



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

PAULO VINICIUS ALVES DE FREITAS

**Avaliação e Modelagem da Cobertura de Sinal
na faixa de 3,5 GHz para um Ambiente com
*Clutter***

NITERÓI

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

PAULO VINICIUS ALVES DE FREITAS

**Avaliação e Modelagem da Cobertura de Sinal na faixa de 3,5 GHz
para um Ambiente com *Clutter***

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador:

Prof. Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos, D.Sc. – UFF - RJ

NITERÓI - RJ

2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

F862a Freitas, Paulo Vinicius Alves de
Avaliação e Modelagem da Cobertura de Sinal na faixa de
3,5 GHz para um Ambiente com Clutter / Paulo Vinicius Alves de
Freitas ; Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos, orientador.
Niterói, 2021.
89 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2021.m.00969879601>

1. Perda de Propagação. 2. Modelos de Predição. 3.
Cobertura de Sinal. 4. Desvanecimento lento. 5. Produção
intelectual. I. Castellanos, Pedro Vladimir Gonzalez,
orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de
Engenharia. III. Título.

CDD -

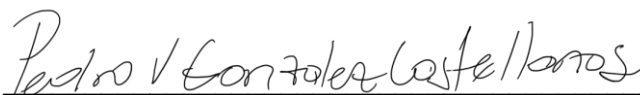
PAULO VINICIUS FREITAS

AVALIAÇÃO E MODELAGEM DA COBERTURA DE SINAL NA FAIXA DE 3.5
GHZ PARA UM AMBIENTE COM CLUTTER

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações da Universidade
Federal Fluminense como requisito parcial para a
Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações.
Área de concentração: Sistemas de
Telecomunicações.

Aprovado em 31 de março de 2021.

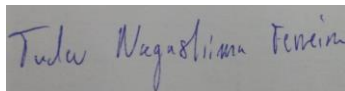
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



Profa. Dra. Leni Joaquim de Matos - Coorientadora
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Tadeu Nagashima Ferreira
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Carlos Vinicio Rodriguez Ron
Instituto Nacional de Metrologia - INMETRO

Niterói
2021

Dedico este trabalho à minha mãe Faustina Alves pelo eterno apoio em minhas decisões e aos meus filhos Vinícius Cavalcante e Beatriz Lopes pela compreensão nos momentos que faltei em dedicação aos estudos.

Agradecimentos

À Deus que nunca me faltou nos momentos mais difíceis da vida.

Aos meus pais, Faustina Alves e Daniel Freitas (*in memoriam*), que não mediram esforços para prover a educação necessária à minha formação pessoal e profissional.

Ao Prof. Dr. Pedro V. Gonzalez Castellanos, meu orientador, que desde o princípio incentivou e apoiou esta caminhada, fornecendo subsídios e ensinamentos preciosos.

Aos meus filhos Vinícius Cavalcante e Beatriz Lopes que, por vezes, não puderam contar com a minha presença em momentos de família e lazer.

A minha esposa Núbia Lopes pela paciência e compreensão nesta jornada.

Ao colega e grande amigo Rodrigo Vieitas, Gerente Regional da Anatel nos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, pelo incentivo e apoio nos momentos mais difíceis.

Aos colegas de mestrado que durante esta caminhada me apoiaram e não me deixaram esmorecer.

À Universidade Federal Fluminense – UFF-RJ pela oportunidade ímpar de aprendizado e crescimento profissional.

*“O que faz andar o barco não é a vela enfunada, mas o vento que
não se vê...”*

Sócrates

Resumo

Este trabalho tem como propósito apresentar os resultados da avaliação e modelagem da cobertura de um sinal na faixa de 3,5 GHz, em ambiente com *clutter*, candidata aos sistemas de quinta geração de comunicações móveis. O ambiente onde foi realizada a sondagem é do tipo suburbano, onde foi possível realizar a validação de modelos consagrados na literatura. Como parte do trabalho, dois modelos de perda de propagação foram propostos, através da caracterização de coeficientes de polinômios de modelo e Recomendação ITU-R existentes, utilizando o método dos mínimos quadrados, algoritmo de *Levenberg-Marquardt*.

Palavras-chaves: Perda de Propagação, Modelos de Predição, Cobertura de Sinal, Desvanecimento lento.

Abstract

This work aims to present the results of the evaluation and modeling of the coverage of a signal in the 3.5 GHz band, in an environment with clutter, candidate for the fifth-generation systems of mobile communications. The environment where the sounding was carried out is of the suburban type, where it was possible to carry out the validation of models established in the literature. As part of the work, two path loss models were proposed, through the characterization of existing path loss model and ITU-R Recommendation, using the method of Non-Linear Least Squares, Levenberg-Marquardt algorithm.

Keywords: *Path Loss, Prediction Models, Coverage, Slow Fading.*

Lista de Figuras

FIGURA 1 – EVOLUÇÃO DO DESEMPENHO NO IMT2020. FONTE: [5]	2
FIGURA 2 – CARACTERÍSTICAS DE APLICAÇÕES DO IMT-2020	4
FIGURA 3 – FENÔMENOS BÁSICOS DE PROPAGAÇÃO. FONTE: [13]	11
FIGURA 4 – PROPAGAÇÃO MULTIPERCURSO. FONTE: [16]	13
FIGURA 5 – DESVANECIMENTO LENTO E RÁPIDO. FONTE: [16]	14
FIGURA 6 – CATEGORIAS DE MODELOS DE PROPAGAÇÃO	20
FIGURA 7 – CONCEITO E TERMINOLOGIA EM PERDAS DE TRANSMISSÃO EM UM CANAL RÁDIO MÓVEL. FONTE: [22].....	21
FIGURA 8 – DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA O CASO ESPECÍFICO – NLOS. FONTE: [12].....	30
FIGURA 9 – COMPONENTE NO PLANO HORIZONTAL. FONTE: [24]	31
FIGURA 10 – REGIÕES DE ONDAS DOMINANTES. FONTE: [12]	37
FIGURA 11 – EDIFÍCIO CUJO TOPO SERVIU DE LOCAL PARA O TRANSMISSOR	38
FIGURA 12 – AMBIENTE DE MEDIÇÕES. FONTE: <i>GOOGLE EARTH</i>	38
FIGURA 13 – <i>SET-UP</i> DE TRANSMISSÃO	39
FIGURA 14 – CURVA DE LINEARIDADE DO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA	41
FIGURA 15 – ÂNGULO DE MEIA POTÊNCIA DA ANTENA HG3515P-120	41
FIGURA 16 – ANTENA <i>HYPERLINK WIRELESS</i> - HG3515P-120.....	41
FIGURA 17 – <i>SET-UP</i> DE RECEPÇÃO	42
FIGURA 18 – ROTA REALIZADA PARA AS MEDIÇÕES. FONTE: <i>GOOGLE EARTH</i>	45
FIGURA 19 - DADOS RESULTANTES DO PÓS PROCESSAMENTO DOS DADOS CAPTURADOS NAS ROTAS DE MEDIÇÃO.....	46
FIGURA 20 – FUNÇÃO “ <i>CFTOOL</i> ” DO MATLAB® Ex.: AJUSTE P.1411 MODIFICADA	48

FIGURA 21 – AMBIENTE DE MEDIÇÕES SANEADO. FONTE: <i>GOOGLE EARTH</i>	51
FIGURA 22 – INTENSIDADE DE POTÊNCIA RECEBIDA (DBM).....	51
FIGURA 23 – LOG-DISTANCIA X MEDIÇÕES NLOS (DB).....	52
FIGURA 24 – ECC-33 X MEDIÇÕES.....	54
FIGURA 25 – MEDIÇÕES X ITU-R P.2108	55
FIGURA 26 – ITU-R P.1411 (NLOS) X MEDIÇÕES	56
FIGURA 27 – ITU R P.1411 URBANO (NLOS) X MEDIÇÕES.....	57
FIGURA 28 – PONTOS DE MEDIÇÃO RELATIVOS ÀS RUAS PARALELAS	58
FIGURA 29 – SUI X MEDIÇÕES.....	60
FIGURA 30 – MODELOS X MEDIÇÕES	61
FIGURA 31 – MODELO SUI PARAMETRIZADO (<i>CFTOOL</i>).....	64
FIGURA 32 – REC. P.1411 CASO ESPECÍFICO NLOS PARAMETRIZADA (<i>CFTOOL</i>)	65
FIGURA 33 – P.1411 URBANO NLOS E SUI – MODELOS PROPOSTOS.....	66
FIGURA 34 – ERROS DOS DIVERSOS MODELOS E DOS PROPOSTOS	67

Lista de Tabelas

TABELA 1 – FAIXAS IMT PARA AS BANDAS BAIXA E MÉDIA. FONTE: [6].....	5
TABELA 2 – CENÁRIOS ITU-R P.2108.....	27
TABELA 3 – COEFICIENTES BÁSICOS DE PERDA DE PROPAGAÇÃO	29
TABELA 4 – PARÂMETROS Γ	34
TABELA 5 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO <i>SET-UP</i> DE TRANSMISSÃO	40
TABELA 6 – PARÂMETROS DO <i>SET-UP</i> DE TRANSMISSÃO.....	42
TABELA 7 – <i>SET-UP</i> DE RECEPÇÃO	43
TABELA 8 – GANHOS E PERDAS NO <i>SET-UP</i> DE RECEPÇÃO	43
TABELA 9 – ERROS LOG-DISTÂNCIA.....	53
TABELA 10 – ERROS ECC-33 CM	54
TABELA 11 – ERROS ECC-33 CG	54
TABELA 12 – ERRO ITU-R P.2108 + FRIIS.....	56
TABELA 13 – ERRO ITU-R P.1411 (NLOS)	57
TABELA 14 – ERRO ITU R P.1411 URBANO (NLOS)	57
TABELA 15 – ERRO SUI	60
TABELA 16 – ERRO DOS MODELOS	62
TABELA 17 – ERROS DO MODELO SUI PARAMETRIZADO	64
TABELA 18 – ERROS REC. P.1411 CASO ESPECÍFICO NLOS PARAMETRIZADA.....	66

Lista de Abreviaturas e Siglas

1G	Primeira Geração de Comunicações Móveis
1xRTT	<i>1x Radio Tansmission Technology</i>
2G	Segunda Geração de Comunicações Móveis
3G	Terceira Geração de Comunicações Móveis
4G	Quarta Geração de Comunicações Móveis
5G	Quinta Geração de Comunicações Móveis
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
EB/mês	<i>ExaBytes/mês (10^{18})</i>
ECC	<i>Electronic Communication Commitee</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates For GSM Evolution</i>
eMBB	<i>enhanced Mobile Broadband</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>
HSPA+	<i>High Speed Packet Access - Plus</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>
LoS	<i>Line of Sight</i>

LTE	<i>Long Term Evolution</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
MMDS	<i>Multichannel Multipoint Distribution Service</i>
mMTC	<i>massive Machine Type Communications</i>
mmWave	<i>Milimeter Wave</i>
NLoS	<i>Non Line of Sight</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PN	<i>Pseudo-Noise</i>
RCS	<i>Radar Cross Section</i>
RDS	<i>Rádio Definido por Software</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SD	<i>Standart Deviation</i>
SHF	<i>Super High Frequency</i>
UHD	<i>Ultra High Definition</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
uRLLC	<i>Ultra-Reliable and Low Latency Communications</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VHF	Very High Frequency
WCDMA	Wide-Band Code-Division Multiple Access
WRC	World Radiocommunication Conference

Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 ESTADO DA ARTE.....	2
1.2 MOTIVAÇÃO	6
1.3 OBJETIVO	7
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	8
CAPÍTULO 2 - O CANAL RÁDIO MÓVEL	9
2.1 MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO	9
2.1.1 REFLEXÃO	9
2.1.2 DIFRAÇÃO	10
2.1.3 ESPALHAMENTO.....	10
2.1.4 PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE	12
2.1.5 PROPAGAÇÃO MULTIPERCURSO	12
2.1.5.1 Desvanecimento Rápido	14
2.1.5.2 Desvanecimento Lento.....	16
CAPÍTULO 3 - MODELOS DE PROPAGAÇÃO.....	18
3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS AMBIENTES	20
3.2 PERDAS DE TRANSMISSÃO.....	20
3.3 MODELO ESPAÇO LIVRE	22
3.4 MODELO LOG-DISTÂNCIA	23
3.5 MODELO ECC33	24
3.6 RECOMENDAÇÃO ITU-R P.2108 – CLUTTER LOSS	26
3.7 RECOMENDAÇÃO ITU-R P.1411 – CASO GERAL	28
3.8 RECOMENDAÇÃO ITU-R P.1411 – CASO ESPECÍFICO	30
3.9 MODELO <i>STANDFORD UNIVERSITY INTERIM</i> (SUI)	33
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA DE MEDIÇÕES	36
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO CANAL RÁDIO EM BANDA ESTREITA	36
4.2 AMBIENTE DE MEDIÇÕES	37
4.3 SET-UP DE MEDIÇÕES.....	39
4.3.1 SET-UP DE TRANSMISSÃO.....	39
4.3.2 SET-UP DE RECEPÇÃO.....	42
4.4 METODOLOGIA	43
4.5 CAMPANHA DE MEDIÇÕES	45
CAPÍTULO 5 - PROCESSAMENTO DOS DADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	47
5.1 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS	47
5.2 ANÁLISE DE ERROS DE PREDIÇÃO	49
5.2.1 ERRO ABSOLUTO MÉDIO	49
5.2.2 DESVIO PADRÃO	49
5.2.3 ERRO MÉDIO QUADRÁTICO – RMS	50
5.3 AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE PERDA DE PROPAGAÇÃO	50
5.3.1 MODELO LOG-DISTÂNCIA	52
5.3.2 MODELO ECC-33	53
5.3.3 RECOMENDAÇÃO ITU-R P.2108	55
5.3.4 RECOMENDAÇÃO ITU-R P.1411 - GERAL	56
5.3.5 RECOMENDAÇÃO ITU-R P.1411 – CASO ESPECÍFICO	57
5.3.6 MODELO SUI	60
5.4 RESUMO MODELOS	61

5.5	MODELOS PROPOSTOS	62
5.5.1	PARAMETRIZAÇÃO MODELO SUI.....	63
5.5.2	PARAMETRIZAÇÃO REC. P.1411 - CASO ESPECÍFICO	65
5.6	ANÁLISE DOS MODELOS PROPOSTOS	66
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO.....		68
6.1	TRABALHOS FUTUROS	69
BIBLIOGRAFIA.....		71

Capítulo 1 - Introdução

Inegável é o fato que o avanço das gerações tecnológicas das comunicações móveis, a expansão das respectivas redes, a massificação do uso das tecnologias, em especial a de quarta geração, a simplificação da utilização dos dispositivos e aplicativos pelos usuários trouxeram novas facilidades e aplicações que transformaram, drasticamente, em poucos anos, a forma como o homem vive, se relaciona e produz.

O tráfego mundial de dados móveis em 2019 atingiu cerca de 33 ExaBytes (EB)/mês e seu crescimento possui característica exponencial com previsão de superar 164 EB/mês em 2025 [1].

As gerações de comunicações móveis tiveram início na década de 80 (1G), com sistemas analógicos que proviam apenas serviços de voz aos usuários, como o sistema AMPS.

Na década de 90, porém, os sistemas digitais de segunda geração (2G), GSM e CDMA, permitiam também a oferta de dados por pacotes sem a necessidade de se estabelecer uma conexão permanente, em taxas teóricas de até 473,6 kbps, através das tecnologias GPRS, EDGE e 1xRTT.

Para a terceira geração (3G), a *International Telecommunication Union* (ITU) estabeleceu o *International Mobile Telecommunications-2000* (IMT) que é referência global para os padrões requeridos aos sistemas de terceira geração de comunicações móveis para o ano 2000. As tecnologias desenvolvidas WCDMA e HSPA+ podem fornecer taxas teóricas no *downlink* acima de 256 kbps até 100 Mbps, o que possibilitou introduzir a utilização de serviços multimídia e de *streaming* de áudio e vídeo. A latência mínima teórica apresentada nesta geração é de 10 ms [2] [3].

A quarta geração (4G) foi implementada após 2010 e segue em expansão na atualidade, em linha com o padrão global *IMT-Advanced* definido para o 4G pela ITU. As respectivas tecnologias LTE e *LTE-Advanced* trouxeram grandes ganhos de desempenho às redes. Em especial, taxas teóricas de *downlink* e *uplink* maiores foram providas podendo chegar a 1 Gbps e 0,5 Gbps, respectivamente, com latência mínima de 5 ms [2].

Novos serviços de banda larga puderam ser implementados como o *streaming* de vídeo, de música em alta qualidade, videoconferência, jogos *multiplayer* em tempo real, entre vários outros.

Ressalta-se que o avanço da tecnologia para o terminal móvel, culminando na concepção do *smartphone*, associado à massificação do acesso ao Serviço Móvel Pessoal (SMP) e o desenvolvimento contínuo de aplicativos para os mesmos, foram propulsores ao desenvolvimento de novos padrões e tecnologias de comunicações móveis capazes de absorver a alta demanda de tráfego de dados que se impôs conseqüentemente.

Para a denominada quinta geração de comunicação móvel (5G) a ITU em 2015 criou o IMT2020 que estabeleceu padrões e requerimentos globais para redes, serviços e dispositivos.

1.1 Estado da Arte

O IMT2020 propõe novas características aos sistemas móveis que incluem a possibilidade de implementar novas aplicações e funcionalidades que venham requerer altíssimas taxas de *downlink* e *uplink*, uma enorme quantidade de dispositivos conectados em uma mesma área, latência muito baixa e aplicações que necessitem de alta confiabilidade na rede [4]. Essa proposta traz considerável ganho em quesitos técnicos importantes às novas aplicações emergentes. A Figura 1 resume as principais evoluções de desempenho em relação ao *IMT Advanced*.

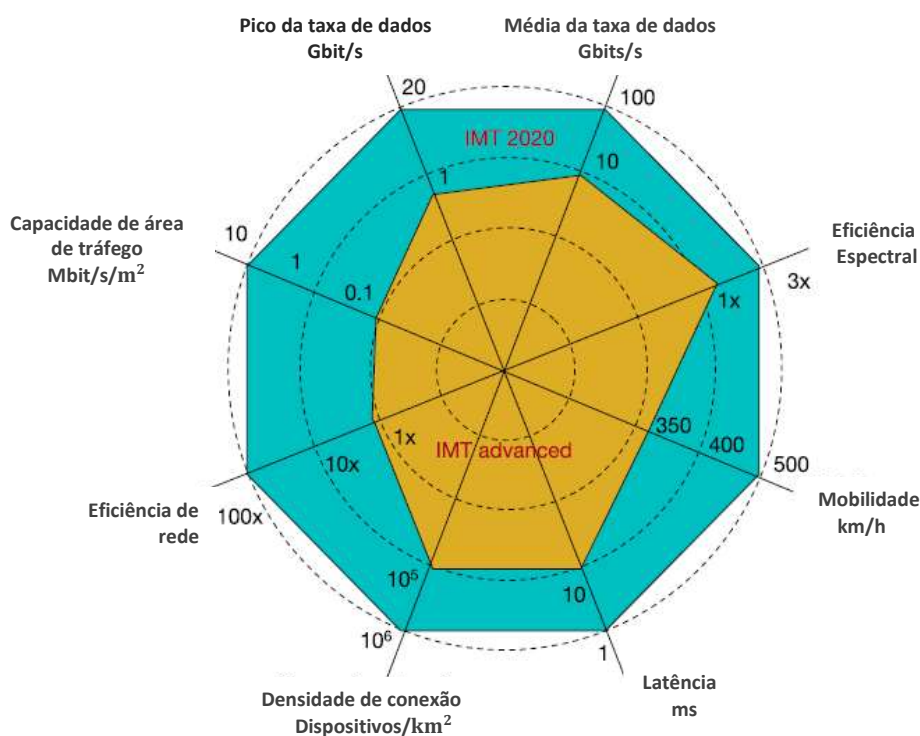


Figura 1 – Evolução do desempenho no IMT2020. Fonte: [5]

A rede deverá suportar a comunicação em baixa latência e alta confiabilidade para aplicações voltadas a usuários humanos e máquinas. Baixo tempo de resposta possibilitará o desenvolvimento de novos serviços em nuvem, serviços de realidade virtual e aplicações que utilizem o conceito de realidade aumentada. Alta confiabilidade associada à baixa latência proporcionará o desenvolvimento de aplicações M2M que necessitem de tomada de decisão em tempo real em situações críticas.

O sistema propõe satisfazer a experiência do usuário mesmo em ambientes ou áreas com alto número de dispositivos conectados à rede, como em um estádio lotado, shopping centers, ou em um centro urbano densamente povoado, mantendo as características de conexão e acesso.

O IMT2020 propõe também que a comunicação se mantenha robusta, confiável e com alto desempenho mesmo quando o usuário ou dispositivo esteja em movimento em alta velocidade.

Espera-se que novas aplicações multimídias sejam acrescentadas às existentes, como aquelas voltadas à saúde e segurança pública, transmissão de múltiplos vídeos em *Ultra High Definition* (UHD), projeções 3D, videoconferência imersiva, realidade virtual e aumentada, entre outras novas aplicações que venham demandar altíssimas taxas de transmissão.

A internet das coisas poderá ser plenamente desenvolvida considerando as características de rede previstas pelo IMT2020. Estima-se que haverá mais dispositivos conectados do que *smartphones* em uso no futuro. Serão dispositivos como sensores, câmeras, atuadores, veículos, etc., que podem ter diferentes demandas de taxas de transmissão e latência, de acordo com as aplicações. Como exemplo, um sensor *wireless* que indique a umidade do terreno de uma determinada plantação não necessita de baixa latência, nem alta taxa de transmissão de dados, porém, precisa estar coberto pela rede 5G no momento em que realizar o *data dump*.

Conforme ilustrado pela Figura 2, as características de demandas para a quinta geração foram organizadas em três cenários para diferentes aplicações possíveis do sistema: *enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *Ultra-Reliable and Low Latency Communications* (URLLC) e *massive Machine Type Communications* (mMTC) [4].

O eMBB é o cenário que representa o aprimoramento da conectividade em banda larga experimentada pelos usuários do SMP em relação aos padrões atuais do *LTE Advanced*. O usuário irá experimentar a conexão em serviços multimídia, serviços em tempo real e streaming em altíssima velocidade e baixa latência.

O cenário uRLLC demanda requisitos rigorosos de baixa latência e confiabilidade que visa principalmente comunicações tipo máquina. Entre as aplicações previstas cita-se a automação de processos fabris com dispositivos integrados à rede 5G, a cirurgia médica remota, veículos sem condução humana ou conduzidos remotamente em tempo real, entre outros.

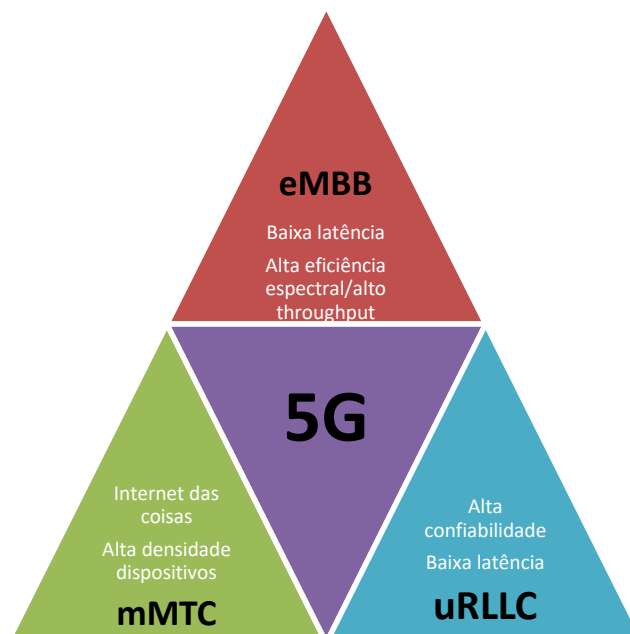


Figura 2 – Características de aplicações do IMT-2020

O mMTC tem como alvo propiciar o desenvolvimento da internet das coisas fornecendo conexão massiva aos dispositivos e máquinas que utilizam baixo tráfego de dados e transmissão esporádica, onde baixa latência não é um requisito rigoroso.

