis M. Correia, "A View of the COST 231-Bertoni-Ikegami Model", 3ª Conferência Européia de Antenas e Propagação, Berlim, pp. 1681-1685, Março 2009.
 - [16] Hewlett Packard Co. , Manual HP8648C, HP Part No.: 08648-90048, 1998.
 - [17] Rohde & Schwarz GmbH & Co, Manual FSH3.
 - [18] Stella Doradus Ireland Ltd., 2.6GHz 8dBi Omni Directional Antenna Part No.: 26 1360 Specifications.

-
- [19] Mars Antennas & RF Systems, 2.3-2.7 GHz & 4.9-6.1 GHz Dual Band Omni Antenna MA-DBO2455-3 Specifications, 2010.
 - [20] David Tse & Pramod Viswanath, Fundamentals of Wireless Communications, Cambridge University Press, 2005.
 - [21] T. Schwengler, and M. Gilbert, "Propagation models at 5.8 GHz-pathloss and building penetration", IEEE Conferência sobre Rádio e Comunicação Sem Fio, Colorado, pp.119-124, Setembro 2000.
 - [22] 3GPP TR 36.942 V9.1.0 "Radio Frequency (RF) system scenarios (Release 9)", pp. 14-15, Setembro 2010.