O IMT define padrões em escala global para os serviços móveis de telecomunicações. A definição de faixas de frequências sinaliza aos *stakeholders*, a direção dos investimentos e esforços desejáveis nos anos seguintes.

O 5G possuirá a característica de suportar aplicações em diferentes faixas de frequências de forma otimizada, usando espectro de banda baixa, abaixo de 1 GHz, de banda média, entre 1 GHz e 6 GHz, denominada em alguns artigos como faixa Sub-6GHz, e banda alta, acima de 6 GHz, também chamada de faixas milimétricas (*mmWave*).

O espectro de banda baixa é aplicável para os casos em que a cobertura, a alta mobilidade e a alta confiabilidade são requisitos essenciais às aplicações nos cenários uRLLC e mMTC.

Os espectros de banda média e alta serão utilizados, primordialmente, no cenário eMBB onde taxas de pico de até 20 Gbps podem ser entregues aos usuários e taxas típicas de 100 Mbps em áreas com grande número de dispositivos conectados. Com a eficiência espectral otimizada, tais taxas de transmissão somente poderão ser atingidas se canais com largura de banda da ordem de centenas de MHz forem disponibilizados, o que é factível em faixas mais altas, de ondas milimétricas [5] [6].

A ITU já atribuiu durante a última *World Radiocommunication Conference* (WRC 2015) várias bandas ao IMT, que podem ser utilizadas pela quinta geração, conforme indicado na tabela 1 que apresenta a atribuição das bandas baixa e média [6].

No Brasil, a Anatel definiu as faixas em banda média que atenderão ao IMT2020. São as faixas compreendidas entre 2.300 MHz à 2.390 MHz, que é destacada para harmonização mundial, e entre 3.300 MHz a 3.700 MHz, que se propõe atender ao cenário eMBB.

A licitação de faixas de radiofrequência tem previsão para ocorrer no primeiro semestre de 2021 no Brasil.

Frequências de bandas baixa e média

ITU-R (Bandas IMT)
450–470 MHz
698–960 MHz
1427–1518 MHz
1710–2025 MHz
2110–2200 MHz
2300–2400 MHz
2500–2690 MHz
3300–3400 MHz
3400–3600 MHz
3600–3700 MHz
4800–4990 MHz

Tabela 1 – Faixas IMT para as bandas baixa e média. Fonte: [6]

Importa salientar que grande parte das aplicações e dispositivos da quinta geração estará fortemente inserida em ambiente com *clutter*, ou seja, terminais transceptores próximos a objetos na superfície da Terra, tais como edifícios ou vegetação que próximos às antenas transmissoras e/ou receptoras afetam significativamente a propagação do sinal radioelétrico.

Recomendações ITU sobre modelos preditivos de perdas de propagação estão sendo revisadas, considerando a caracterização dos canais radiopropagação em ambiente com *clutter* nas faixas a serem utilizadas pela quinta geração de comunicações móveis.

Modelos de perda de propagação com *clutter* são estatísticos por natureza, considerando que as estações podem estar protegidas por edifícios ou vegetações, assim, uma metodologia de cálculo detalhado para um caso geral pode ser difícil de se formular, pois as perdas devido ao *clutter* devem ser consideradas de acordo com os cenários onde as estações encontram-se inseridas.

1.2 Motivação

A quinta geração de comunicações móveis irá utilizar novas faixas do espectro radioelétrico, o que motivou novos estudos de comportamento de canais de radiopropagação nos cenários previstos para as aplicações decorrentes.

A Anatel anunciou a inclusão das faixas seguintes para a licitação dos sistemas de quinta geração: 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e 26 GHz.

Um dos principais cenários em que o 5G estará inserido é o ambiente urbano que se caracteriza pela utilização de sistemas com antenas e dispositivos em baixas alturas, múltiplos caminhos indiretos entre o transmissor e receptor devido a objetos estáticos e móveis ao redor.

No contexto das telecomunicações, um ambiente com *clutter* refere-se a objetos, como prédios ou vegetação, dispostos de forma desordenada, que estão na superfície da Terra, mas não o terreno em si. A desordem de tais objetos em torno de um terminal transceptor de rádio pode ter um efeito significativo na propagação geral. Normalmente é o *clutter* mais próximo do terminal que tem maior efeito na propagação [7].

A propagação multipercurso é significativamente relevante em ambiente urbano onde prevalece a desordem de objetos dispersores e/ou refletores como edifícios, veículos em movimento, ruas pavimentadas, estruturas metálicas etc. Assim, o sinal recebido em *clutter* urbano é o resultado da soma de vários componentes com amplitudes e fases diferentes, de acordo com a direção de chegada do sinal transmitido.

Modelos de predição são usados extensivamente no planejamento de redes móveis, especialmente para a realização de estudos de viabilidade, estudos de interferência e durante a implantação inicial. A utilização desses modelos é adequada para os ambientes em que é possível definir sua principal característica: rural, suburbano, urbano ou densamente urbano.

Os modelos podem ser amplamente categorizados em três tipos: empírico, determinístico e estocástico [8]. Vários deles foram desenvolvidos e publicados, alguns sob

recomendações da ITU. Exemplos de modelos mais conhecidos são: Log-Distância, *Okumura-Hata*, Cost231-Hata, ECC33, *Stanford University Interim* (SUI), ITU-R P.1411, ITU-R P.2108, ITU-R 1546 e etc.

1.3 Objetivo

O objetivo desse trabalho consiste na avaliação e modelagem da cobertura de sinal na faixa de 3,5 GHz para um ambiente com *Clutter*, através da análise de dados coletados em campanha de medição, e na avaliação em relação aos modelos de predição concebidos para a respectiva faixa, que será licitada para o sistema de quinta geração, cujas aplicações principais estarão, majoritariamente, inseridas em ambiente com *clutter* urbano.

Com o incremento na ocupação do espectro em faixas superiores ao VHF e UHF devido, especialmente, aos sistemas de comunicações móveis, a demanda por modelos de propagação mais adequados e confiáveis também cresceu, desde o final da década de 60 até os dias de hoje [9]. Assim, faz-se necessário validar a utilização de alguns modelos empíricos, concebidos em estudos ao redor do mundo, em cenários reais dos centros urbanos e suburbanos das cidades brasileiras. Nesse trabalho, optou-se pela utilização de modelos empíricos pela sua fácil implementação e aceitação no meio acadêmico.

Como parâmetros estatísticos para a avaliação dos resultados foi utilizada a Raiz do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error* - RMSE), ou erro RMS, e o Desvio Padrão (*Standart Deviation* - SD), de cada modelo de predição, em relação aos dados coletados na campanha de medição realizada pela UFF-RJ, em 08 de fevereiro de 2018. Os parâmetros estatísticos citados serão detalhados, posteriormente, no Capítulo 5.

O ambiente relativo à campanha de medição realizada pela UFF-RJ possui as características de um ambiente tipicamente urbano/suburbano, com alta concentração de veículos e diversas construções.

1.4 Estrutura do Trabalho

O desenvolvimento do trabalho está organizado em seis capítulos.

No capítulo 2 é descrita a teoria para a caracterização do canal rádio móvel e os mecanismos de propagação de ondas eletromagnéticas.

No capítulo 3 há um maior aprofundamento dos modelos de propagação e descrição dos que foram aplicados neste trabalho.

O capítulo 4 apresenta o *set-up* das medições onde os ambientes, os equipamentos utilizados na transmissão e na recepção do sinal durante as campanhas de medição e a respectiva metodologia empregada, são destacados.

No capítulo 5, é realizada a descrição do processamento dos dados coletados, da metodologia estatística empregada para avaliação dos resultados e dois modelos de perda de propagação são propostos.

O capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas no trabalho e sugestões para pesquisas em trabalhos futuros.

Capítulo 2 - O Canal Rádio Móvel

O canal de rádio móvel impõe limitações fundamentais para o desempenho de redes móveis. Diferentemente dos canais que são estacionários e previsíveis, como enlaces fixos ponto a ponto de radiofrequência ou meios confinados, o canal rádio móvel é aleatório, uma vez que objetos próximos ao transmissor e/ou receptor podem se mover de forma imprevisível alterando a resposta do canal em função do tempo.

A modelagem do canal de rádio é uma das partes mais complexas no projeto de rede sem fio e, geralmente, é realizada de forma estatística, especificamente para o ambiente e faixa de frequência desejada [10].

A caracterização de canal rádio móvel é o estudo do comportamento do canal sobre o sinal desejado, onde o objetivo é prover subsídios técnicos em projetos de redes móveis, visando usar as formas de modulação de maneira eficiente, buscando aumentar as taxas de transmissão de forma significativa [11].

2.1 Mecanismos de Propagação

Os mecanismos envolvendo a propagação das ondas eletromagnéticas são diversos, mas as perdas de percurso podem ser atribuídas à reflexão, difração e dispersão.

2.1.1 Reflexão

A reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética em propagação colide com um objeto que possui dimensões muito maiores do que o comprimento de onda desta onda. Se a onda plana incidir em um dielétrico perfeito, parte da energia é transmitida para o segundo meio, parte é refletida de volta para o primeiro meio e não existe perda de energia por absorção. Se o segundo meio é um condutor perfeito, então toda energia incidente é refletida de volta ao primeiro meio sem perdas. Em analogia à teoria óptica, a intensidade do campo elétrico das ondas refletida e transmitida pode estar relacionada à onda original incidente no meio através do coeficiente de reflexão de Fresnel Γ . O coeficiente de reflexão é uma função das propriedades do material, e geralmente depende da polarização da onda, ângulo de incidência e frequência da onda em propagação [10].

Em ambiente urbano as reflexões ocorrem geralmente em prédios, casas, ruas e veículos. Em ruas com edificações em ambos os lados, a múltipla reflexão do sinal nas construções pode causar um efeito “*Street Canyon*” [12], afetando de forma diferenciada a perda de propagação nessa condição.

2.1.2 Difração

A difração ocorre quando há obstrução no caminho entre o transmissor e o receptor por superfície que possui quinas. As ondas secundárias resultantes da superfície de obstrução estão presentes pelo espaço e até mesmo por trás do obstáculo, fazendo surgir uma curvatura de ondas em torno dele, até mesmo quando não existe um caminho de visada entre o transmissor e o receptor. O fenômeno da difração pode ser explicado pelo princípio de *Hyugen*, que afirma que todos os pontos em uma frente de onda podem ser considerados como fontes pontuais para a produção de fontes secundárias, e essas ondas secundárias se combinam para produzir uma nova frente de ondas na direção da propagação. A intensidade do campo de uma onda difratada na região sombreada é a soma vetorial dos componentes do campo elétrico de todas as ondas secundárias no espaço em torno do obstáculo [10].

Em altas frequências, a difração, assim como a reflexão, depende da geometria do objeto, além da amplitude, fase e polarização da onda incidente no ponto de difração.

Em ambientes urbanos, a difração ocorre geralmente dos topos das edificações, “*roof-top*” para as ruas e no cruzamento entre elas [12].

2.1.3 Espalhamento

A dispersão ou espalhamento ocorre quando a onda incidente se depara com grande quantidade de objetos que possuem dimensões físicas menores que seu comprimento de onda ou superfícies ásperas ou rugosas. Geralmente, estes objetos em ambientes urbanos constituem-se de folhagens, postes e fios.

O sinal real recebido em ambiente rádio móvel normalmente é mais forte do que o previsto apenas pelos fenômenos de reflexão e difração. Isso porque, quando uma onda de rádio se choca com uma superfície áspera, a energia refletida é espalhada em todas as

direções devido à dispersão. Objetos como árvores e postes tendem a dispersar a energia em todas as direções, oferecendo assim energia de rádio adicional em um receptor.

Como exemplo da teoria do fenômeno da dispersão, para sistemas de rádio móvel urbanos, são os modelos baseados na equação de radar biestático, que podem ser usados para calcular a potência recebida devido à dispersão no campo distante [10]. Neste caso tem-se:

$$P_R(\text{dBm}) = P_T(\text{dBm}) + G_T(\text{dBi}) + 20 \log(\lambda) + \text{RCS}[\text{dB.m}] - 30 \log(4\pi) - 20 \log d_T - 20 \log d_R \quad (2.1)$$

onde d_T e d_R são as distâncias do objeto disperso ao transmissor e ao receptor, respectivamente. A variável RCS, Seção Cruzada de Radar, é definida como a razão entre a densidade de potência do sinal disperso na direção do receptor e a densidade de potência da onda de rádio incidente no objeto de dispersão.

Valores RCS foram obtidos para diversas cidades europeias. Para prédios de tamanho médio e grande, localizados entre 5 e 10 km de distância, os valores RCS estiveram na faixa de 14,1 a 55,7 [dB.m] [10].

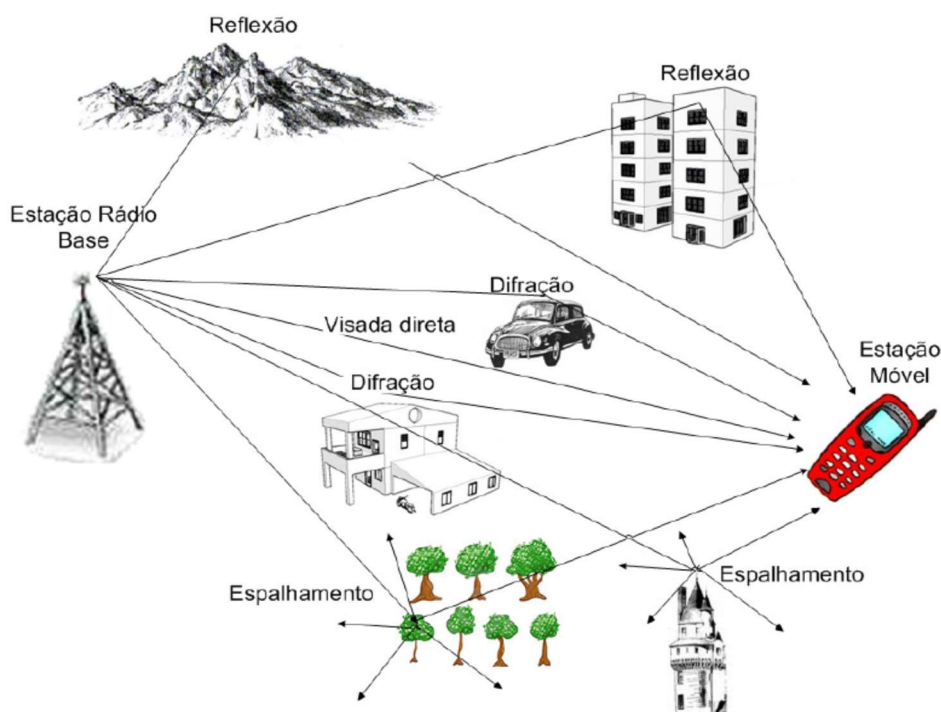


Figura 3 – Fenômenos básicos de propagação. Fonte: [13]

2.1.4 Propagação no espaço livre

A propagação da onda eletromagnética no espaço livre sofre atenuação de acordo a distância entre transmissor e receptor e o comprimento de onda do sinal. Na prática, este tipo de atenuação é predominante quando há visada entre o transmissor e o receptor (*Line of Sight* – LoS).

No espaço livre, a relação entre a potência transmitida P_t e a potência recebida P_r na frequência f é dada por:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t G_r}{L} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.2)$$

onde G_t e G_r são os ganhos das antenas transmissora e receptora, respectivamente. A distância entre o transmissor e o receptor é dada por d . O comprimento de onda é dado por λ e L representa o fator de perda do sistema não relacionado à propagação, sendo $L \geq 1$.

A equação (2.2) também é conhecida como equação do espaço livre de *Friis*.

Então a potência do sinal em LoS decresce com o quadrado da distância. Em forma logarítmica, em dB, temos:

$$10\log_{10}P_r = 10\log_{10}P_0 - 20\log_{10}d \quad (2.3)$$

A equação (2.3) revela que a potência do sinal tem perda de 20 dB/década em função da distância no espaço livre [14]. A perda de propagação no espaço livre, conhecida como polinômio ou equação de *Friis* pode ser descrita na forma logarítmica onde f representa a frequência de operação em MHz e d distância entre transmissor e receptor em km [15] :

$$P_{L_{Friis}} = 32,45 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d) \quad (2.4)$$

2.1.5 Propagação Multipercurso

A propagação multipercurso ocorre quando o sinal recebido advém de caminhos múltiplos, sem visada (*Non Line of Sight* - NLoS), além do caminho direto ou visada LoS, devido aos fenômenos de reflexão, difração e, especialmente, dispersão. Assim, o sinal

recebido de um mesmo transmissor será a composição resultante em amplitude e fase das ondas propagadas em caminhos múltiplos.

Os modelos de propagação que realizam predição baseada na intensidade média do sinal recebido em função da distância para transmissor são chamados de modelos de propagação em larga escala, pois caracterizam o sinal para grandes distâncias de separação entre transmissor e receptor, onde há um desvanecimento lento no nível médio da intensidade do sinal. Modelos de propagação que caracterizam flutuações rápidas da intensidade do sinal recebido para curtas distâncias entre o transmissor e receptor (da ordem de alguns comprimentos de onda) ou para curtas durações (da ordem de segundos) são chamados de modelos em pequena escala, onde há um desvanecimento rápido do sinal [10].

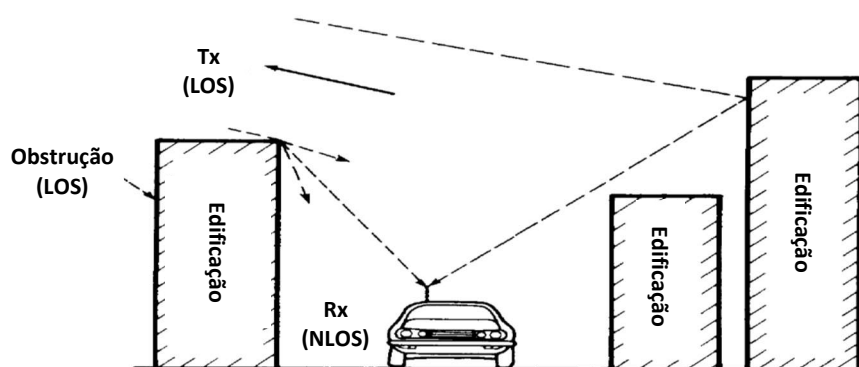


Figura 4 – Propagação Multipercurso. Fonte: [16]

As redes móveis operam em cidades onde o ambiente urbano composto por edificações, arruamentos, veículos em movimento fazem com que o sinal transmitido não possua visada com o receptor, de acordo com o perfil do terreno e edificações. Não apenas a topografia do terreno, mas principalmente, a morfologia e as edificações, geram grande dispersão no sinal recebido, pois há muitos objetos irregulares circundantes estáticos ou em movimento, com constantes dielétricas diferentes. Além disso, as componentes espectrais do sinal podem ser deslocadas em frequência pelo efeito *Doppler*, em diferentes níveis devido ao movimento do terminal móvel ou de objetos refletoras, tais como veículos. Devido a essa desordem comum em ambientes urbanos, o sinal radio móvel é tratado estatisticamente. A amplitude, a fase e a frequência do sinal recebido costumam, na média, variar aleatoriamente de acordo com algumas distribuições de probabilidade, dentre elas: *Rayleigh*, *Rice* e *Nakagami*.

A intensidade do sinal resultante da variabilidade espacial pode ser vista como tendo dois comportamentos. O primeiro, decorrente do desvanecimento rápido, que varia ao longo

de distâncias da ordem de um comprimento de onda, ou fração dele, e é devido, principalmente, às diferenças de fase entre diferentes componentes de sinal. O segundo decorrente do desvanecimento lento, que varia ao longo de distâncias maiores, devido, principalmente, a variações na perda por sombreamento por objetos adjacentes, conforme apresentado pela Figura 5.

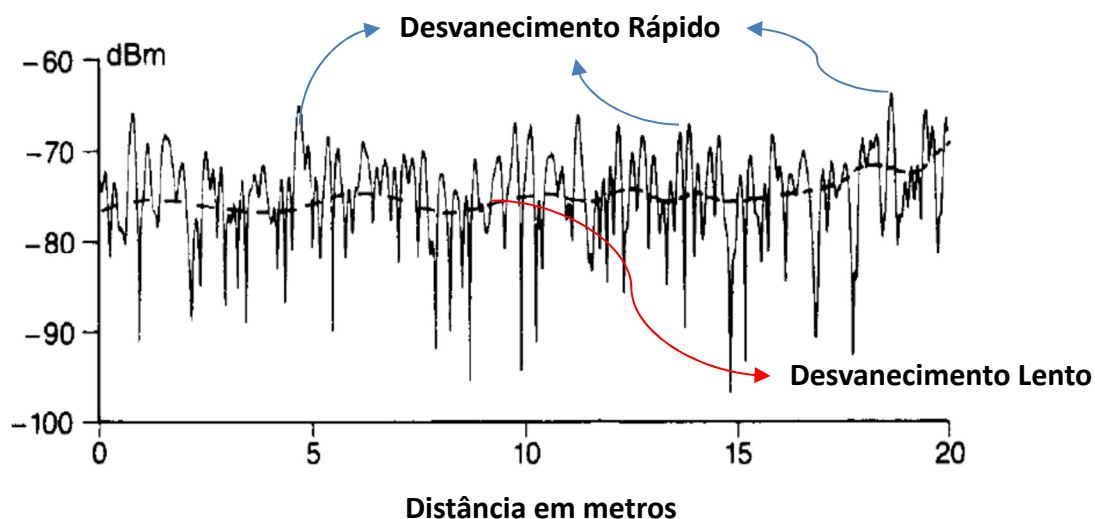


Figura 5 – Desvanecimento Lento e Rápido. Fonte: [16]

2.1.5.1 Desvanecimento Rápido

Desvanecimento rápido, ou de curto prazo, se refere às mudanças drásticas de amplitude e fase do sinal, resultantes de pequenas variações (tão pequenas quanto frações do comprimento de onda) na separação espacial entre o transmissor e o receptor. Esse fenômeno é causado pela interferência entre duas ou mais contribuições (réplicas do sinal) do sinal transmitido, que chegam ao receptor em um instante de tempo. Tais componentes são chamadas de componentes de multipercurso, que se combinam vetorialmente no receptor, resultando em um sinal que pode variar amplamente em sua amplitude e em sua fase.

Devido à variação rápida de sinal recebido possuir um comportamento estatístico, esta pode ser representada por uma função densidade de probabilidade (f.d.p.). Dependendo do tipo de condição de canal, as mais comuns são a distribuição de densidade de probabilidade do tipo *Rayleigh*, *Rice* ou *Nakagami-m*.

A distribuição *Rayleigh* diz respeito ao modelo físico que parte do princípio da existência de um número razoavelmente grande de componentes de multipercursos, com

diferentes fases e potências próximas. A distribuição *Rayleigh* ajusta as variações rápidas de recepção numa condição de recepção, onde não existe visada entre as antenas transmissoras e receptoras e a maioria das contribuições do sinal no receptor é devido à múltiplas reflexões, ou seja, em um ambiente de propagação *Rayleigh*, o sinal recebido é composto, principalmente, de ondas refletidas, sendo uma função apenas da variável σ_r :

A f.d.p. $p(r)$ é dada por:

$$\begin{cases} p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} e^{\left(\frac{-r^2}{2\sigma_r^2}\right)}, \forall r \geq 0 \\ 0, & r < 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

onde r é a envoltória do sinal e σ_r^2 é a variância das componentes em fase e em quadratura, que compõem o sinal r [10].

A distribuição *Rice*, assim como a distribuição *Rayleigh*, também parte do princípio da existência de um número suficientemente grande de multipercursos, porém, descreve a variação, em pequena escala, da envoltória do sinal recebido em um ambiente de propagação com múltiplos percursos, onde existe uma linha de visada direta entre o transmissor e o receptor. A função densidade de probabilidade em função de r [17] é dada por:

$$\begin{cases} p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} e^{\left(\frac{-(r^2+a^2)}{2\sigma_r^2}\right)} I_0\left(\frac{ar}{\sigma_r^2}\right), \forall r \geq 0 \\ 0, & r < 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

onde r é a envoltória do sinal, $a^2/2$ é a potência da onda recebida na linha de visada, σ_r^2 é a potência da correspondente difusa e:

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{xcos\theta} d\theta \quad (2.7)$$

é a função de *Bessel* modificada, de ordem zero. Observa-se que, se $a = 0$ em (2.6) a distribuição *Rice* se torna uma *Rayleigh*, visto não haver a onda direta.

A distribuição *Nakagami-m*, assim como a *Rayleigh*, também é usada para descrever as flutuações dos sinais originários de canais com desvanecimentos, porém, sua

representação é mais vasta sendo possível, através desta distribuição, representar desvanecimentos mais severos. Sua função densidade de probabilidade [11] é dada por:

$$p(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} e^{-mr^2/\Omega} \quad (2.8)$$

onde: Ω é definido como:

$$\Omega = E(r^2) \quad (2.9)$$

e $\Gamma(.)$ é a função Gama, definida como:

$$\Gamma(m) = \int_0^{\infty} x^{m-1} e^{-x} dx \quad (2.10)$$

e o parâmetro m , chamado fator de desvanecimento (*fading*) é definido como a razão dos momentos:

$$m = \frac{\Omega^2}{E[(r^2 - \Omega)^2]}, m \geq \frac{1}{2} \quad (2.11)$$

Diferentemente da distribuição de *Rayleigh*, a distribuição *Nakagami-m* possui dois parâmetros: m e Ω , o que permite uma modelagem mais precisa do canal, porém, o seu uso nem sempre compensa pois, quanto menor for a quantidade de parâmetros, mais fácil é determinar o comportamento do canal em função dos fenômenos físicos.

2.1.5.2 Desvanecimento Lento

O desvanecimento lento ou de longo prazo representa as flutuações do sinal recebido devido às mudanças das condições de recepção, por conta do movimento do receptor em relação ao transmissor. Este fenômeno é ocasionado pela obstrução total ou parcial da visada entre transmissor e receptor devido às condições de propagação, pelo perfil do terreno (morros, florestas, grandes construções urbanas, etc.). Dependendo de fatores como a frequência de operação, altura das antenas, largura e orientação de ruas em áreas urbanas, o fenômeno pode ser mais ou menos acentuado.

Se comparada com a condição de visibilidade em espaço livre, cujo decaimento da potência é, aproximadamente, com o quadrado a distância, a potência do sinal num ambiente com obstruções é atenuada rapidamente à medida que o receptor se afasta da antena transmissora, caindo com o inverso da potência de ordem n da distância, com n assumindo valores de 3 a 5, dependendo do ambiente de propagação e características do sistema de comunicação [10]. Nestas condições, o sinal chega ao receptor, conforme citado anteriormente, basicamente, através de reflexão, difração e espalhamento, na qual a flutuação da amplitude do sinal recebido pode ser modelado, através de função densidade de probabilidade Normal (ou log-normal, em dB). Desta forma, o sombreamento pode ser modelado como uma incerteza em torno do valor nominal obtido a partir da perda de percurso, como sendo uma variável aleatória gaussiana, medida em dB, que tem média nula e desvio padrão variando na faixa de $5 \leq \sigma_{dB} \leq 12$ dB [11]. A f.d.p. é descrita por:

$$p(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{dB}} \exp \left[\frac{-(g - m_{db})^2}{2\sigma_{dB}^2} \right] \quad (2.12)$$

onde g representa esta flutuação de potência, em dB.

Para uma melhor compreensão do desvanecimento em larga escala, faz-se necessário estudar a atenuação que o sinal sofre em função da distância. Em um ambiente de propagação, sendo ele móvel ou não, o nível do sinal recebido diminui com a distância. Diversos modelos de predição de atenuação com a distância, ou perda de propagação (*Path Loss*) foram propostos, empíricos ou analíticos, indicam que a potência média do sinal recebido decai linearmente de forma logarítmica com a distância.

Capítulo 3 - Modelos de Propagação

O modelo de propagação é uma simulação do canal rádio móvel usado para prever as perdas de propagação no caminho de acordo com parâmetros como frequência, distância, alturas do transmissor e receptor e o ambiente em que a rede será implementada.

O modelo de propagação inicialmente difundido, para a predição de cobertura em sistemas de telefonia móvel, foi elaborado por *Yoshihisa Okumura* [9] como resultado de inúmeras campanhas de medição, em várias faixas de frequências, na cidade de Tóquio e arredores. Os resultados de *Okumura* foram apresentados na forma de gráficos e demandam um processo manual e complexo para a obtenção dos resultados. Mais tarde, *Masaharu Hata* [18] desenvolveu um polinômio e um conjunto de equações acessórias, que permitem o processamento computacional do modelo de *Okumura*, que ficou então conhecido como modelo *Okumura-Hata*.

Outros modelos de propagação derivaram do modelo de *Okumura*, porém, é importante ressaltar que os coeficientes escolhidos por Hata representam o valor mediano da Perda de Percurso em função da distância para as regiões urbana, suburbana e rural da cidade de Tóquio e imediações, na década de 60. Esses coeficientes demandam ajustes, mesmo para serem aplicados na mesma região nos dias de hoje, uma vez que o perfil morfológico da região deve ter sofrido grandes mudanças, quer seja na densidade, como também nos materiais construtivos das edificações.

Com o incremento na ocupação do espectro de VHF, UHF e SHF pelos sistemas de radiodifusão de som e imagem e pelos sistemas de telefonia móvel, a demanda por modelos de propagação mais adequados e confiáveis também cresceu, desde o final da década de 60 até os dias de hoje.

Conforme mencionado na seção 1.2, os modelos podem ser amplamente categorizados em três tipos: empírico, determinístico e estocástico como se observa na Figura 6.

Modelos empíricos são aqueles baseados em medições de intensidade de campo e de perdas de propagação que são utilizados em projetos de telecomunicações para atingir o nível de precisão necessário ao planejamento preliminar de um sistema rádio móvel. Esses modelos são usados, principalmente, para prever a perda no caminho ou perda de propagação no percurso entre transmissor e receptor, o *Path Loss*. Os determinísticos fazem uso das leis que regem a propagação física das ondas eletromagnéticas para determinar a potência do

sinal recebido em um determinado local, utilizando uma descrição geométrica do ambiente e técnicas de traçado de raios (*ray-tracing*). Na maioria das vezes, modelos determinísticos requerem um mapa em 3 dimensões completo do ambiente de propagação. As principais desvantagens deste modelo é a complexidade computacional e a necessidade de um banco de dados geográfico com alta resolução para alcançar boa precisão. Por outro lado, como vantagem, tem-se a facilidade em realizar simulações ao invés de realizar extensivas campanhas de medições. Já os modelos estocásticos, por outro lado, modelam o ambiente como uma série de variáveis aleatórias. Esses modelos são os menos precisos, mas requerem um mínimo de informações sobre o ambiente e o utilizam menos processamento para gerar as predições.

Os modelos empíricos podem ser divididos em duas subcategorias, a saber, dispersivos no tempo e não dispersivos no tempo [8]. O dispersivo é projetado para fornecer informações relacionadas às características dispersivas do tempo do canal, isto é, a propagação de retardo de multipercurso do canal. Um exemplo desse tipo são modelos específicos de canais do *Stanford University Interim* (SUI) desenvolvidos sob o Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE), grupo de trabalho do padrão 802.16 [8]. Como exemplos de modelos empíricos não dispersivos no tempo podemos citar a Recomendação ITU-R 1546 “*Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz*” [19], Hata [18] e o modelo COST-231 Hata [20].

As aproximações determinísticas e estocásticas podem ser combinadas para melhorar a eficiência do modelo do canal, resultando no modelo estocástico baseado em geometria (*Geometry-Based Stochastic Model* - GBSM). A filosofia do GBSM se aplica a uma caracterização assumindo uma distribuição estocástica (aleatória) de objetos interagindo entre as posições do transmissor e receptor. Para reduzir a carga computacional, técnicas de traçados de raios simplificadas podem ser incorporadas, e para reduzir a complexidade do modelo, pode-se supor que os objetos interagindo estão distribuídos em formas regulares [21].

Todos esses modelos preveem a perda média de propagação no caminho entre transmissor e receptor, em função de vários parâmetros como distância, alturas de antenas, frequência etc.

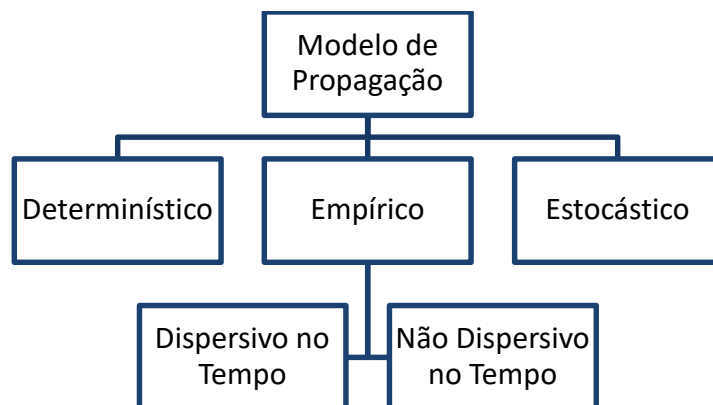


Figura 6 – Categorias de modelos de propagação

3.1 Classificação dos Ambientes

Os ambientes no qual a rede móvel está inserida são relevantes aos modelos de propagação e podem ser classificados de acordo com características como densidade da vegetação, topografia, altura e localização de edificações, existência de áreas abertas ou aquáticas, etc. A partir do estudo dessas características, os ambientes podem ser classificados como densamente urbanos, urbanos, suburbanos e rurais [10].

Os ambientes densamente urbanos são aqueles em que há predomínio de conglomerado de edifícios com altura elevada, comerciais e residenciais, em região com elevada densidade demográfica. Já os ambientes urbanos são definidos como áreas que possuem edifícios de médio porte, distribuídos aleatoriamente, mas com elevada densidade demográfica. Já as áreas suburbanas são compostas por casas residenciais, prédios de média e baixa alturas, média densidade demográfica e de vegetação, enquanto as áreas rurais são aquelas que contam com poucas edificações, baixa densidade demográfica e alta densidade de vegetação [22].

3.2 Perdas de Transmissão

A recomendação ITU-R P.341-6 traz conceitos importantes, definições e notações sobre as características de perdas de transmissão em um canal rádio móvel. A terminologia é aplicada às Recomendações da ITU. Tais conceitos são relevantes para que sejam aplicados os modelos de predição de perda de propagação abordados neste trabalho [23].

A fig. 7 ilustra um canal rádio e define os termos utilizados para as perdas de transmissão que variam de acordo com o ponto de observação:

- i. Perda Total (L_t) – Expressa a razão entre a potência alimentada pelo transmissor e potência recebida no receptor, em dB.
- ii. Perda do Sistema (L_s) - Expressa a razão entre a potência alimentada nos terminais da antena transmissora e a potência recebida nos terminais da antena receptora, em dB.
- iii. Perda de Transmissão (L) - Expressa a razão entre a potência irradiada pela antena transmissora e a potência recebida na antena receptora, se não houvesse perdas nos sistemas irradiantes, em dB.

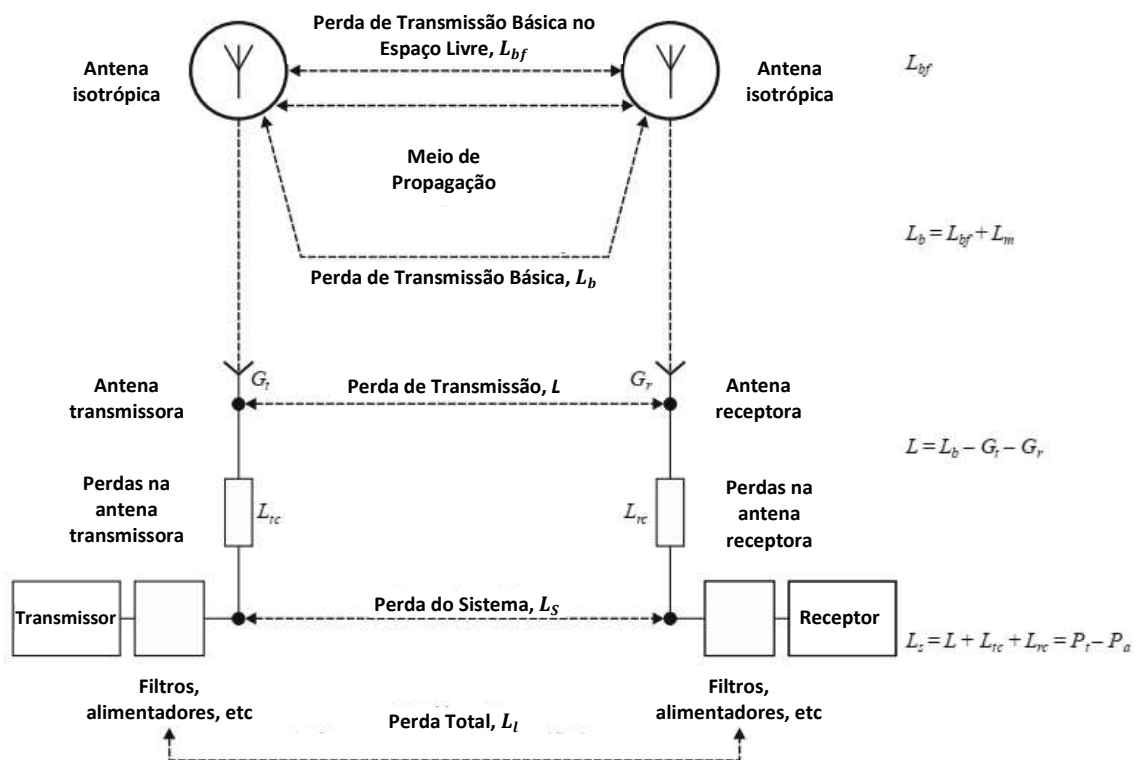


Figura 7 – Conceito e terminologia em perdas de transmissão em um canal rádio móvel. Fonte: [23]

- iv. Perda de Transmissão Básica (L_b) - Expressa a razão entre a potência irradiada pela antena transmissora e a potência recebida na antena receptora, se não houvesse perdas nos sistemas irradiantes, considerando a utilização de antenas isotrópicas, em dB.

- v. Perda de Transmissão Básica no Espaço Livre (L_{bf}) - Expressa a razão entre a potência irradiada pela antena transmissora e a potência recebida na antena receptora, se não houvesse perdas nos sistemas irradiantes, considerando a utilização de antenas isotrópicas situadas em um meio dielétrico perfeito e homogêneo, em dB.
- vi. Perda relativa ao Espaço Livre (L_m) – Denota a diferença entre L_b e L_{bf} , em dB.

3.3 Modelo Espaço Livre

Também conhecido como modelo de *Friis*, tem como premissa não haver obstáculos entre o transmissor e o receptor. Define a perda de potência no espaço livre durante uma transmissão.

Este modelo prevê a redução da potência em função da distância entre o transmissor e receptor e da frequência do sinal. Embora o cenário em que não haja reflexão ou obstáculos no caminho de propagação seja muito particular, este modelo permite observar e realizar comparações com outros modelos de perda de propagação.

Uma situação em que a equação é razoavelmente precisa é nas comunicações por satélite, quando há absorção atmosférica insignificante ou é utilizado em câmaras anecoicas projetadas, especificamente, para minimizar fenômenos de propagação devidos ao ambiente circundante.

$$PL_{FSL}(dB) = 32,45 + 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) \quad (3.1)$$

d – Distância entre o transmissor e o receptor, em km

f – Frequência de transmissão em MHz

A equação de *Friis* é amplamente utilizada por engenheiros, desde 1946, especialmente devido a sua simplicidade e facilidade de memorização por não possuir coeficientes numéricos e por provar sua utilidade nos cálculos de transmissão para canais radiopropagação [15].

Existem vários métodos para derivar a equação de *Friis*. Além da derivação usual da teoria da antena, a equação básica também pode ser derivada de princípios de radiometria e difração escalar de uma maneira que enfatiza a sua compreensão física, entretanto a equação, não deve ser usada quando a distância d entre transmissor e receptor é muito pequena. *W. D. Lewis* realizou estudo teórico de transmissão entre grandes antenas de áreas iguais, com frentes de fase planas em suas aberturas, concluindo que a equação de *Friis* pode ser utilizada quando [15]:

$$d \geq \frac{2a^2}{\lambda} \quad (3.2)$$

onde a é a maior dimensão linear de qualquer uma das antenas utilizadas.

3.4 Modelo Log-Distância

Modelos de perdas de propagação indicam que a perda cresce logaritmicamente em função da distância entre transmissor e receptor [10]. O modelo abaixo pode ser utilizado para calcular a perda de propagação média em grande escala a uma distância determinada, em ambientes *indoor* ou *outdoor*:

$$L_{Total}(dB) = L_0 + 10.n.\log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X\sigma \quad (3.3)$$

sendo: L_0 – Perda de propagação a uma distância d_0 ;

n – Coeficiente de perda no percurso;

$X\sigma$ – Variável aleatória normal em dB com desvio padrão σ , usada para descrever o efeito do sombreamento.

O coeficiente de perda no percurso n indica a velocidade com que a perda aumenta em relação à distância. Seu valor depende, especificamente, do ambiente onde o canal rádio encontra-se inserido. Para o espaço livre, n é igual a 2. Para ambientes com obstruções, n terá um valor maior que 2. Embora *Rappaport* [10] tenha concebido uma tabela que estabelece valores de n para diferentes ambientes onde o canal rádio pode se encontrar inserido, variando de 1,6 a 6, neste trabalho, o valor de n para o modelo Log-Distância foi

obtido após a realização da campanha de medições, de posse dos valores medidos válidos, através do ajuste da curva deste modelo aos dados reais medidos baseado no algoritmo de *Levenberg-Marquardt*, explicado adiante na seção 5.1, resultando no valor de $n = 5,23$.

O termo L_0 define a perda de propagação a uma distância d_0 , calculada pela equação de *Friis*, utilizando como referência uma distância de 100 metros entre transmissor e receptor para sistemas com coberturas de microcélulas [10]. Percebe-se que, após a definição do expoente de perda no percurso n e de L_0 , a perda Log-Distância irá variar em função da distância apenas.

O termo $X\sigma$ é uma variável aleatória com distribuição gaussiana de média zero e desvio padrão σ (em dB). A distribuição log-normal descreve os efeitos aleatórios do sombreamento que ocorre em muitos locais medidos com a mesma distância d , mas com diferentes níveis de ruídos no canal radio móvel [10].

Na prática, o valor de n e de $X\sigma$ são obtidos a partir dos dados reais medidos, podendo ser utilizado o algoritmo de *Levenberg-Marquardt*, que é utilizado para resolver problemas de ajuste de dados não-lineares dentro do contexto dos mínimos quadrados. Assim, o modelo Log-Distância é um modelo que pode ser utilizado como referencial para a análise de outros modelos de perda de propagação, dado que seu ajuste é realizado com base nos dados medidos reais.

Alguns artigos utilizam o valor de d_0 igual a 1 metro, obtendo-se o valor de L_0 para esta curta distância em faixas superiores a 2 GHz. Nestes casos, a equação utilizada é a mesma do modelo Log-Distância, porém o modelo é denominado *Close-in* [24].

3.5 Modelo ECC33

O modelo ECC-33 é uma extrapolação das medidas originais do *Okumura* desenvolvido pela *Electronic Communication Commitee* (ECC), podendo ser utilizado para frequências na faixa entre 3,4 a 3,8 GHz, em cidades de médio e grande porte, com fatores de correção para áreas suburbanas ou abertas. A equação padrão deste modelo de perda de propagação é dado por:

$$P_L(dB) = A_{fs} + A_{bm} - G_t - G_r \quad (3.4)$$

onde A_{fs} corresponde à atenuação no espaço livre em dB. A_{bm} é a perda média básica, em dB, G_t é o fator de ganho, em dB, correspondente à altura da antena transmissora e G_r , o fator de ganho da antena receptora, também em dB.

Tais parâmetros são definidos, individualmente, por:

$$A_{fs} = 92,4 + 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) \quad (3.5)$$

$$A_{bm} = 20,41 + 9,831 \cdot \log_{10}(d) + 7,894 \cdot \log_{10}(f) + 9,56 \cdot (\log_{10}(f))^2 \quad (3.6)$$

$$G_t = \left(\log_{10} \left(\frac{h_t}{200} \right) \right) \cdot (13,98 + 5,8(\log_{10}(d))^2) \quad (3.7)$$

Para cidades de médio porte:

$$G_r = (42,57 + 13,7 \cdot \log_{10}(f))(\log_{10}(h_r) - 0,585) \quad (3.8)$$

Para cidades de grande porte:

$$G_r = 0,759 \cdot h_r - 1,892 \quad (3.9)$$

De (3.5) a (3.9), a frequência f é em GHz, distância d entre o transmissor e o receptor é em km, e as alturas h das antenas em metros.

Os autores referem-se às áreas urbanas subdivididas em categorias de “Cidade Grande (CG)” e “Cidade Média (CM)”.

Visto que as características de uma área altamente urbanizada como Tóquio são bastante diferentes daqueles encontrados em locais típicos brasileiros com a mesma definição, o uso do modelo merece cautela sendo mais adequada a definição de “Cidade Média” para as cidades brasileiras.

3.6 Recomendação ITU-R P.2108 – *Clutter Loss*

Clutter refere-se a objetos na superfície da Terra tais como edifícios ou vegetação que próximos às antenas de transmissores e/ou receptores afetam significativamente a propagação do sinal radioelétrico. Normalmente é o *clutter* mais próximo do terminal que tem maior efeito na propagação.

Modelos de perda de propagação com *clutter* são estatísticos por natureza, considerando que as estações podem estar protegidas por edifícios ou vegetações, assim, uma metodologia de cálculo detalhado para um caso geral pode ser difícil de se formular, pois as perdas devido ao *clutter* devem ser consideradas de acordo com os cenários onde as estações encontram-se inseridas.

Importa salientar que o 5G estará fortemente inserido em ambiente com *clutter*, utilizando novas faixas de frequências, onde as recomendações ITU sobre modelos preditivos de perdas de propagação neste cenário estão sendo revisadas em atenção à quinta geração de comunicação móvel [25].

Métodos de predição que usam *Clutter Loss* foram utilizados em bandas de frequências relativamente baixas, como o VHF/UHF. O comportamento em bandas de frequências mais elevadas em cenário com *clutter* foi tratado em uma nova recomendação: A ITU-R P. 2108-0. A recomendação ITU-R P.2108-0 foi concebida em junho de 2017 e estabelece métodos para estimar perdas de propagação em ambiente com *clutter* em frequências de 30 MHz a 100 GHz. Nela, três cenários são previstos, conforme as faixas de frequências utilizadas, indicadas na Tabela 2.

Neste trabalho, será analisado apenas o cenário 2 que é aplicável à faixa destinada pela Anatel, de 3,3 GHz a 3,6 GHz, ao 5G.

Neste modelo, uma perda adicional L_{ctt} é calculada e pode ser adicionada à *Transmission Loss* (L) ou à *Basic Transmission Loss* (L_b). O L_{ctt} irá variar dependendo do tipo de *clutter*, localização e o movimento do terminal.

Se a recomendação ITU-R P.1411 - *Short Range Outdoor Propagation* – tiver sido utilizada para o cálculo do enlace, então a recomendação ITU-R P.2108-0 não poderá ser utilizada para cálculo da perda adicional L_{ctt} .

A faixa de frequência para este cenário varia de 2 GHz a 67 GHz.

Tabela 2 – Cenários ITU-R P.2108

Cenário		Faixa de Frequência (GHz)	Descrição
1	Terminal abaixo da altura representativa do <i>clutter</i>	0,03 – 3	Correção de perda final a ser adicionada à perda de transmissão básica calculada de/para a altura representativa utilizada. Pode ser aplicado para transmitir e receber o final do caminho Pode ser aplicado no terminal na extremidade do enlace.
2	Terminal Terrestre dentro do clutter	2 - 67	Modelo estatístico que pode ser aplicado para modelar a distribuição de <i>Clutter Loss</i> para ambientes urbanos e suburbanos. Essa correção pode ser aplicada a ambas extremidades do canal rádio móvel.
3	Um terminal dentro do Clutter e outro é um satélite, aeronave, ou qualquer plataforma acima da superfície terrestre	10 - 100	Uma distribuição estatística de <i>Clutter Loss</i> não excedida pelas porcentagens de localizações para ângulos de elevação entre 0 e 90 graus.

Se a distância do enlace for até 0,25 km, a perda adicional L_{ctt} deverá ser aplicada somente à extremidade do canal rádio móvel. Porém, se a distância for até 1 km, a L_{ctt} poderá ser aplicada em ambas as extremidades do canal rádio móvel.

O intervalo de localizações percentuais p deve variar entre 1 e 99%. Isso significa dizer que o valor de p fornece a proporção de locais em uma área de medição onde a intensidade de campo real recebida deve ser igual ou maior que o campo mediano calculado pelo modelo de predição. No caso de perda de propagação significa dizer que a perda predita não poderá ser excedida pela perda mediana real na proporção p de locais da área medida. Assim, considerando a distância d em km e a frequência f em GHz, a perda L_{ctt} é dada por:

$$L_{ctt} = -5 \cdot \log_{10}(10^{-0,2L_l} + 10^{-0,2L_s}) - 6 \cdot Q^{-1}\left(\frac{p}{100}\right) \text{ dB} \quad (3.10)$$

onde $Q^{-1}\left(\frac{p}{100}\right)$ é o inverso complementar da função distribuição normal, e

$$L_l = 23,5 + 9,6 \cdot \log_{10}(f) \text{ dB} \quad (3.11)$$

$$L_s = 32,98 + 23,9 \cdot \log_{10}(d) + 3 \cdot \log_{10}(f) \text{ dB} \quad (3.12)$$

onde d é a distância total do canal rádio.

3.7 Recomendação ITU-R P.1411 – Caso Geral

Esta recomendação fornece orientação sobre a propagação externa de curto alcance na faixa de frequência de 300 MHz a 100 GHz. A Recomendação fornece modelos genéricos e específicos de perda de propagação, de acordo com o ambiente e parâmetros disponíveis, considerando situações do receptor em linha de visada com o transmissor - LoS e sem linha de visada - NLoS. Também são considerados modelos que incluem a propagação multipercurso do sinal para ambientes onde o transmissor e/ou receptor estejam em locais do tipo “*Street Canyon*” e/ou “*Roof-Top*”, bem como características de polarização e de desvanecimento [12].

A propagação em canais de rádio móvel de distâncias inferiores a 1 km é afetada, principalmente, por edifícios e árvores, em vez de variações na elevação do solo. O efeito de edifícios é predominante, uma vez que a maioria dos canais de rádio de curta distância é encontrada em áreas urbanas e suburbanas. O terminal móvel encontra-se, normalmente, nas mãos de um pedestre ou embarcado em um veículo.

Esta recomendação define categorias de canais rádio móvel para curtas distâncias de propagação e fornece métodos para estimar perda de propagação, atraso de propagação, propagação angular e correlação cruzada sobre esses canais.

Os modelos de perda de propagação desta Recomendação são simétricos, pois tratam os terminais em ambas as extremidades de um canal da mesma maneira. Da perspectiva do modelo, não importa qual terminal é o transmissor e qual é o receptor.

Os ambientes descritos nesta recomendação são categorizados, exclusivamente, da perspectiva de propagação de rádio. A propagação de ondas de rádio é influenciada pelo ambiente, ou seja, estruturas e alturas de edifícios, a utilização do terminal móvel (pedestre/veicular) e pelas posições das antenas. São identificados cinco ambientes diferentes, considerados os mais típicos: urbano/arranha-céus, urbano/edifícios, suburbano, residencial e rural. Áreas montanhosas, por exemplo, não são consideradas, pois são menos típicas em áreas metropolitanas. Reconhecendo que existe uma grande variedade de ambientes dentro de cada categoria, a Recomendação não teve o condão de modelar todos

os casos possíveis, mas fornecer modelos de perda de propagação que são representativos de ambientes frequentemente encontrados [12].

A equação do modelo geral também é aplicável a situações em que uma das estações está localizada acima do *roof-top*, que é definido como a altura média do topo das edificações circundantes, e a outra estação está localizada abaixo do *roof-top*, independentemente da altura das antenas:

$$L_b(d, f) = 10. \alpha. \log_{10}(d) + \beta + 10. \gamma. \log_{10}(f) \text{ dB} \quad (3.13)$$

com variável aleatória gaussiana média zero $N(0, \sigma)$ com um desvio padrão σ (dB), onde:

d : Distância entre as estações transmissora e receptora, em metros;

f : Frequência de operação em GHz;

α : Coeficiente associado ao aumento da perda de transmissão básica com a distância;

β : Coeficiente associado ao valor de compensação da perda de transmissão básica;

γ : Coeficiente associado ao aumento da perda de transmissão básica com a frequência.

Os coeficientes recomendados para situações de LoS e NLoS, usados para propagação onde a antena transmissora encontra-se acima do *roof-top* e a receptora, abaixo do *roof-top*, em ambientes urbanos e suburbanos são fornecidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes básicos de perda de propagação

Faixa de Frequência (GHz)	Distância (m)	Ambiente	LoS/NLoS	α	β	γ	σ
2,2 - 73	55 - 1200	Urbano arranha-céus, urbano edifícios, suburbano	LoS	2,29	28,6	1,96	3,48
2,2 – 66,5	260 - 1200	Urbano arranha-céus	NLoS	4,39	-6,27	2,30	6,89

Importante frisar que o modelo de perda de propagação conhecido como alpha-beta-gamma (ABG) utiliza a mesma equação do modelo da Recomendação ITU-R P.1411, caso

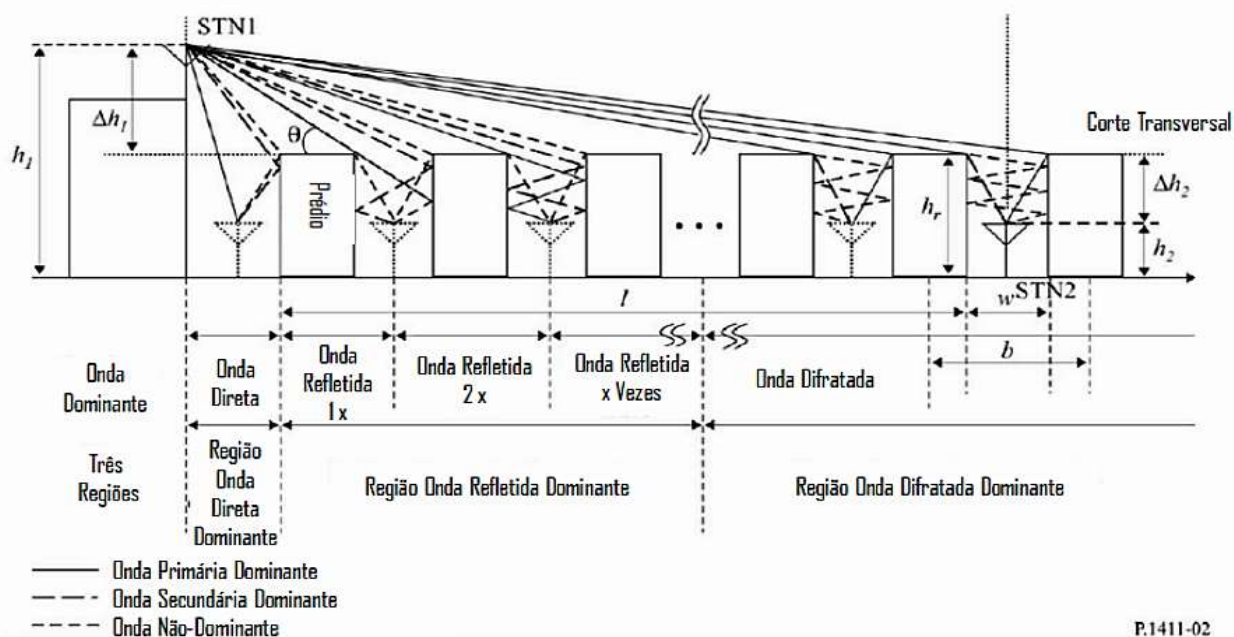
geral, utilizando os parâmetros α , β , γ e σ para diferentes cenários, faixas de frequências, distâncias e ambientes. Devido à similaridade dos valores absolutos destes parâmetros com os da tabela 3, a simulação do modelo ABG não foi incluída no escopo deste trabalho [24].

3.8 Recomendação ITU-R P.1411 – Caso Específico

Os sinais de NLoS podem chegar à estação por mecanismos de difração ou por multipercursos, que podem ser uma combinação de mecanismos de difração e reflexão. Os casos específicos da Recomendação ITU-R P.1411 desenvolvem modelos relacionados a esses mecanismos de propagação.

O caso específico desta Recomendação que se aplica ao cenário de medições realizadas, conforme indicado no capítulo 4, é definido pelas equações de perda de propagação dadas adiante, onde é assumido que as alturas dos *roof-top* dos edifícios do ambiente de medições, caracterizado como urbano, são similares podendo ser definida uma altura média do *roof-top* do bairro em questão.

No modelo para perda de propagação no caso NLoS para *roof-top* de altura semelhante, a perda é expressa como a soma da perda de propagação básica no espaço livre, L_{bf} , a perda de difração do *roof-top* para a rua onde o móvel se encontra L_{rts} e a perda devido à difração múltipla devido às filas de edifícios, L_{msd} .



P.1411-02

Figura 8 – Definição de parâmetros para o caso específico – NLoS. Fonte: [12]

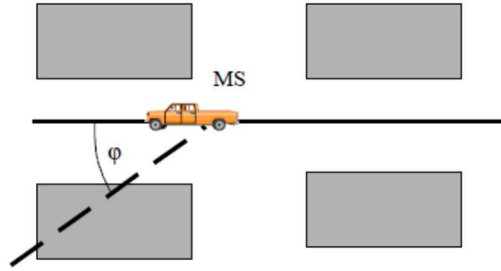


Figura 9 – Componente no plano horizontal. Fonte: [26]

No modelo específico, L_{bf} e L_{rts} são independentes da altura da antena do terminal, enquanto L_{msd} depende se a antena do terminal está abaixo ou acima da altura do *roof-top*.

$$L_{1411S} = \begin{cases} L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} ; & \text{para } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{bf} ; & \text{para } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{1000} \right) + 20 \cdot \log_{10}(f) \quad (3.15)$$

onde d é a distância em metros e f a frequência em MHz.

O termo L_{rts} descreve a perda por difração do sinal onde é considerada a altura média do *roof-top*, a orientação da rua onde o receptor móvel está localizado em relação a direção de propagação, a altura do receptor móvel e a largura da rua:

$$L_{rts} = -8,2 - 10 \cdot \log_{10}(w) + 10 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(\Delta h_2) + L_{ori} \quad (3.16)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354 \cdot \varphi ; & \text{para } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075 \cdot (\varphi - 35) ; & \text{para } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114 \cdot (\varphi - 55) ; & \text{para } 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases} \quad (3.17)$$

Onde $\Delta h_2 = h_r - h_2$

φ = Ângulo no plano horizontal entre a orientação da rua e a direção ao transmissor em graus decimais. Ver Figura 8.

w = Largura da rua em metros

A “distância de campo estabelecida” d_s é dada por:

$$d_s = \frac{\lambda \cdot d^2}{\Delta h_1^2} \quad (3.18)$$

Onde $\Delta h_1 = h_1 - h_r$

Para o cálculo de L_{msd} , d_s é comparado à distância l , que é determinada pela extensão dos edifícios no percurso de propagação. O cálculo para L_{msd} usa a seguinte equação, quando $l \gg d_s$, que é o caso específico deste trabalho:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{1000}\right) + k_f \cdot \log_{10}(f) - 9 \cdot \log_{10}(b) \quad (3.19)$$

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \cdot \log_{10}(1 + \Delta h_1); & \text{para } h_1 > h_r \\ 0; & \text{para } h_1 < h_r \end{cases} \quad (3.20)$$

b = Distância entre as edificações

$$k_a = \begin{cases} 71,4; & \text{para } h_1 > h_r \text{ e } f > 2000\text{MHz} \\ 73 - 0,8 \cdot \Delta h_1; & \text{para } h_1 \leq h_r, f > 2000\text{MHz e } d \geq 500\text{m} \\ 73 - \frac{1,6 \cdot \Delta h_1 \cdot d}{1000}; & \text{para } h_1 \leq h_r, f > 2000\text{MHz e } d < 500\text{m} \\ 54; & \text{para } h_1 > h_r \text{ e } f \leq 2000\text{MHz} \\ 54 - 0,8 \cdot \Delta h_1; & \text{para } h_1 \leq h_r, f \leq 2000\text{MHz e } d \geq 500\text{m} \\ 54 - \frac{1,6 \cdot \Delta h_1 \cdot d}{1000}; & \text{para } h_1 \leq h_r, f \leq 2000\text{MHz e } d < 500\text{m} \end{cases} \quad (3.21)$$

$$k_d = \begin{cases} 18; & \text{para } h_1 > h_r \\ 18 - \frac{15 \cdot \Delta h_1}{h_r} & \text{para } h_1 \leq h_r \end{cases} \quad (3.22)$$

$$k_f = \begin{cases} -8; & \text{para } f > 2000\text{MHz} \\ -4 + 0,7 \cdot \left(\frac{f}{925} - 1\right); & \text{para ambientes suburbanos e } f \leq 2000\text{MHz} \\ -4 + 1,5 \cdot \left(\frac{f}{925} - 1\right); & \text{para centros metropolitanos e } f \leq 2000\text{MHz} \end{cases} \quad (3.23)$$

Em ambientes onde as dimensões das edificações e das ruas não são conhecidas, os seguintes valores padrão são recomendados:

- $h_r = 3 \times \text{número de andares} + \text{altura do telhado}$;
- Altura do telhado = 3 metros por telhado inclinado e zero para telhado plano;
- $w = b/2$;
- $b = \text{De 20 a 50 metros}$;
- $\varphi = 90^\circ$

3.9 Modelo *Stanford University Interim* (SUI)

O grupo de trabalho de acesso de banda larga sem fio, IEEE 802.16, propôs padrões para a faixa de frequência abaixo de 11 GHz, incluindo o modelo de predição em canal rádio desenvolvido pela *Stanford University*, ou seja, o modelo SUI.

Este modelo de predição vem da extensão do modelo *Hata*, que considera o uso de frequência maior que 1900 MHz, através da correção de parâmetros para estender o modelo até a banda de 3,5 GHz. Nos EUA, este modelo foi definido para o Sistema de Distribuição Multiponto por Microondas (MMDS) para a faixa de frequência de 2,5 GHz a 2,7 GHz [8]. A altura da antena da estação transmissora do modelo SUI pode ser de 10 a 80 m. A altura da antena do receptor, de 2 a 10 m e a distância pode variar de 0,1 km a 8 km.

O modelo SUI descreve três tipos de ambientes: terreno A, terreno B e terreno C. O terreno A pode ser usado para áreas montanhosas com vegetação moderada ou muito densa. Este é o tipo de terreno que apresenta a maior perda de propagação, por isso pode ser utilizado para ambiente densamente urbano. O terreno B é caracterizado por terrenos acidentados com vegetação rara, ou terrenos planos com densidades moderadas ou pesadas de árvores. Este tipo de ambiente pode ser extrapolado para ambiente urbano. O terreno C é adequado para terrenos planos ou rurais com vegetação leve, onde a *path loss* é mínima.

A perda básica de propagação deste modelo considerando os fatores de correção é dada por:

$$L_{SUI} = A + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10}(d/d_0) + X_f + X_h + X_\sigma; \text{ para } d > d_0 \quad (3.24)$$

$$A = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (3.25)$$

$$\gamma = a - b \cdot h_1 + \frac{c}{h_1} \quad (3.26)$$

$$X_f = 6 \cdot \log_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) \quad (3.27)$$

$$X_h = -10,8 \cdot \log_{10} \left(\frac{h_2}{2} \right); \quad \text{para terrenos tipo A e B} \quad (3.28)$$

$$X_h = -20 \cdot \log_{10} \left(\frac{h_2}{2} \right); \quad \text{para terrenos tipo C} \quad (3.29)$$

$$X_\sigma = \text{Fator de ajuste sombreamento Lognormal em dB} \quad (3.30)$$

onde: d = Distância entre transmissor e receptor, em metros

d_0 = Distância de referência

λ = Comprimento de onda, em metros

f = Frequência em MHz

h_1 = Altura da antena transmissora em metros

h_2 = Altura da antena receptora em metros

A Tabela 4 abaixo fornece os valores obtidos pelo grupo de trabalho para o modelo de perda de propagação L_{SUI} :

Parâmetro	Tipo A	Tipo B	Tipo C
a	4,6	4	3,6
b	0,0075	0,0065	0,005
c	12,6	17,1	20

Tabela 4 – Parâmetros γ

Observa-se que X_f é um fator de correção em função da frequência acima de 2000 MHz, X_h é outro fator de correção em função da altura do receptor móvel e γ é o expoente

de perda de propagação que, para o espaço livre, assume valor igual a 2, de 3 a 5 em ambiente urbano NLoS, e acima de 5 quando o receptor se encontra em ambientes *indoors*.

Os valores típicos para o fator de ajuste de sombreamento Lognormal, X_σ , variam entre 8,2 e 10,6 dB, dependendo do ambiente *clutter* no qual o canal rádio móvel se encontra inserido [8].

Capítulo 4 - Metodologia de Medições

Este capítulo possui o objetivo de descrever o ambiente onde foram realizadas as medições e os equipamentos utilizados. Também será descrito como foi gerado o sinal de teste e a metodologia utilizada na captura dos dados.

4.1 Caracterização do canal rádio em banda estreita

A caracterização do canal radiopropagação em banda da estreita tem como foco a previsão de uma intensidade média do sinal recebido a determinada distância do receptor, através do cálculo da perda média de propagação, considerando o desvanecimento lento do sinal.

A atenuação do sinal, além da distância entre transmissor e receptor, frequência de operação, depende do ambiente em que se encontram inseridos, da predominância dos diferentes tipos de fenômenos de propagação. Considerando o ambiente onde foram realizadas as medições, tipicamente urbano/suburbano, podemos dividir esta predominância em espaço livre, reflexão e difração. Quando o receptor está localizado próximo ao transmissor normalmente possui a predominância de sinais diretos em visada (LoS). Entre os edifícios e casas próximos ao transmissor, a propagação predominante é devida à reflexão nas construções e objetos ao redor. Na medida que se afasta do transmissor, o fenômeno da difração no topo das construções e esquinas de ruas, difrações múltiplas, predomina na intensidade média do sinal recebido. Na Figura 10 abaixo podemos verificar a exemplificação das regiões de predominância dos fenômenos de propagação em ambiente urbano/suburbano.

Importante ressaltar é que a altura do receptor em relação ao topo das construções (*roof-top*) tem maior implicação na atenuação do sinal do que a altura do transmissor. A largura da rua e a inclinação dela em relação à direção de propagação também interferem no cálculo e modelos empíricos consideram estas variáveis [12].

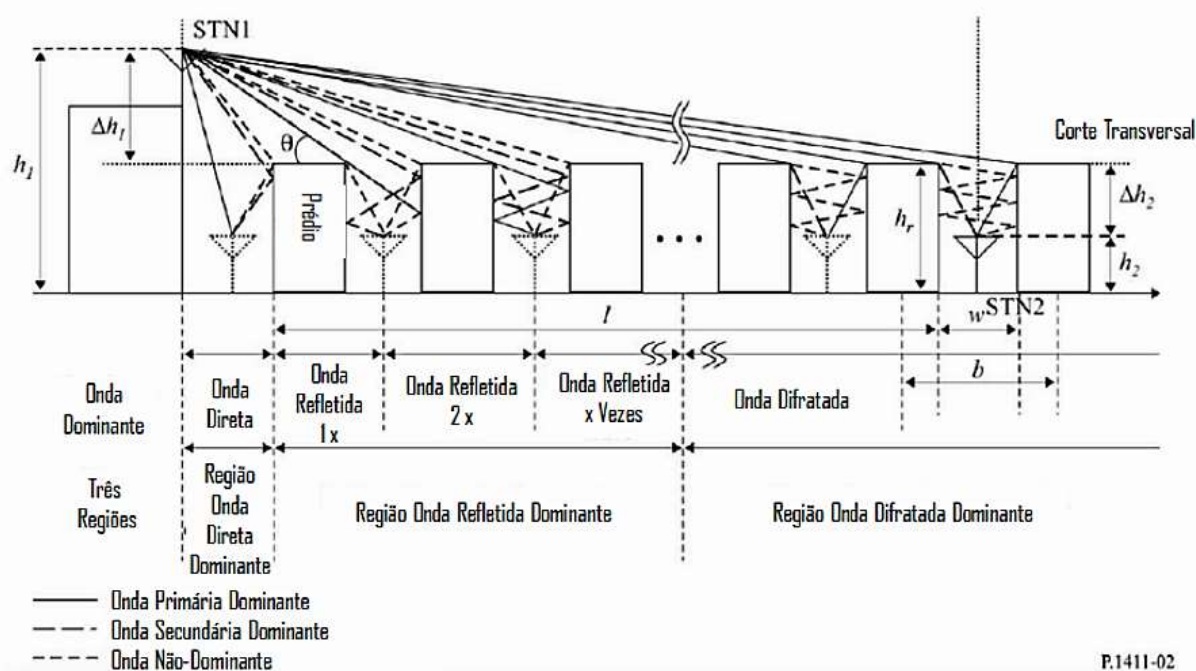


Figura 10 – Regiões de ondas dominantes. Fonte: [12]

4.2 Ambiente de Medições

A caracterização do canal foi realizada em banda estreita e o ambiente escolhido para as medições foi o bairro de Higienópolis, localizado na Zona Norte do município do Rio de Janeiro. O bairro possui as características de um ambiente tipicamente suburbano, com alta concentração de veículos e diversas construções, onde as rotas selecionadas caracterizam ambientes tanto em visada (LoS), como sem visada (NLoS). Os equipamentos utilizados para transmissão do sinal foram posicionados no terraço do edifício mostrado na figura 11. Trata-se de um edifício de 14 andares, aproximadamente 50 metros de altura, localizado no bairro de Del Castilho, divisa com o bairro Higienópolis. A caracterização do canal foi realizada percorrendo as ruas do bairro, usando um automóvel, onde estavam os equipamentos de recepção.

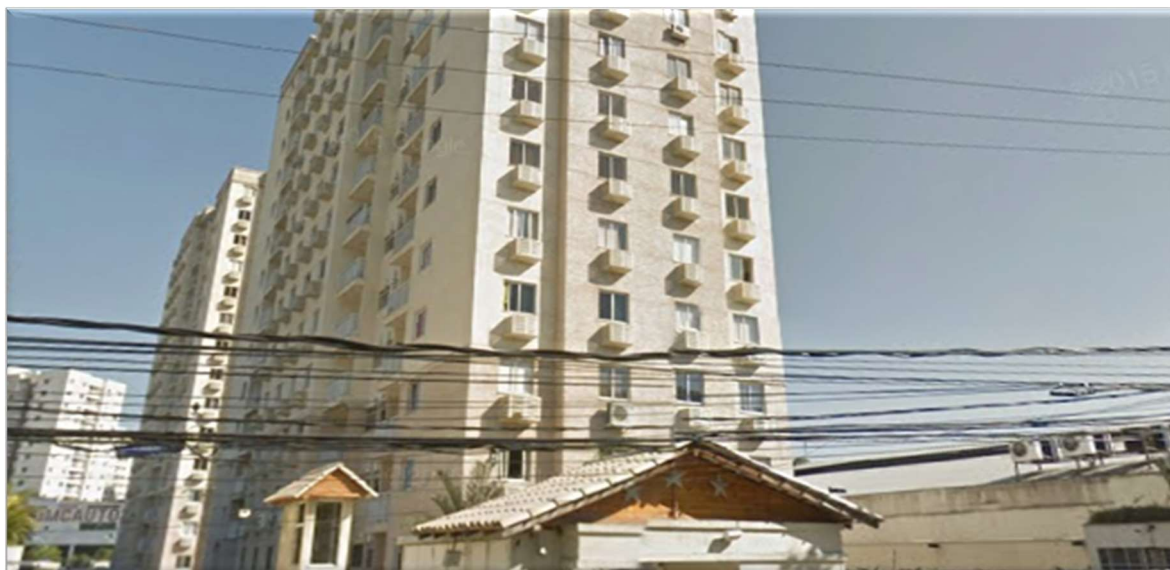


Figura 11 – Edifício cujo topo serviu de local para o transmissor

Os dados experimentais para a caracterização do canal faixa larga na frequência de 3,5 GHz foram obtidos através de duas campanhas de medições. Ambas as campanhas aconteceram no mesmo dia, no horário da manhã do dia 08/02/2018, com tempo ensolarado e com poucas nuvens. O tipo de ambiente onde foram realizadas as medições pode ser melhor observado através da Figura 12 [27].

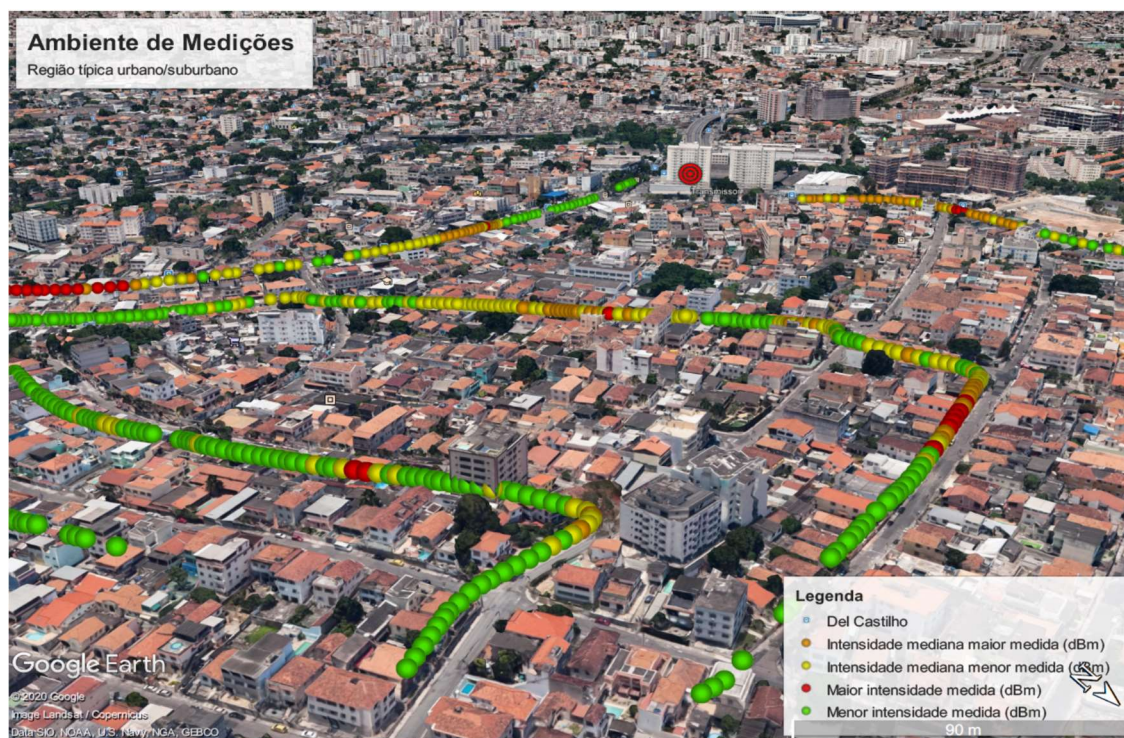


Figura 12 – Ambiente de medições. Fonte: *Google Earth*

4.3 *Set-up* de Medições

A seguir, serão descritas as estruturas técnicas do *set-up* de transmissão e de recepção.

4.3.1 *Set-up* de Transmissão

O sistema transmissor, conforme mencionado anteriormente, foi instalado no topo de um prédio com visibilidade para a maior parte da rota de teste. A antena foi montada a uma altura de 50 metros acima do nível do solo. Para a transmissão dos sinais, fez-se uso do gerador vetorial MG 3700A da *Anritsu*, um amplificador de potência modelo 0502047B da marca MILMEGA, uma antena setorial com ganho de 15 dBi da marca *HyperLink Technologies*, modelo HG3515P-120, faixa de operação de 3,4 a 3,7 GHz, além dos cabos e conectores utilizados para interligar os equipamentos, como mostrado na Figura 13. O material empregado na transmissão do sinal está listado na Tabela 5.

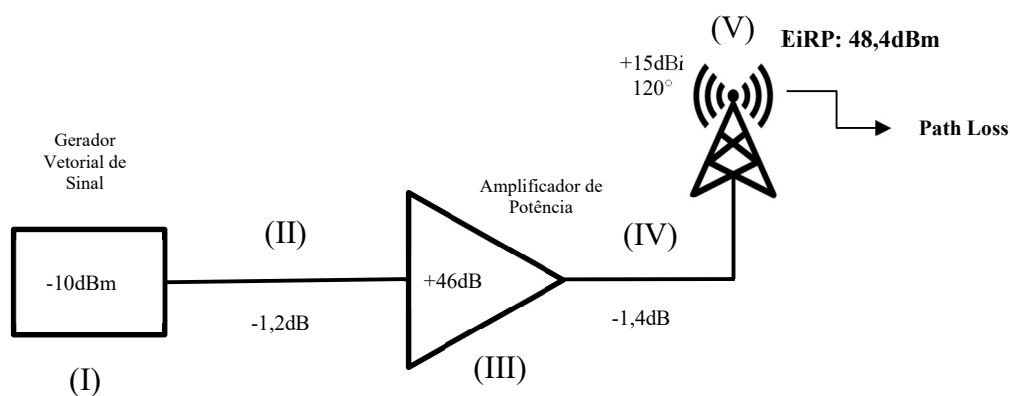


Figura 13 – *Set-up* de transmissão

Tabela 5 – Equipamentos utilizados no *set-up* de transmissão

Equipamento/Dispositivo	Especificação
<i>Gerador Vetorial de Sinal</i>	MG-3700A, <i>Anritsu</i>
<i>Amplificador de Potência</i>	0502047B, MILMEGA
<i>Fonte Digital</i>	PS-5000, da ICEL
<i>Antena Setorial</i>	Modelo: HG3515P -120 Antena Setorial – 15 dBi 120° Setor Pannel Antena – <i>HyperLink Technologies</i>
<i>Cabos RG 213</i>	Cabo 1: 1 m, com perda de 1,2 dB Cabo 2: 6 m, com perda de 1,4 dB

As componentes em fase e quadratura do sinal de teste transmitido foram geradas no MATLAB® e encaminhadas ao gerador vetorial de sinais. Em seguida, o sinal de teste modulado foi amplificado em 46 dB, pelo amplificador de potência, e irradiado pela antena tipo painel [27].

O sinal de teste é formado por uma sequência pseudoaleatória com modulação OFDM, numa banda de 20 MHz. O número de portadoras escolhido foi igual a 2048 e o número de amostras do prefixo cíclico igual a 128. Esses valores foram, então, mapeados em símbolos complexos e convertidos para o domínio do tempo. O prefixo cíclico foi inserido e as componentes: real e imaginária, foram separadas para formarem as componentes em fase e em quadratura do sinal OFDM.

Durante o teste, o nível de potência de saída do gerador foi igual a -10 dBm. Tal nível foi escolhido levando-se em conta a curva de saturação do amplificador de potência, para o qual o sinal foi conduzido, de forma que não ocorresse a saturação da potência do mesmo, como se vê na Figura 14, com Potência de entrada versus Potência de saída. Sua polarização foi realizada pela fonte PS-5000. Do amplificador de potência, o sinal seguiu à antena setorial.

Abaixo, a curva de linearidade do amplificador utilizado.



Figura 14 – Curva de Linearidade do Amplificador de Potência

A Figura 15 apresenta o diagrama de irradiação da antena utilizada nos planos horizontal e vertical e a Figura 16, a antena tipo painel:

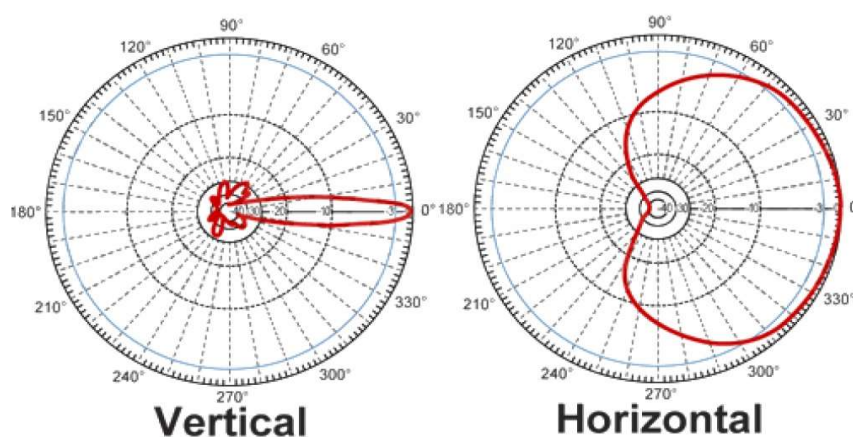


Figura 15 – Ângulo de meia potência da antena HG3515P-120



Figura 16 – Antena Hyperlink Wireless - HG3515P-120

A tabela 6 traz a principais características do *set-up* de transmissão.

Tabela 6 – Parâmetros do *set-up* de transmissão

Parâmetro	Valor
Potência de Saída no Gerador de Sinais	-10 dBm
Frequência de Transmissão	3500 MHz
Ganho do Amplificador de Potência	46 dB
Ganho da Antena de Transmissão	15 dBi
Perdas nos Cabos e Conectores	2,6 dB
EiRP Calculada	48,4 dBm

4.3.2 *Set-up* de Recepção

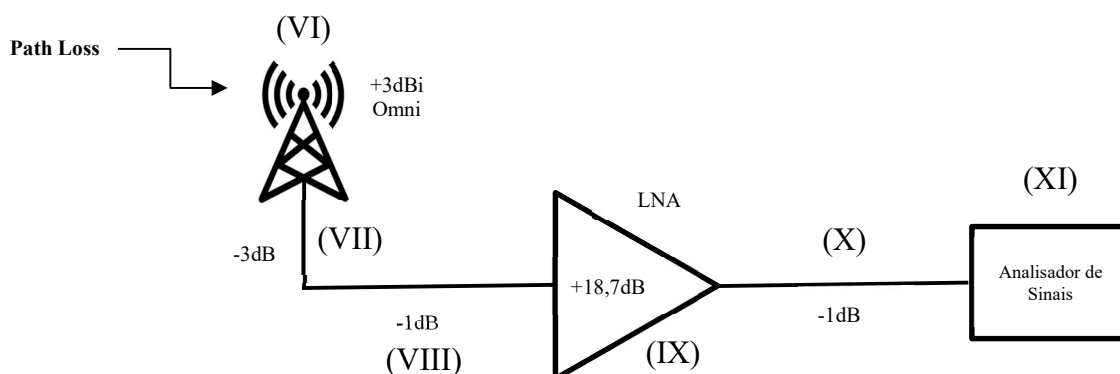


Figura 17 – *Set-up* de Recepção

A antena foi instalada no teto de um veículo de 1.5 m de altura e, através de seu cabo embutido, conduziu o sinal recebido à entrada do amplificador de baixo ruído (*Low Noise Amplifier* - LNA), polarizado pela fonte de 5V. O LNA, por sua vez, estava conectado ao analisador de sinais, que capturava as amostras I (em fase) e Q (em quadratura) do sinal, a uma taxa de 50×10^6 amostras por segundo, que eram transferidas e salvas no *notebook* através do cabo de rede. Para a localização dos pontos de medições, um GPS (*Global Positioning System*) foi conectado ao *notebook* através de cabo USB (*Universal Serial Bus*). O diagrama de blocos do *set-up* de recepção pode ser observado na Figura 17. Para a recepção, foram utilizados os equipamentos listados na Tabela 7.

Tabela 7 – *Set-up* de recepção

Equipamento/Dispositivo	Especificação
<i>Antena Ominidirecional</i>	3 dBi
<i>GPS GARMIN</i>	60CSx
<i>Amplificador de Baixo Ruído</i>	ZX60-33LN-S+, da <i>Minicircuits</i> Ganho: 18,7 dB
<i>Fonte</i>	5 V
<i>Analizador de Sinais</i>	MS-2692A, <i>Anritsu</i>
<i>Laptop</i>	<i>Dell Inspiron 15</i> processador i7
<i>Cabos RG 213 embutido na antena</i>	3 dB
<i>2 Cabos RG 213</i>	1 m, com perda de 1,0 dB

O sinal que chega ao receptor é amplificado pelo LNA, além do pequeno ganho oferecido pela antena omnidirecional e as componentes em fase e quadratura são armazenadas no disco rígido do computador. Os valores devidos a perdas e ganhos no *set-up* de recepção do sinal são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Ganhos e perdas no *set-up* de recepção

Parâmetro	Valor
<i>Ganho da Antena de Recepção</i>	3 dB
<i>Perdas nos Cabos e Conectores</i>	2 dB
<i>Ganho no Amplificador de Baixo Ruído (LNA)</i>	18,7 dB
<i>Altura da Antena de Recepção</i>	1,5 m

4.4 Metodologia

Analisando-se o diagrama em blocos do *set-up* de transmissão e de recepção das Figuras 13 e 17, respectivamente, é possível determinar as perdas de propagação para cada posição medida pelo receptor, *Path Loss*, para a frequência em análise.

De acordo com a Figura 7 da seção 3.2, o valor de L_{bf} pode ser calculado considerando-se os ganhos das antenas, dos amplificadores e perdas nos cabos, ou seja, $L_{bf} = L_b - L_m$.

- Sinal Transmitido = Sinal gerado (dBm) + Ganho no Amplificador de potência (dB) + Ganho da antena transmissora (dBi) – Perdas nos cabos (dB), resultando em EiRP = -48,4 dBm;

- Sinal Recebido = Sinal Medido no Analisador de Sinais (dBm) – Ganho da antena receptora (dBi) – Ganho no LNA (dB) + Perdas nos cabos (dB);

- Path Loss L_{bf} (dB) = Sinal Transmitido (dBm) – Sinal Recebido (dBm).

Assim,

$$L_{bf} = -48.4 \text{ dBm} - [(Sinal \text{ em (XI) dBm}) - (VI) \text{ dB} - (IX) \text{ dB} + (VII) \text{ dB} + (VIII) \text{ dB} + (X) \text{ dB}]$$

$$L_{bf} = -48.4 \text{ dBm} - [(Sinal \text{ em (XI) dBm}) - 3 \text{ dB} - 18.7 \text{ dB} + 3 \text{ dB} + 1 \text{ dB} + 1 \text{ dB}]$$

$$L_{bf} = -48.4 \text{ dBm} - (Sinal \text{ em (XI) dBm}) + 16.7 \text{ dB} \quad (4.1)$$

Uma vez definido o *set-up* de medidas e planejado o seu funcionamento para a aquisição dos dados, é necessário definir como os dados devem ser mensurados.

Primeiramente, definiu-se o local onde seria realizada a captura dos dados. Conforme mencionado anteriormente, era tipicamente suburbano, com escolha de rotas que caracterizavam ambiente com e sem visada, conforme a Figura 12.

O sinal utilizado na transmissão foi gerado em laboratório. Trata-se de uma sequência PN com modulação OFDM. Foi desenvolvido um programa em MATLAB®, que permitiu usar, remotamente, o analisador vetorial de sinais MS2962A em rede com o computador.

Embora a caracterização do sinal tenha sido realizada na frequência central de 3,5 GHz, a largura do sinal de teste utilizado neste trabalho é de 20 MHz e, para a sua criação, levou-se em consideração o equipamento de captura utilizado. Conforme mencionado no *set-up* de recepção, o equipamento presente nas medições foi o Analisador Vetorial de Sinal, modelo MS2962A. O equipamento possui um limitador técnico relacionado a sua frequência de amostragem, permitindo a aquisição dos dados com taxas pré-estabelecidas. Como se trata de um sinal de 20 MHz, a menor taxa de amostragem utilizada pelo equipamento, atendendo ao teorema de *Nyquist*, é de 50 Amostras/segundo.

Na recepção, o sinal é demodulado e através das componentes de fase e quadratura do símbolo recuperado é calculada a potência RMS recebida no canal de 20 MHz através da seguinte equação [28]:

$$P_{(dBm)} = 10 \cdot \log_{10}[10 \cdot (I^2 + Q^2)] \quad (4.2)$$

4.5 Campanha de Medições

As campanhas de medições foram realizadas em duas etapas, onde procurou-se investigar as características do canal suburbano. O *set-up* de transmissão foi montado a uma altura aproximada de 50 metros acima do nível do mar com a antena foi posicionada de forma a cobrir o bairro de Del Castilho. As coordenadas geográficas da posição da antena são: 22°52'41" Latitude e 43°15'57" Longitude.

O *set-up* de recepção foi montado em um veículo que percorreu duas vezes as ruas do bairro de Del Castilho. A Figura 18, obtida através do *Google Earth*, mostra uma visão de cima da região onde as medições foram realizadas. A primeira medição teve início às 11h05 minutos do dia 08/02/2018 e a segunda medição, às 11h36 do mesmo dia.



Figura 18 – Rota realizada para as medições. Fonte: *Google Earth*

Buscando a melhor captura do sinal recebido no ambiente de estudo, buscou-se manter a velocidade do veículo constante em, aproximadamente, 30 km/h utilizando-se uma antena omnidirecional com 3 dBi de ganho a uma altura de, aproximadamente, 1,5 metros e

um amplificador de baixo ruído que acrescentava 18,7 dB ao sinal recebido. Os dados capturados foram tratados no Analisador Vetorial de Sinais MS2962.

A posição de cada símbolo OFDM foi mapeada através do georreferenciamento por GPS, realizado durante as medições. O GPS foi posicionado no teto do veículo e conectado ao Analisador Vetorial de Sinal com o *software* GPS *Trackmaker*® instalado, permitindo a sincronização entre os tempos de captura de dados e o tempo de captura das posições georreferenciadas. Os símbolos identificados e armazenados em disco rígido foram organizados e tabelados juntos com suas respectivas coordenadas geográficas (latitude e longitude), a distância do transmissor (em metros) e a potência média do símbolo recebido em dBm. Uma representação dos dados tabelados é mostrada na figura 19.

Modelo da Tabela de Dados Resultantes do Pós-Processamento dos Dados Capturados nas Rotas de Medição					
Índice da Amostra	Longitude	Latitude	Distância Tx - Rx	Potência (dBm)	Sequência de 2176 amostras IQ
20	-43.2655	-22.877	130.8387	-63.3427	-0.0006 + 0.0003i ... -0.0012 - 0.0000i
21	-43.2655	-22.877	130.8387	-63.3572	-0.0006 + 0.0003i ... -0.0000 + 0.0002i
22	-43.2655	-22.877	130.8412	-67.3928	-0.0006 + 0.0000i ... 0.0006 + 0.0000i
23	-43.2655	-22.877	130.8427	-68.1465	0.0005 + 0.0000i ... -0.0007 - 0.0003i
24	-43.2655	-22.877	130.8453	-67.634	0.0010 - 0.0010i ... -0.0005 - 0.0015i
26	-43.2655	-22.877	130.8506	-63.2946	-0.0005 - 0.0005i ... 0.0006 + 0.0005i
...	...	...	...	...	...
1051	-43.2655	-22.877	146.0432	-72.0732	-0.0005 + 0.0005i ... -0.0002 + 0.0004i

Figura 19 - Dados resultantes do pós processamento dos dados capturados nas rotas de medição

Os parâmetros relacionados ao sinal foram determinados em pós-processamento dos dados do MATLAB® e serão apresentadas no capítulo 5.

Capítulo 5 - Processamento dos dados e Análise dos resultados

5.1 Método dos Mínimos Quadrados

O método dos mínimos quadrados é o procedimento de estimação dos parâmetros de um modelo de regressão por meio da minimização da soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados da variável resposta em uma amostra e seus valores preditos pelo modelo. Possui aplicações em áreas como biologia, engenharia, estatística, física, matemática, entre outras, principalmente aquelas que objetivam relacionar uma variável dependente (Y) em função de variáveis explicativas ($X_1, \dots, X_k$). O método foi proposto independentemente pelos matemáticos *Carl Friedrich Gauss*, por volta de 1795, e *Adrien Marie Legendre*, em torno de 1805 [29].

A técnica dos mínimos quadrados geralmente mostra resultados satisfatórios quando aplicado a problemas locais de otimização, que é o caso de modelos de predição de perda por propagação utilizados neste trabalho. Vários trabalhos na literatura utilizam este método para ajustar os modelos com base em dados coletados em campanhas de medição [30] [31].

O princípio básico dos mínimos quadrados é minimizar a soma dos quadrados dos resíduos, sendo um ruído a diferença entre um valor observado e o valor ajustado fornecido por um modelo. No contexto da predição de perda por propagação, o modelo matemático é dado por:

$$E = \sum_{i=1}^n (PL_{medido_i} - PL_{predito_i})^2 \quad (5.1)$$

onde E é a função de erro e n é o número de pontos de dados coletados na campanha de medição. Existem alguns métodos que podem ser utilizados na resolução do problema dos mínimos quadrados, sendo o método selecionado para este trabalho baseado no algoritmo de *Levenberg-Marquardt* (Marquardt, 1963) [32].

Este algoritmo é utilizado para resolver problemas de ajuste de dados não-lineares dentro do contexto dos mínimos quadrados (*Non Linear Least Squares*), o que significa que cada iteração tentará reduzir o erro contra a execução anterior. O critério de parada padrão escolhido para este método de baseia no valor de gradiente da função de erro, o que significa

que quando a diferença entre o valor atual e o valor anterior for inferior a $10E-8$, o algoritmo irá parar ou quando o número máximo de iterações for alcançado.

Esse método é implementado pelo software MATLAB® através da ferramenta *cftool* (*x,y*) (*Curve Fitting Tool - cftool*) onde *x* e *y* representam a distância entre transmissor e receptor e *y* o valor da perda real medido. O processo de implementação desta função consiste na entrada do PL_{medido_i} e do $PL_{predito_i}$, a inserção do modelo de *Path Loss* predito que se deseja ajustar coeficientes, contendo valores iniciais para que o algoritmo possa processar os dados. Tais parâmetros são facilmente configuráveis na janela do *cftool* que possui interface interativa.

A função irá ajustar as variáveis até que o tamanho do gradiente seja menor que o valor padrão de tolerância definido, no caso, $10E-8$. Após a conclusão do processamento, o melhor ajuste realizado pelo método dos mínimos quadrados resulta em valores de variáveis que ajustam a curva para o menor erro RMS em relação ao PL_{medido_i} . A Figura 20 apresenta cópia da tela de um exemplo simulado na ferramenta *cftool*.

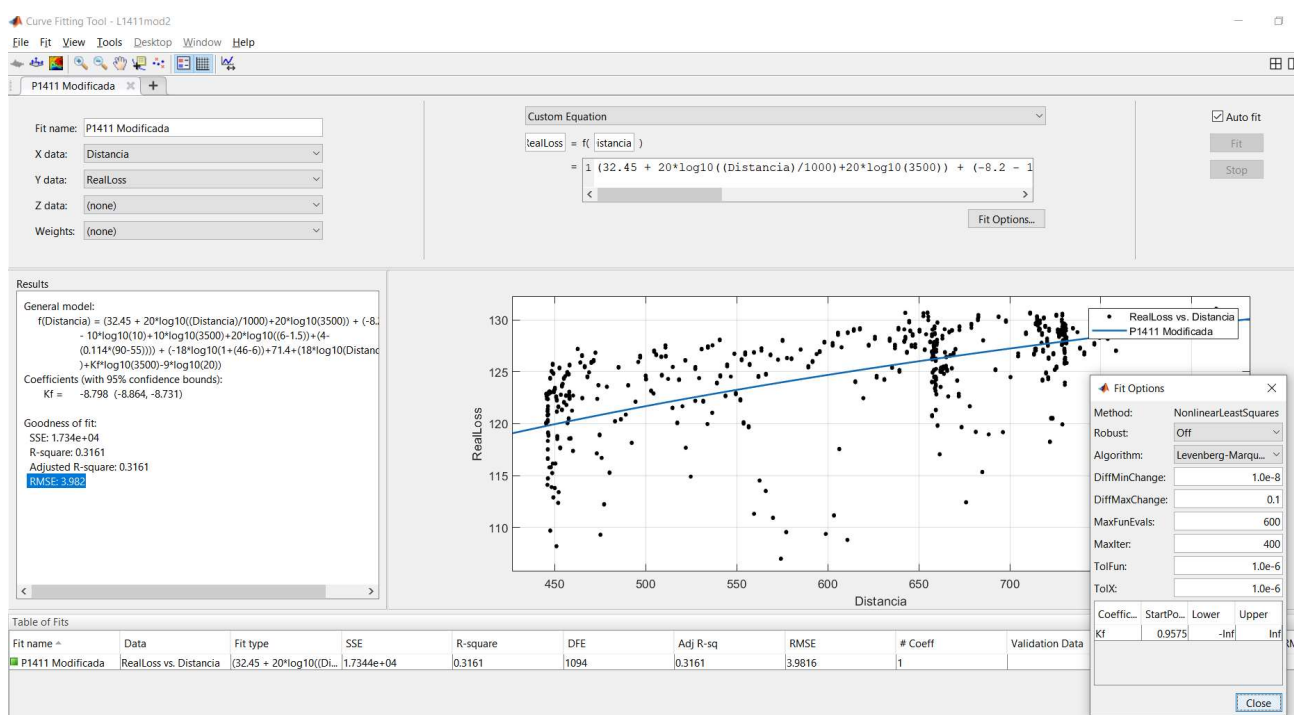


Figura 20 – Função “cftool” do MATLAB® Ex.: Ajuste P.1411 Modificada

5.2 Análise de erros de predição

No intuito de avaliar a performance dos modelos de perda de propagação na predição do sinal obtido nas medições, duas métricas principais foram usadas: o Erro Médio Absoluto μ_L e o Erro Médio Quadrático ou erro RMS (*RMS - Root Mean Square*).

As métricas utilizadas na estimação do erro, são utilizadas regularmente em análises que empregam estudos de avaliação de modelos, além de serem métricas apropriadas para distribuições de erros de característica gaussiana [33].

Outro indicador de performance dos modelos de predição de perda de propagação é o Desvio-Padrão (*SD - Standart Deviation*), σ , do erro que representa a dispersão estatística entre os valores medidos e calculados.

5.2.1 Erro Absoluto Médio

A equação para o cálculo do Erro Médio Absoluto é dada por:

$$\mu_L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |PL_{model_i} - PL_i| \quad (5.2)$$

em que, n é o número total de pontos de medição, PL_{model_i} é a perda de propagação obtida a partir das equações de cada modelo (dB) e PL_i é a perda de propagação obtida a partir das medidas realizadas em campo (dB).

5.2.2 Desvio Padrão

O desvio padrão representa a dispersão estatística do erro, é um indicador de qualidade do modelo, e é dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |PL_{model_i} - PL_i|^2} \quad (5.3)$$

5.2.3 Erro Médio Quadrático – RMS

O Erro Médio Quadrático – RMS representa, conjuntamente, o erro médio absoluto e o desvio padrão, sendo calculado por:

$$RMS = \sqrt{\mu_L^2 + \sigma^2} \quad (5.4)$$

5.3 Avaliação dos modelos de perda de propagação

Este item irá apresentar os resultados comparativos entre as medições realizadas em campo e as simulações dos modelos de perda de propagação adequados ao ambiente urbano/suburbano e frequência de operação, realizadas em ferramenta MATLAB®.

A avaliação da diferença entre as medições realizadas e as obtidas por simulação foi realizada através do cálculo do Erro Médio Absoluto μ_L , do Erro Médio Quadrático RMS e do Desvio Padrão σ .

Para a avaliação dos modelos de perda de propagação no cenário onde as medições foram realizadas, medidas de filtragem da amostra coletada foi realizada, devido ao ângulo de meia potência da antena no plano vertical de 8° e pontos em visada com o transmissor LoS. A antena recebeu um *tilt down* de 10°, então pontos de medição que estavam fora da área de cobertura do ângulo de meia potência no plano vertical da antena foram excluídos da amostra pois podem gerar valores de medidas distorcidas. Assim, da amostra inicialmente coletada que continha 1553 pontos de medição, 440 pontos de medição foram excluídos devido à não cobertura pelo ângulo de meia potência da antena utilizada. Ressalta-se que, após tal exclusão, a distância dos pontos medidos inicia-se em torno de 445 metros, finalizando em torno de 813 metros. Desta amostra filtrada, o menor nível de intensidade do sinal medido foi de -82.68 dBm, enquanto o maior nível foi de -58.57 dBm.

Adicionalmente, pontos que possuem visada com o transmissor LoS também foram excluídos da amostra, pois geram descontinuidade abrupta nos níveis de atenuação, interferindo na análise dos modelos de propagação. Assim, 18 pontos LoS foram excluídos da amostra, restando para a análise dos modelos de propagação 1095 pontos de medição que, correspondem ao sinal recebido em NLoS. A Figura 21 apresenta o ambiente de medições após a amostra saneada.

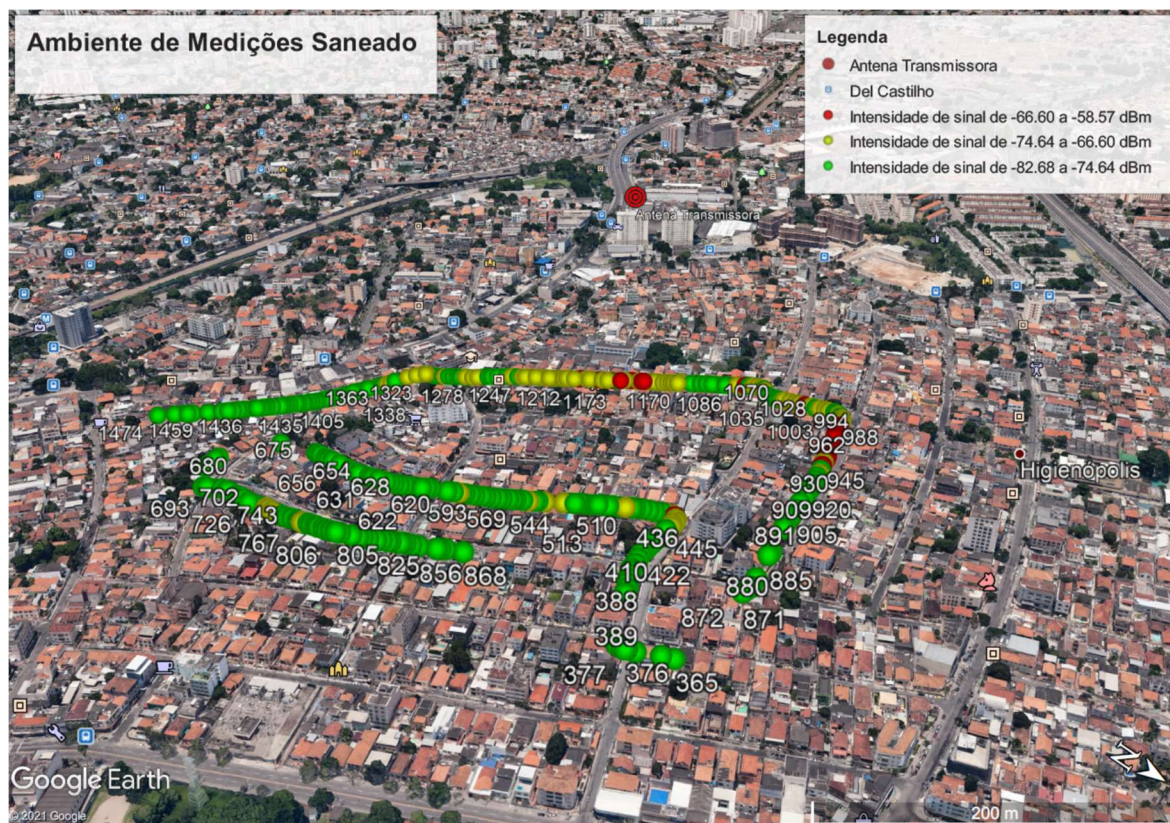


Figura 21 – Ambiente de Medições Saneado. Fonte: *Google Earth*

A Figura 22 contém as medições realizadas em intensidade do sinal x distância entre transmissor e receptor.

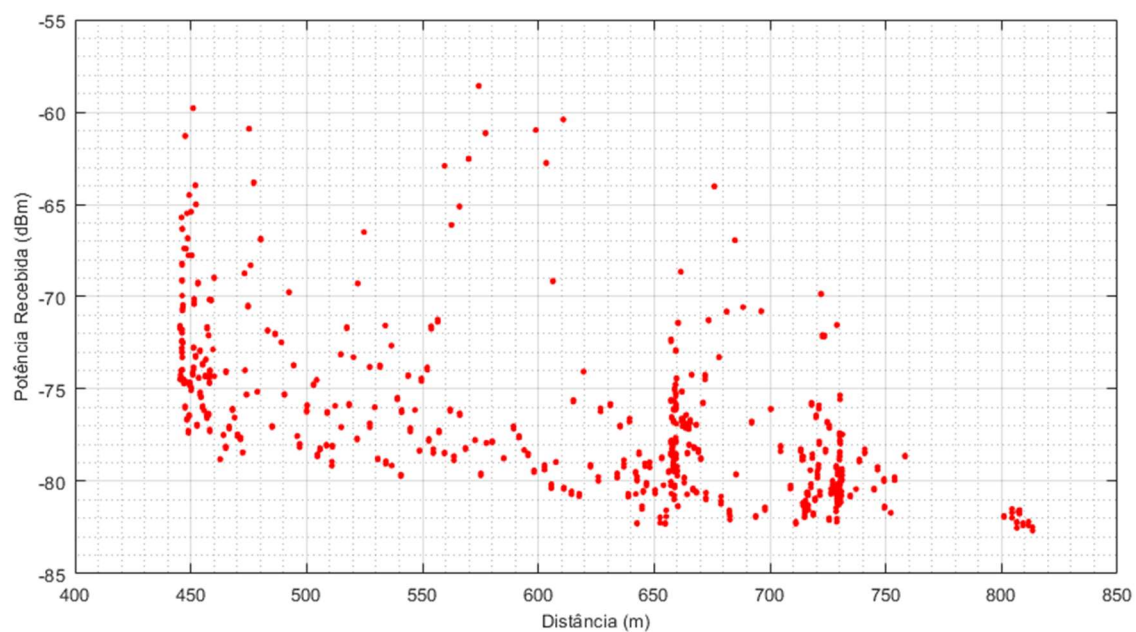


Figura 22 – Intensidade de Potência Recebida (dBm)

5.3.1 Modelo Log-Distância

Os modelos de perda de propagação teóricos e empíricos, amplamente utilizados na literatura, indicam que a potência decai logaritmicamente com a distância, seja o ambiente denso urbano, urbano ou rural. A perda média devido ao desvanecimento lento é expressa em função da distância usando um expoente de perda de caminho n .

A equação abaixo traz o modelo de propagação log-distância para o caso geral:

$$PL_{log} = PL_{d_0} + 10.n.\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (5.5)$$

onde PL_{d_0} é o valor da perda de propagação calculada pelo modelo Espaço Livre (*Friis*) a uma distância d_0 entre o transmissor e o receptor. O expoente de perda de caminho n foi calculado pelo MATLAB®, através do ajuste da curva de dados não-lineares, dentro do contexto dos mínimos quadrados, pela ferramenta *cftool*. Para o trabalho presente fez-se $d_0 = 100m$ sendo encontrado o valor de $PL_{d_0} = 83,3314$.

O valor de n obtido pela ferramenta *cftool* foi de 5,23. De acordo com *Rappaport* [10], valores de n entre 4 a 6 indicam ambiente onde há obstrução em edifícios, como de fato é o caso. Assim a equação ficou resumida da seguinte forma:

$$PL_{log} = 83,3314 + 10.(5,23).\log_{10}\left(\frac{d}{100}\right) \quad (5.6)$$

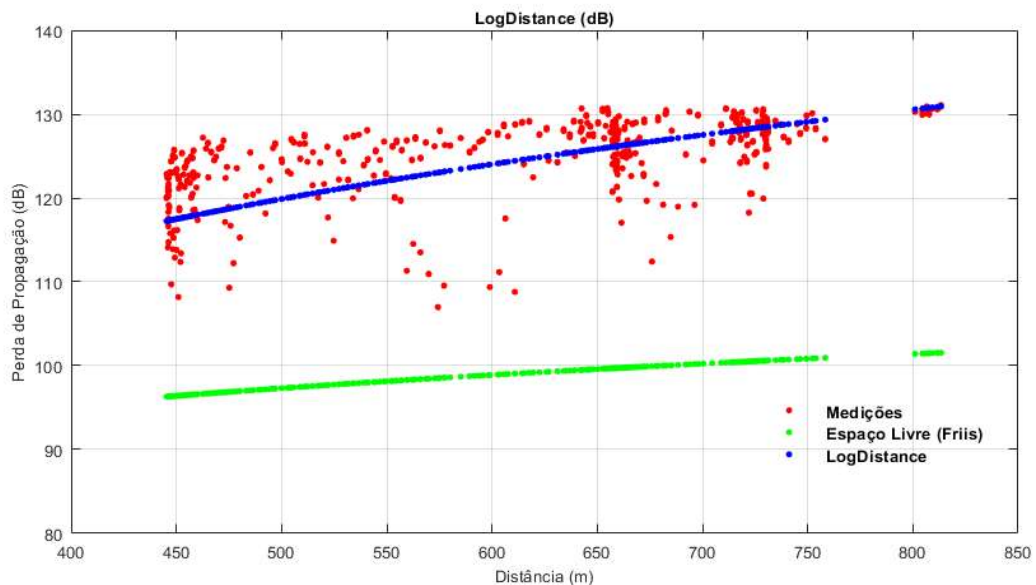


Figura 23 – Log-Distancia x Medições NLoS (dB)

μ_L	σ	RMS
3,23	2,84	4,30

Tabela 9 – Erros Log-Distância

Modelos com expoente de perda ajustados pelo método dos mínimos quadrados trazem o menor erro RMS possível com a equação utilizada. Assim, o modelo Log-Distância com o valor de expoente de perda ajustado ($n = 5,23$) por este método retornou um erro absoluto médio de 3,23, desvio padrão do erro de 2,84 e erro RMS de 4,30.

Observa-se que próximo a 400 metros o modelo é otimista em relação às medições realizadas, subestimando sutilmente a atenuação, enquanto, na medida que o receptor se afasta do transmissor, o modelo tende a ser sutilmente pessimista após 800 metros, superestimando a atenuação.

Este modelo com o fator expoente de atenuação ajustado com base nas medições realizadas serve como referência para comparação a outros modelos de perda de propagação.

5.3.2 Modelo ECC-33

O modelo ECC-33 é baseado na extrapolação de medidas realizadas por *Okumura* em Tóquio, onde foram classificados ambientes como cidade de grande porte e cidade de médio porte. O modelo é ajustado para que seja utilizado na faixa de frequências 3,4 e 3,8 GHz. Para cada um dos ambientes citados, há adaptação no termo do fator de ganho no receptor.

Vale ressaltar que as cidades no Japão, onde foram realizadas as medições para a concepção do modelo ECC-33, possuem alta densidade demográfica, com grande quantidade de prédios altos, o que pode trazer distorção quando comparadas às cidades brasileiras quanto ao entendimento do ambiente relativo à cidade grande e cidade média. Considerando que o ambiente de medições realizadas neste trabalho foi caracterizado como urbano/suburbano supõe-se que o modelo ECC-33 CM seria o ajuste mais adequado, entretanto, na Figura 24, verificamos que o modelo ECC-33 CG apresentou menor erro RMS (9,77), o que é verificado no gráfico.

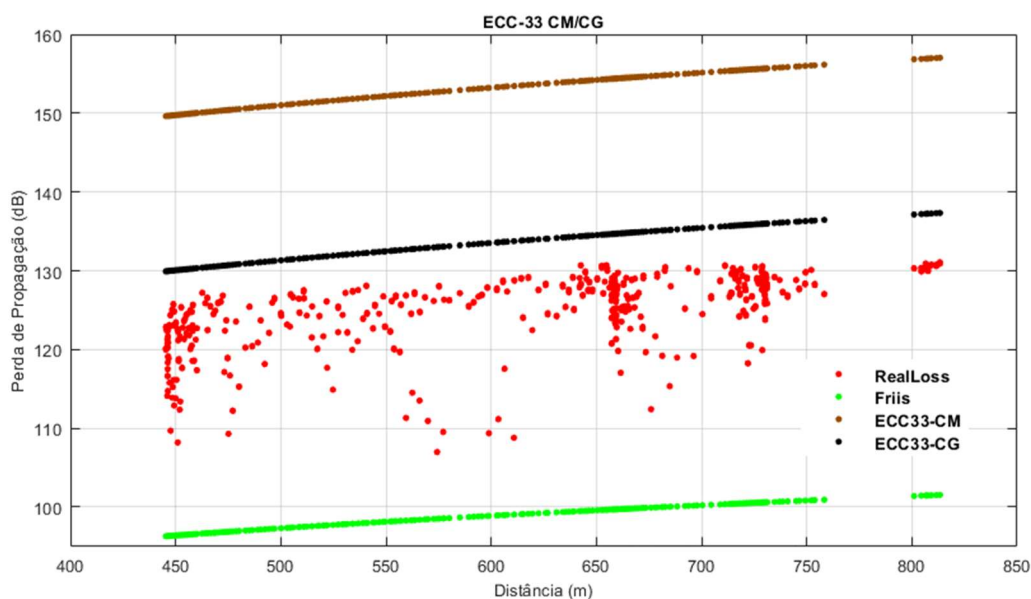


Figura 24 – ECC-33 x Medições

μ_L	σ	<i>RMS</i>
28,62	3,99	28,89

Tabela 10 – Erros ECC-33 CM

μ_L	σ	<i>RMS</i>
8,92	3,99	9,77

Tabela 11 – Erros ECC-33 CG

O modelo ECC-33 CM superestimou a perda de propagação, com elevado erro RMS, não sendo adequado ao ambiente onde as medições foram realizadas. Já o modelo ECC-33 Cidade Grande mostrou-se muito pessimista, de acordo como o erro médio absoluto, para todo o percurso. O desvio padrão de 3.99 para CM e CG demonstra baixa dispersão do erro em torno do erro absoluto médio.

5.3.3 Recomendação ITU-R P.2108

A Recomendação ITU-R P.2108 refere-se a modelos de perda de propagação onde o terminal terrestre encontra-se em ambiente com *clutter*. O modelo específico para ambiente urbano e faixa entre 2 a 67 GHz pode ser utilizado como uma perda adicional à perda básica de transmissão, no caso, o modelo Espaço Livre (*Friis*). Para as simulações fez-se o valor de p igual a 50% que torna o segundo termo da equação ($6Q^{-1}\left(\frac{p}{100}\right)$) nulo, de acordo com a Recomendação ITU-R P.1546-6 [34].

Este modelo utiliza poucas variáveis, o que o torna simples para implementação em locais onde outras variáveis como altura do transmissor, receptor, altura média dos edifícios, largura das ruas, entre outros, não estão disponíveis. A equação utiliza apenas a frequência de operação e a distância entre transmissor e receptor, aplicável apenas a ambiente urbano e suburbano.

Assim como o modelo de *Friis*, que também utiliza as variáveis frequência e distância para seu cálculo, a combinação da Recomendação ITU-R P.2108 com a equação de *Friis* é uma opção útil para uma avaliação da perda de propagação em ambiente urbano onde apenas as variáveis de distância e frequência estão disponíveis.

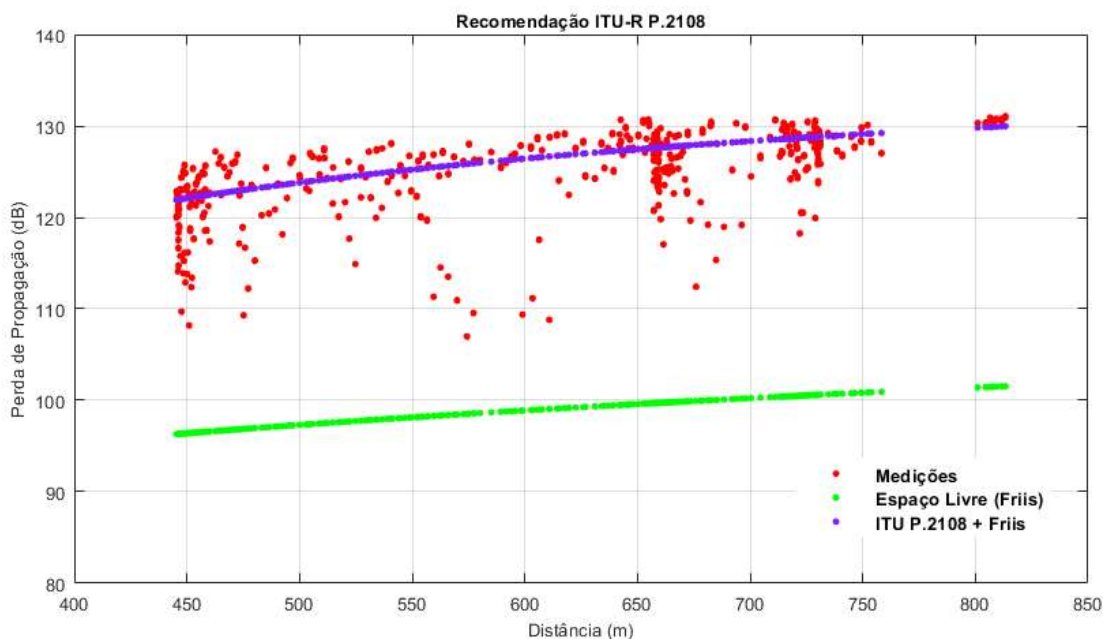


Figura 25 – Medições x ITU-R P.2108

μ_L	σ	RMS
2,75	3,28	4,28

Tabela 12 – Erro ITU-R P.2108 + Friis

A combinação da Recomendação ITU-R P.2108 com a equação de *Friis* apresentou resultado com erro RMS menor do que o modelo Log-Distância, com o mínimo de variáveis de entrada (frequência e distância), indicando que o ambiente enquadrou-se bem ao modelo combinado.

5.3.4 Recomendação ITU-R P.1411 - Geral

A Recomendação ITU-R P.1411 apresenta equação geral que se aplica à maioria dos contextos em que o canal rádio móvel encontra-se inserido. Os coeficientes para situação NLoS em ambiente urbano são dados pela própria Recomendação e são apresentados pela tabela 3.

$$L_b(d, f) = 10. \alpha. \log_{10}(d) + \beta + 10. \gamma. \log_{10}(f) \text{ dB} \quad (5.7)$$

Para o caso geral, a equação indica que a perda de propagação varia em função da distância, da perda no espaço livre e da frequência.

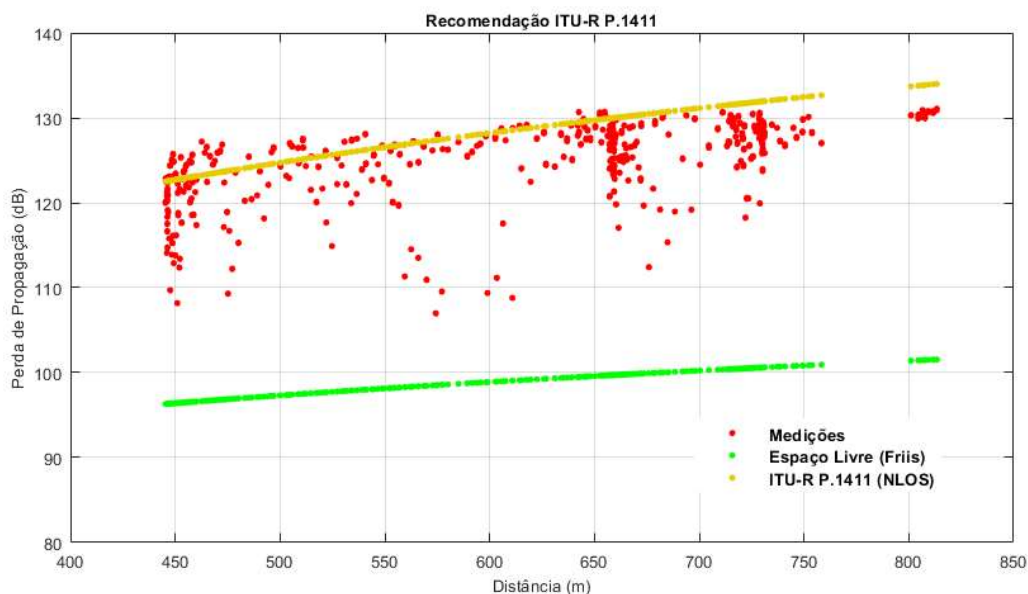


Figura 26 – ITU-R P.1411 (NLoS) x Medições

μ_L	σ	RMS
3,88	3,66	5,34

Tabela 13 – Erro ITU-R P.1411 (NLoS)

O resultado apresentado pelo erro RMS e visualmente indica que o modelo, em distâncias próximas a 500 metros apresenta resultado justo em relação às medições realizadas, enquanto, na medida que o receptor se afasta do transmissor, o modelo tende a ser sutilmente pessimista após 650 metros, superestimando a atenuação predita em relação à medida.

5.3.5 Recomendação ITU-R P.1411 – Caso Específico

A equação para o caso específico NLoS, em ambiente urbano, nesta Recomendação, é apresentada na seção 3.8. Vale ressaltar que $h_1 > h_r$ (Figura 8).

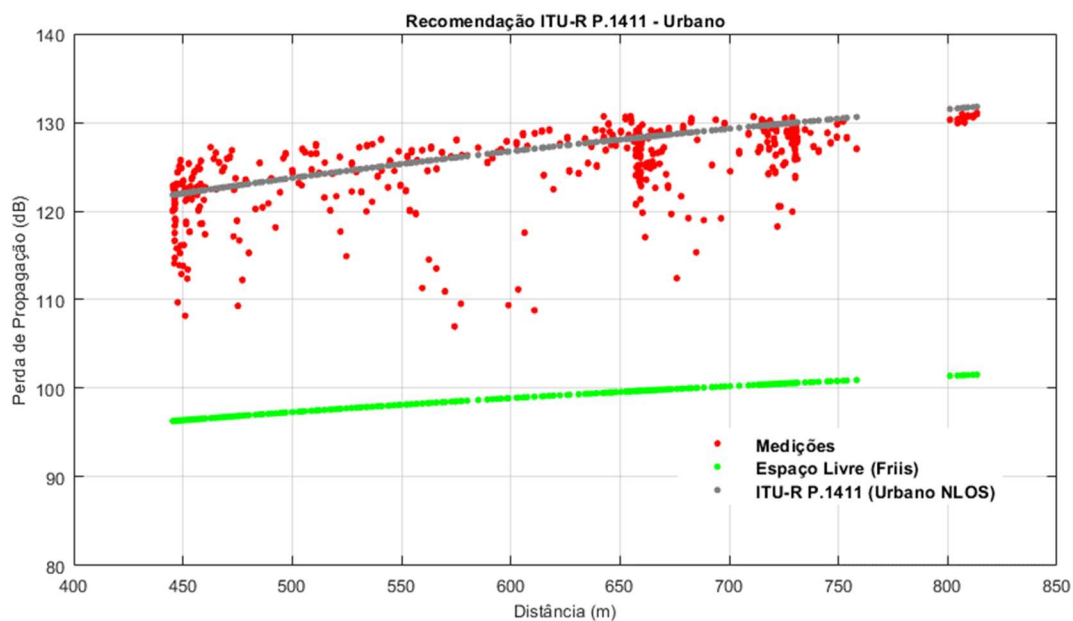


Figura 27 – ITU R P.1411 Urbano (NLoS) x Medições

μ_L	σ	RMS
2,97	3,35	4,48

Tabela 14 – Erro ITU R P.1411 Urbano (NLoS)

Inicialmente importa registrar que em análise visual realizada pela ferramenta *Google Earth* não foi verificada variação significativa nas alturas das edificações, largura das ruas e distância entre edificações, nas rotas de medição. Por este motivo, os parâmetros Δh_2 , φ , b e w foram considerados constantes em todos os pontos simulados, com os seguintes valores respectivos: 4,5 metros, 90° , 20 metros e 10 metros.

O modelo da Rec. P.1411 caso específico urbano NLoS apresenta um baixo erro RMS se comparado com o modelo Log-Distância, e o seu resultado se assemelha ao comportamento deste modelo.

Observa-se que próximo a 400 metros o modelo é justo em relação às medições realizadas, subestimando sutilmente a atenuação, enquanto, à medida que o receptor se afasta do transmissor, o modelo tende a ser sutilmente pessimista após 750 metros, superestimando a atenuação.

Analisando-se as medições realizadas podemos citar que há a concentração de pontos de medição em três distâncias ao longo do percurso. Tais distâncias, em torno de 450, 660 e 730 metros, referem-se no mapa às medições realizadas nas três ruas paralelas entre si, mas perpendiculares à direção de propagação: rua Acapuva (a), rua José roberto (b) e rua Frederico de Albuquerque (c), respectivamente. Analisando a Figura 28 é possível verificar que a atenuação tem variação média de 14 dB na distância (a), de 10 dB na distância (b) e de 6 dB na distância (c).

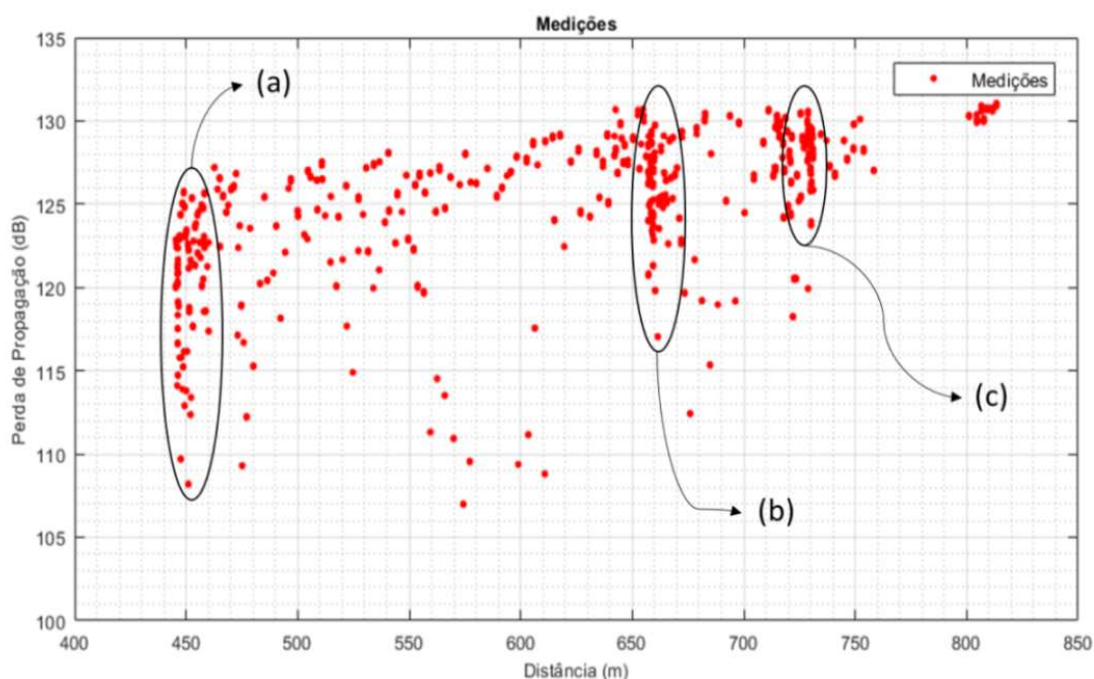


Figura 28 – Pontos de medição relativos às ruas paralelas

O que pode explicar o comportamento das diferentes variações das perdas de propagação nos pontos (a), (b) e (c) são as três regiões de onda dominante. De acordo com a Figura 10 é possível verificar que quanto mais próximo ao transmissor, a componente de onda dominante nos níveis de recepção é dada pela onda incidente direta, além de ondas refletidas (com maior influência) e difratadas. Nesta região, a variação da intensidade do sinal é maior devido à proximidade ao transmissor. Na medida em que se afasta, a onda incidente dominante nos níveis de recepção é a refletida, além da contribuição das ondas difratadas com menor intensidade. Na terceira região de onda incidente dominante, a contribuição de ondas difratadas é maior do que as ondas refletidas. Pode-se concluir desta forma que a variação de perdas em região mais distante ao transmissor em ambiente com *clutter* urbano é menor do que próximo ao mesmo, devido não apenas às regiões de onda dominante, mas também pela atenuação logarítmica com a distância.

Adicionalmente, analisando a equação L_{rts} da Rec. P.1411 - caso específico, existem variáveis relacionadas à altura do receptor móvel em relação ao *roof-top* e à orientação da rua em relação a direção do transmissor.

$$L_{rts} = -8.2 - 10 \cdot \log_{10}(w) + 10 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(\Delta h_2) + L_{ori} \quad (5.8)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354 \cdot \varphi; & \text{para } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0,075 \cdot (\varphi - 35); & \text{para } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4.0 - 0,114 \cdot (\varphi - 55); & \text{para } 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases} \quad (5.9)$$

onde $\Delta h_2 = h_r - h_2$

φ = Ângulo no plano horizontal entre a orientação da rua e a direção ao transmissor em graus decimais. (Ver Figura 8 e 9)

w = Largura da rua em metros

Considerando que as ruas são perpendiculares a frente de onda incidente, a variação de L_{ori} ao longo de uma rua será no máximo de 4 dB. Embora tenha sido utilizado para o cálculo da curva da Rec. P.1411 - caso específico, um *roof-top* médio de 6 metros (edificações de 2 andares) verifica-se na prática que existem pontos onde a edificação na direção do transmissor possui um ou mesmo três andares, o que pode variar o valor de Δh_2 em até 6 metros, dependendo do local, resultando em variações de até 15 dB no termo

$20 \cdot \log_{10}(\Delta h_2)$ da equação, especialmente na primeira rua (a). Nas duas ruas paralelas posteriores, (b) e (c), na medida em que se afasta do transmissor, devido ao maior número de edificações na direção do transmissor, a variação da altura do *roof-top* médio tende a ser menor, variando em menor grau o valor de Δh_2 , e, conseqüentemente a variação da atenuação nestas ruas.

5.3.6 Modelo SUI

O modelo proposto pelo grupo de trabalho de acesso de banda larga sem fio IEEE 802.16 da *Stanford University Interim*, utiliza equação que se assemelha ao modelo Log-Distância, contendo expoente de perda de propagação γ e fatores que possuem variáveis relacionadas às alturas da antena transmissora e receptora. O terreno tipo B foi utilizado para o cálculo da perda de propagação deste modelo, onde os parâmetros a, b e c possuem, respectivamente, os valores 4, 0,0065 e 17,1.

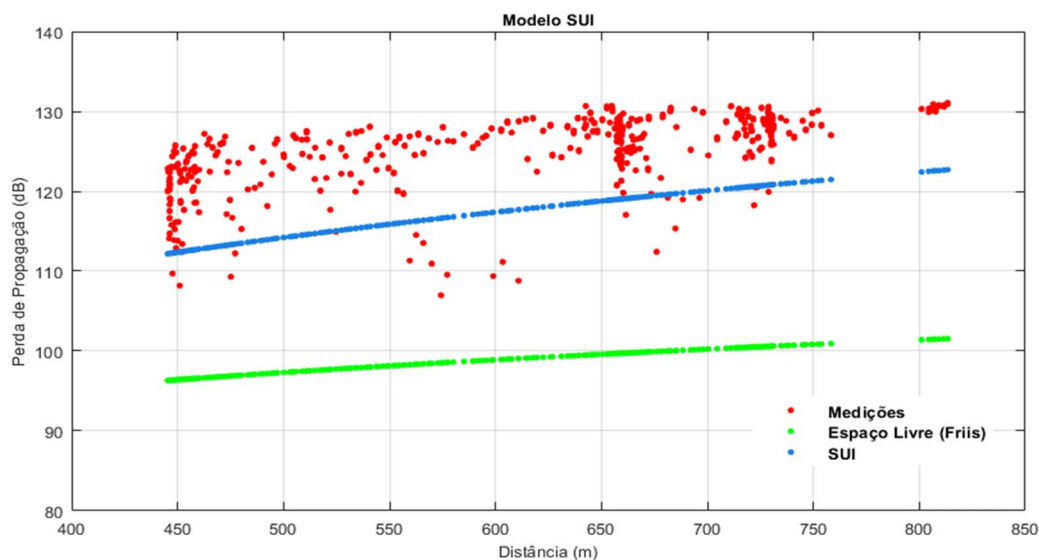


Figura 29 – SUI x Medições

μ_L	σ	RMS
7,79	2,98	8,34

Tabela 15 – Erro SUI

O terreno tipo B é caracterizado por solos acidentados, com vegetação rara ou terrenos planos com densidades moderadas a pesadas de árvores, e pode ser extrapolado para ambiente urbano.

Observa-se, pela Figura 29, que o modelo se apresentou otimista em relação às medidas realizadas. O erro RMS de 8,34 e erro médio de 7,79 indicam que este modelo pode ter seu expoente de perda de propagação γ mais bem ajustado ao ambiente em que o sistema se encontra inserido, da mesma forma que o valor de n foi obtido para o modelo Log-Distância, resultando em menor erro médio e RMS, otimizando o modelo ao ambiente.

5.4 Resumo Modelos

A Figura 30 abaixo contempla os modelos conjuntamente, a exceção do ECC-33, por ter apresentado erro RMS muito elevado.

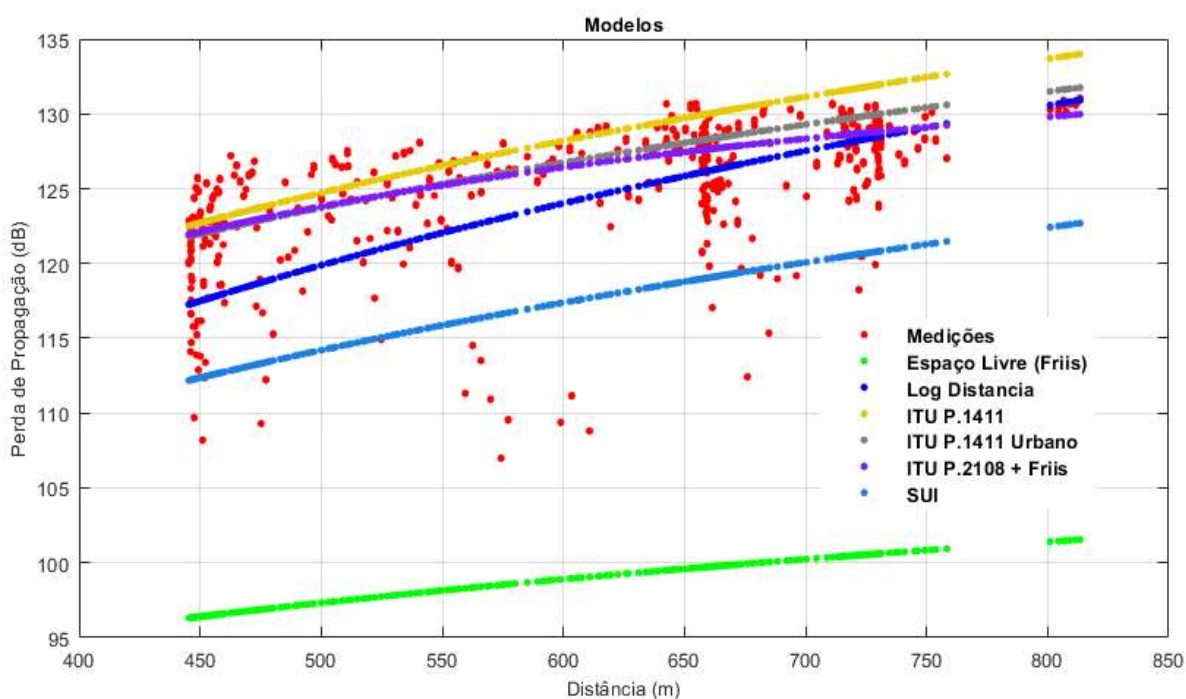


Figura 30 – Modelos x Medições

Modelos	μ_L	σ	<i>RMS</i>
Log-Distância	3,23	2,84	4,30
ECC-33 CM	28,62	3,99	28,89
ECC-33 CG	8,92	3,99	9,77
P.2108 + <i>Friis</i>	2,75	3,28	4,28
P.1411 Geral	3,88	3,66	5,34
P.1411 Urbano	2,97	3,35	4,48
SUI	7,79	2,98	8,34

Tabela 16 – Erro dos Modelos

Analizando-se a Figura 30 e a Tabela 17 de erros podemos concluir que os modelos “Rec. P.2108 + *Friis*” e o modelo “Rec. P.1411Urbano NLoS” apresentaram resultado com os menores erros RMS e erro médio absoluto, com bom ajuste da curva aos dados coletados em campanha de medição. Já o modelo ECC-33 mostrou não estar bem ajustado ao ambiente de medições em nenhuma das duas situações por apresentar o maior erro médio absoluto e o maior erro RMS, motivo pelo qual não foi incluído na impressão da Figura 30. Como citado anteriormente, o modelo Log-Distância por ter o valor do expoente de perda de propagação n ajustado pelo método de regressão não linear, de posse das medições realizadas, serve como referência para os demais os seus resultados. Já o modelo SUI apresentou a menor dispersão em torno do erro médio absoluto, porém o valor RMS ainda tem espaço para melhoria através de ajustes no expoente de perda de propagação γ .

5.5 Modelos Propostos

A aplicação dos modelos concebidos em décadas passadas através de métodos empíricos, como o caso do SUI e ECC-33, em outras regiões, carece de cuidado maior na utilização atual. Isto pois os ambientes mudam com o tempo, alterando a densidade de objetos circundantes, pessoas, veículos, etc. A alteração do ambiente com *clutter* com o passar do tempo, dentre outros, é o que motiva a utilização de ferramentas de predição desenvolvidas com modelos mais atuais e frequentemente flexíveis, que permitem ajustes em seus coeficientes a partir de dados colhidos em campo, nas regiões de interesse.

A utilização de modelos parametrizados a partir de dados coletados em regiões diferentes daquela em estudo pode acarretar erros de predição consideráveis. Esses erros

podem ser minimizados através de ajustes de parametrização do modelo com dados obtidos na própria região para a qual a predição será realizada, ou em regiões topograficamente e morfologicamente equivalentes.

Assim, analisando o resultado da aplicação dos modelos neste trabalho propõe-se a parametrização dos modelos SUI e P.1411 urbano NLoS, em relação ao ambiente onde as medições foram realizadas.

A metodologia para realizar o ajuste de parametrização utiliza o método dos mínimos quadrados citada na seção 5.1, com auxílio computacional do MATLAB®, ferramenta *cftool*, método não linear dos mínimos quadrados, algoritmo de *Levenberg-Marquardt*, tendo como base as medições realizadas no ambiente propriamente dito.

5.5.1 Parametrização Modelo SUI

O modelo SUI, conforme citado, utiliza equação semelhante ao modelo Log-Distância, acrescentando os fatores X_f , correção em função da frequência acima de 2000 MHz, X_h em função da altura do receptor móvel e γ que é o expoente de perda de propagação. O terreno tipo B foi utilizado para o cálculo da perda de propagação deste modelo, que é indicado para ambientes urbanos, onde os parâmetros a, b e c possuem, respectivamente, os valores 4, 0,0065 e 17,1.

$$L_{SUI} = A + 10.\gamma.\log_{10}(d/d_0) + X_f + X_h + X_\sigma; \text{ para } d > d_0 \quad (5.10)$$

$$A = 20.\log_{10}\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (5.11)$$

$$\gamma = a - b.h_1 + \frac{c}{h_1} \quad (5.12)$$

$$X_f = 6.\log_{10}\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (5.13)$$

$$X_h = -10,8.LOG\left(\frac{h_2}{2}\right); \text{ para terrenos tipo A e B} \quad (5.14)$$

A parametrização deste modelo será o ajuste de γ para o menor erro RMS alterando-se os valores de a , b e c pela ferramenta *cftool* do MATLAB®. Os valores retornados por meio computacional foram:

$$a = 0,4688$$

$$b = -0,0892$$

$$c = 0,8876$$

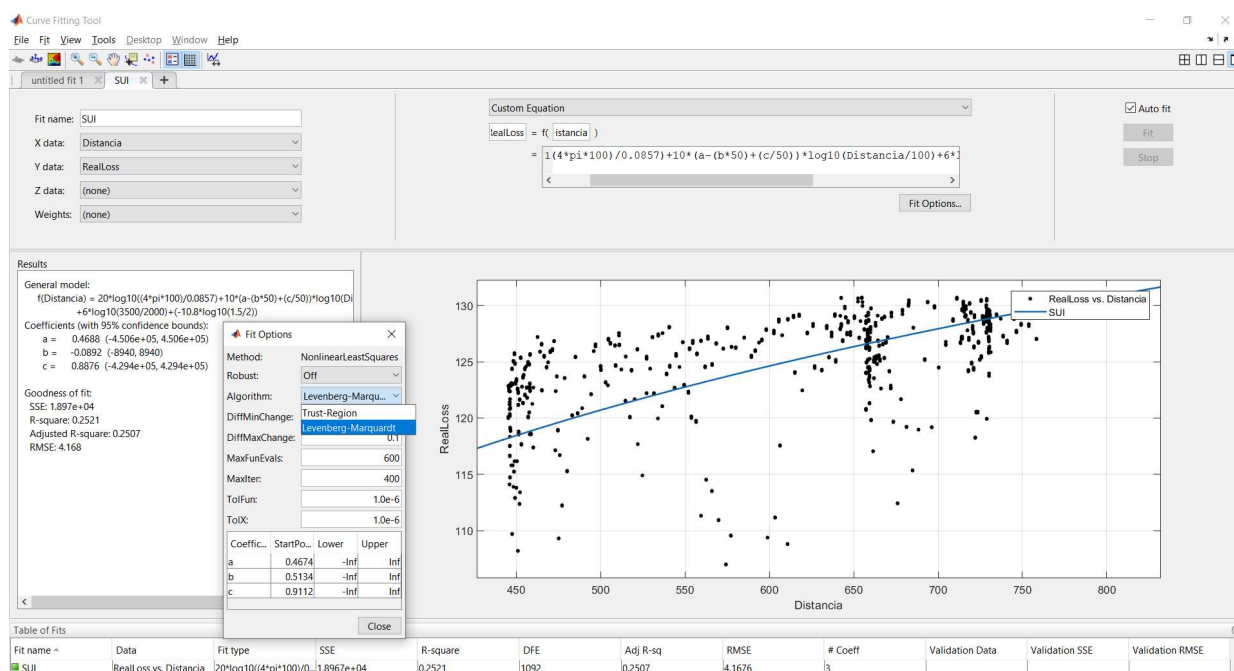


Figura 31 – Modelo SUI parametrizado (*cftool*)

Com os valores de a , b e c ajustados, o valor do expoente de perda de propagação γ do modelo SUI passa a ter valor igual a 4,9466. Anteriormente este valor era de 4,0170. O aumento no valor de γ indica que o ambiente em que as medições foram realizadas possui maior concentração urbana do que o ajuste proposto para o terreno tipo B.

μ_L	σ	<i>RMS</i>
3.04	2.84	4.16

Tabela 17 – Erros do Modelo SUI Parametrizado

Observa-se que houve diminuição dos erros ao ajustar o parâmetro γ em função das medidas realizadas no ambiente de medições adequando a equação à morfologia e *clutter* do terreno real. O erro RMS diminuiu de 8,34 para 4,16.

5.5.2 Parametrização Rec. P.1411 - Caso Específico

A parametrização da Recomendação P.1411 no caso específico, onde a estação transmissora está acima do *roof-top* médio e o terminal receptor está abaixo, em ambiente urbano NLoS recai no termo L_{msd} da equação:

$$L_{1411S} = L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} \quad (5.15)$$

$$L_{msd} = L_{bs} + k_a + k_d \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{1000}\right) + k_f \cdot \log_{10}(f) - 9 \cdot \log_{10}(b) \quad (5.16)$$

Os parâmetros k_a e k_d são relacionados à altura do transmissor e do *roof-top* médio, sendo que k_a ainda possui relação com frequências acima de 2000MHz.

A parametrização deste modelo será o ajuste de k_a e k_d de forma que o modelo tenha o menor erro RMS através da ferramenta *cftool* do MATLAB®. Os valores retornados por meio computacional foram:

$$k_a = 68,41$$

$$k_d = 13,87$$

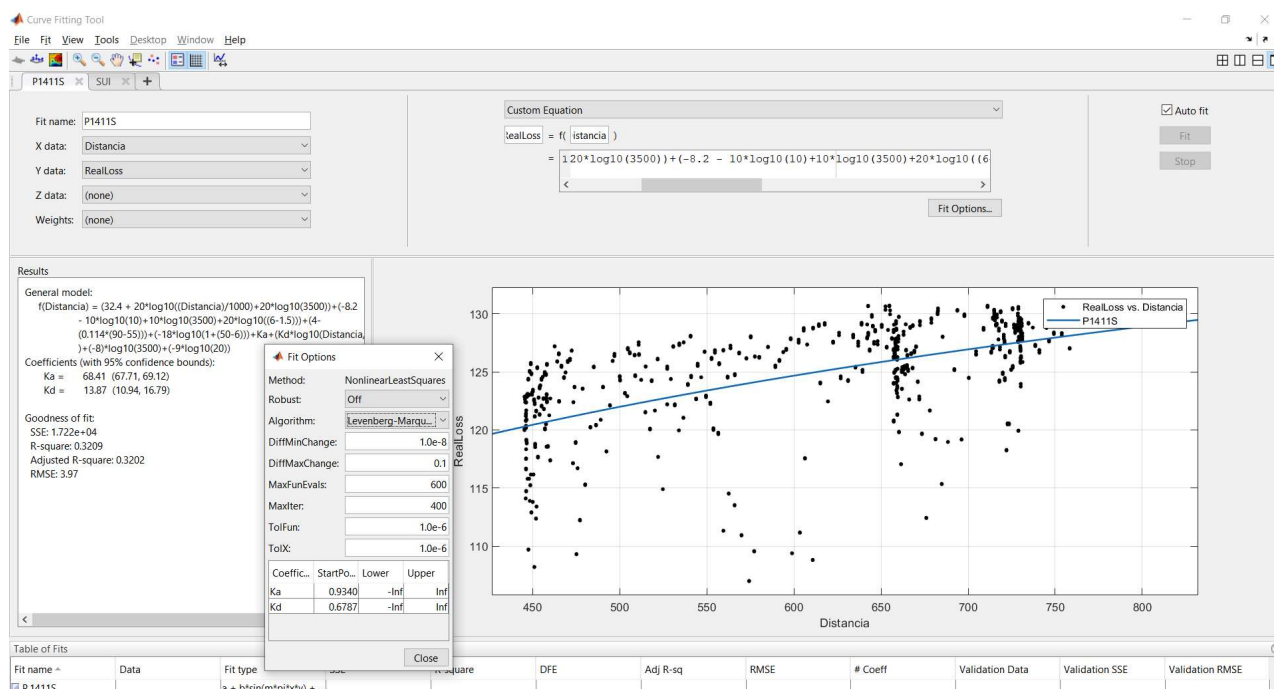


Figura 32 – Rec. P.1411 Caso Específico NLoS parametrizada (*cftool*)

Os valores originários para k_a e k_d de acordo com a Recomendação são 71,4 e 18, respectivamente. Com os valores ajustados ao ambiente de medições e frequência central de 3,5 GHz, o erro RMS foi otimizado conforme a tabela abaixo.

μ_L	σ	RMS
2,88	2,72	3,97

Tabela 18 – Erros Rec. P.1411 Caso Específico NLoS parametrizada

Da mesma forma como ocorreu com o modelo SUI parametrizado, houve diminuição do erro RMS para a Rec. P.1411 caso específico NLoS parametrizada. O erro RMS diminuiu de 4,48 para 3,97. O ajuste em tais parâmetros adequa o modelo ao ambiente onde as medições foram realizadas.

5.6 Análise dos Modelos Propostos

Os modelos propostos ao ambiente onde as medições foram realizadas apresentam as curvas da Figura 33. Observa-se que o modelo da Recomendação ITU-R P.1411 urbano NLoS parametrizado apresenta menor erro RMS e menor erro médio absoluto. Já o modelo SUI proposto aponta tendência de superestimar a perda de propagação acima de 800 metros de distância ao transmissor.

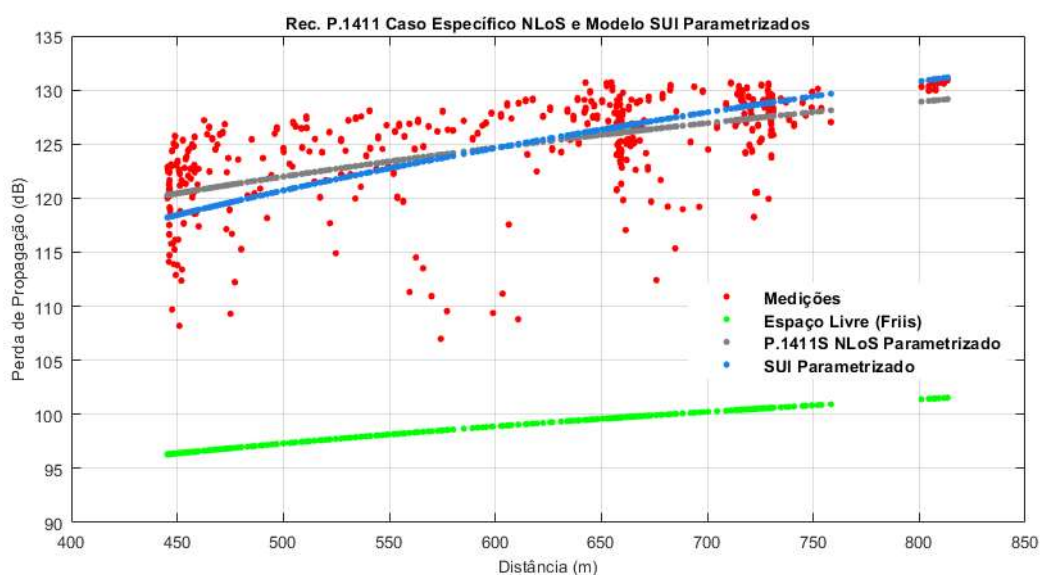


Figura 33 – P.1411 Urbano NLoS e SUI – Modelos propostos

A Figura 34 apresenta análise comparativa de erros dos modelos utilizados incluindo os modelos parametrizados propostos. Cabe lembrar que o Log-Distância foi um modelo cujo expoente de perda de propagação foi obtido por método computacional e serve como base de comparação dos outros modelos. Embora os modelos propostos apresentem boa resposta ao ambiente de medições, em especial o modelo P.1411, importa concluir que o modelo “P.2108 + Friis” apresentou ótimo resultado com o menor erro médio. Este modelo utiliza apenas as variáveis frequência de operação e distância ao transmissor para a predição, o que o torna simples de ser aplicado em condições com *clutter* semelhante, com o mínimo de informações necessárias.

De outra sorte, o modelo ECC33 apresentou o maior erro RMS e erro médio absoluto. Como este modelo foi concebido em Tóquio, o conceito de Cidade Média e Cidade Grande pode não estar bem adequado ao ambiente onde as medições foram realizadas, cabendo ajustes em seus coeficientes para a realidade local.

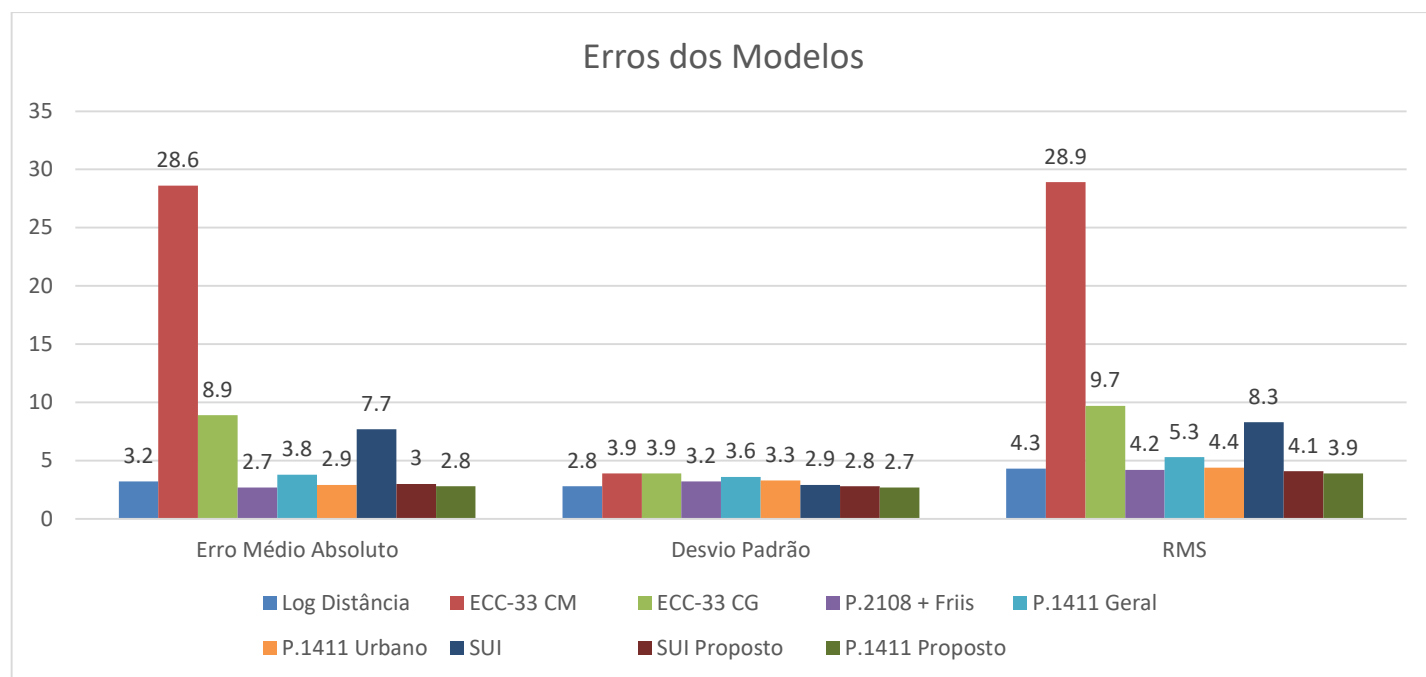


Figura 34 – Erros dos diversos modelos e dos propostos

Os modelos propostos foram obtidos após processamento dos dados reais obtidos em campanha de medição. A aplicação destes modelos é útil na predição de perda de propagação em bairros com ambiente com *clutter* semelhante ou mesmo nos setores não cobertos pelo ângulo de radiação da antena transmissora para a mesma estação rádio-base.

Capítulo 6 - Conclusão

O cenário de utilização da faixa de 3,5 GHz para a quinta geração urge no Brasil com a indicação de licitação para o primeiro semestre de 2021, apontado como o maior leilão de radiofrequência do Brasil, com valores estimados da ordem de R\$33 bilhões. Há previsão no edital de implementação do 5G nas capitais brasileiras já para o ano de 2022. Neste trabalho, a aplicação de dados coletados em campanha de medição para a análise em banda estreita do comportamento da perda de propagação em ambiente com *clutter* urbano, na faixa em 3,5GHz, no bairro de Higienópolis, Rio de Janeiro/RJ, serviu para validar modelos e recomendações da ITU-R em cenário real com cobertura até 1 km, que normalmente representa o alcance de células para o respectivo tipo de ambiente analisado.

Embora os modelos tenham sido exaustivamente citados pela literatura como ferramenta de predição para faixas de frequências inferiores a utilizada neste trabalho, podemos apontar após a análise dos resultados aqueles que apresentaram melhor adequação ao ambiente medido, validando sua aplicação para a faixa de 3,5 GHz.

Os modelos propostos através do método dos mínimos quadrados realizam a adequação ao ambiente urbano onde as medições foram realizadas sendo válida a sua extrapolação para ambientes similares.

Algumas considerações finais podem ser obtidas dos resultados apresentados:

- Das medições realizadas válidas, 18 pontos LoS foram removidos do universo amostral, vez que o trabalho teve foco na análise dos modelos para ponto NLoS;
- A utilização do método dos mínimos quadrados, algoritmo de *Levenberg-Marquardt*, obteve êxito em reduzir o erro médio absoluto, o desvio padrão e o erro RMS nos dois modelos propostos (SUI e Rec. ITU-R P.1411 Urbano) ajustando os coeficientes dos modelos ao ambiente de medições;
- A utilização do software MATLAB® com a ferramenta “*Curve Fitting Tool*” torna a implementação do método dos mínimos quadrados simplificada, não requerendo grande esforço computacional.
- Na medida em que o receptor móvel se distancia do transmissor, a variação de perda de propagação em ruas paralelas entre si, mas perpendiculares à direção de propagação, é maior quanto mais próximo ao transmissor. Tal variação provavelmente deveu-se às diferentes predominâncias de efeitos de

propagação multipercurso do sinal nas três regiões de onda dominante (Figura 8), além da consolidação da altura do *roof-top* médio, na medida em que a distância entre transmissor e receptor torna-se maior.

- O modelo da “Rec. ITU-R P.2108 + *Friis*” apresentou ótimo resultado de predição em relação ambiente de medições, sendo o mais recomendado para este tipo de ambiente, com o mínimo de variáveis necessárias (Distância e Frequência), seguido da Rec. ITU-R P.1411, caso específico ambiente urbano, NLoS.
- Dos modelos propostos, a Rec. ITU-R P.1411, caso específico ambiente urbano NLoS, é o recomendado por apresentar menor erro RMS, desvio-padrão e erro médio absoluto em relação ao SUI.

6.1 Trabalhos Futuros

Considerando que as medições realizadas e utilizadas neste trabalho tinham outro propósito, recomenda-se para trabalhos futuros:

- Campanha de medições em ambiente com *clutter* urbano/suburbano similar ao bairro de Higienópolis considerando pontos LoS e NLoS, com as respectivas coordenadas, anotação do ângulo ϕ , altura h_r , para a validação de modelos que utilizam parametrização LoS e comparação com os modelos propostos neste trabalho;
- Com o avanço do poder de processamento computacional e disponibilidade de banco de dados geográfico, sugere-se a utilização de simulações utilizando-se modelos híbridos GBSM e determinísticos, como o método de traçado de raios;
- A disponibilidade de banco de dados de medições realizadas na faixa de 3,5 GHz de outros trabalhos acadêmicos pode ser útil para comparar e validar os modelos propostos na seção 5.5 deste trabalho, levando em consideração o perfil morfológico do ambiente de medição em estudo;
- Utilizar outras metodologias para proposição de modelos, diferentes do método dos mínimos quadrados, algoritmo de *Levenberg-Marquardt*;

- Com a facilidade de se obter VANT (drone) atualmente, sugere-se embarcar analisador de espectro concebido através de Rádio Definido por Software (RDS) para medições em altitude com fim de validar modelos que utilizam variáveis como altura de *roof-top* e altura do receptor [35];
- Sugere-se campanha de medições em ambiente com *clutter* urbano em áreas internas para validação de modelos na faixa de 3,5GHz BEL (*Buiding Entry Loss*), tendo em vista que a utilização de terminais em ambientes urbanos ocorre nesta situação em grande parte do tempo.

Bibliografia

- [1] ericsson.com, "Mobile Data Traffic Outlook," Ericsson Inc., [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/june-2020/mobile-data-traffic-outlook#:~:text=Global%20total%20mobile%20data%20traffic,164EB%20per%20month%20in%202025.&text=By%202025%2C%20we%20expect%20that,be%20carried%20by%205G%20networks..> [Accessed 24 Oct 2020].
- [2] V. L. G. Mota, R. Carvalho, C. Correa, R. B. Di Renna, V. Magri, T. Ferreira, P. Castellanos e L. Matos, "Evolução da tecnologia de telefonia móvel e estudo e caracterização de um sistema móvel 5G de quinta geração," *ENGEVISTA*, vol. 21, nº 1, pp. 154-175, Fevereiro 2019.
- [3] L. J. Vora, "Evolution of Mobile Generation Technology: 1G to 5G and review of upcoming wireless technology," *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research (IJMTER)*, vol. V. 02, 2015.
- [4] A. Zaidi, F. Athley, J. Medbo, U. Gustavsson, G. Durisi e X. Chen, 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology, 2018, pp. 7-26.
- [5] G. Ancans, B. Vjaceslavs, A. Ancans e D. Kalibatiene, *Spectrum Considerations for 5G Mobile Communication Systems*, Riga, 2016.
- [6] A. Morgado, K. M. S. Huq., S. Mumtaz e J. Rodriguez, *A survey of 5G technologies: regulatory, standardization and industrial perspectives*, Aveiro, 2017.
- [7] Recommendation ITU-R P.2108-0, "Prediction of Clutter Loss," International Telecommunication Union, Geneva, 2017.
- [8] M. S. Mollel e M. Kisangiri, *Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Mobile Communication*, vol. 05, 2014.
- [9] E. O. T. K. K. F. Y. Okumura, *Field strength and its variability in VHF and UHF Land-Mobile radio service - Review of the Electrical Communication Laboratory*, vol. 16, 1968, pp. 825-873.
- [10] T. S. Rappaport, *Comunicações Sem Fio - Princípios e Práticas*, São Paulo - SP: Prentice Hall, 2009.
- [11] L. J. MATOS, *Caracterização do Canal de Propagação Rádio Móvel. Apostila da Professora..*
- [12] International Telecommunications Union - ITU, *ITU-R P.1411-10 "Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz"*, Geneva, 2019.
- [13] Tesla - Concursos públicos para engenharia, 09 Fevereiro 2014. [Online]. Available: <https://teslaconcursos.com.br/wp-content/uploads/2016/05/Propagacao.pdf>. [Acesso em 18 Janeiro 2021].
- [14] K. Pahlavan e A. H. Levesque, *Wireless Information Networks*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [15] H. T. Friis, *A Note on a Simple Transmission Formula - Proceedings of the I.R.E. and Waves and Electrons*, 1946.
- [16] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*. Second Edition., John Wiley & Sons Ltd., 2000.

- [17] M. D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*, 1 ed. ed., CRC Press, 1993.
- [18] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 317-325, 03 August 1980.
- [19] International Telecommunication Union - ITU, *ITU-R P.1546-6 "Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz"*, Geneva, 2019.
- [20] European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research, "'Cost Action 231", *Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems: Final Report*," EUR 18957, European Comission, 1999.
- [21] M. Almeida, *Vehicular technologies: Increasing Connectivity*, 1st ed., Rijeka: InTech, 2011, pp. 403-410.
- [22] G. A. CAVALCANTE, *Otimização de modelos de predição da perda de propagação aplicáveis a 3,5GHz utilizando algoritmos genéticos.*, Natal, Universidade Federal do Rio Grande do Norte: Dissertação de Mestrado , 2010.
- [23] International Telecommunication Union - ITU, *Recommendation ITU-R P.341-6: The Concept of Transmission Loss for Radio Links*, Geneva, 2016.
- [24] T. S. R. S. R. T. A. T. A. G. I. Z. K. I. R. O. K. A. P. a. J. J. Shu Suna, "Propagation Path Loss Models for 5G Urban Micro and Macro-Cellular Scenarios," *NYU WIRELESS and Tandon School of Engineering*, 23 February 2016.
- [25] M. Sasaki, M. Inomata, W. Yamada e Y. Takatori, *ITU-R Study Group 3 Activities towards Use of High Frequency Bands for 5G and Other Wireless Communication Systems*, 9 ed., vol. 15, 2017.
- [26] C. V. R. Ron, *Caracterização do Canal Rádio em Banda Larga na Faixa de 3.5 GHz em Ambiente Urbano*, Rio de Janeiro: Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, 2009.
- [27] S. D. Carvalho, *Sondagem em Faixa Larga de Canal em Ambiente Suburbano para Sistema de Quinta Geração*, Niterói: Universidade Federal Fluminense - UFF/RJ, 2018.
- [28] Tektronix, "Calculating RF Power from IQ Samples," 07 March 2017. [Online]. Available: <https://www.tek.com/blog/calculating-rf-power-iq-samples>. [Acesso em 28 abril 2021].
- [29] R. C. Quinino, E. Suyama, E. A. Reis e L. F. Bessegato, *Uma Abordagem Alternativa para o Ensino do Método dos Mínimos Quadrados no Nível Médio e Início do Curso Superior*, Juiz de Fora, MG: Departamento de Estatística, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013.
- [30] M. YANG e W. SHI, *A linear least square method of propagation model tuning for 3G radio network planning*. *Natural Computation*, 2008. INC'08., IEEE, 2008, pp. 150-154.
- [31] T. K. S. MOON e C. WYNN, *Mathematical methods and algorithms for signal processing*, New Jersey: Prentice Hall, 2000.
- [32] D. W. Marquardt, *An algorithm for least-squares estimation og nonlinear parameters*. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, 2 ed., vol. 11, 1963, pp. 431-441.

- [33] T. Chai e R. R. Draxler, “Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature,” *Geoscientific Model Development*, June 2014.
- [34] International Telecommunication Union - ITU, *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4000 MHz*, Geneva, 2019.
- [35] R. F. Hanthequeste, G. B. A. Orofino, P. V. A. d. Freitas, P. . V. G. Castellanos, A. A. C. Canavitsas e R. C. Bentes, *Implementação De Um Analisador De Espectro Utilizando O Conceito De Rádio Definido Por Software*, Niterói, 2020.
- [36] I. W. D. C. M. S. a. M. B. V. Abhayawardhana, *Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems*, VTC 2005-Spring: 2005 IEEE 61st, 2005.