

*Estudo Comparativo entre Modelos
de Propagação para Ondas
Milimétricas*

Gustavo Kreuzer Marengo

Abril /2022

*Estudo Comparativo entre Modelos de Propagação
para Ondas Milimétricas*

Gustavo Kreuzer Marengo

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de
Telecomunicações, como parte dos requisitos
para obtenção do Título de Mestre em
Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arismar Cerqueira
Sodré Junior

Santa Rita do Sapucaí-MG
2022

Marengo, Gustavo Kreuzer
M324e Estudo Comparativo entre Modelos de Propagação para Ondas Milimétricas / Gustavo Kreuzer Marengo . – Santa Rita do Sapucaí, 2021.
101 p.
Orientador: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior.
Dissertação de Mestrado em Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.
1. 5G 2. Modelos de Propagação 3. Ondas Milimétricas 4. Propagação. 5. Mestrado em Telecomunicações. I. Sodré Junior, Arismar Cerqueira. II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.
CDU 621.39

Ficha Catalográfica elaborada pelo Bibliotecário da Instituição
CRB6-2718 – Paulo Eduardo de Almeida

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior

INATEL

Dr. Igor Feliciano da Costa

ESSS

Prof. Dr. Carlos Nazareth Mota Marins

INATEL

Coordenador do Curso de Mestrado
Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar em todo o meu trajeto pessoal e profissional. Sem Ele, não teria a fé e determinação de atingir os meus objetivos

Ao meu pai, Luiz Carlos Marengo, por todos os ensinamentos, suporte e auxílio em todos os momentos de minha vida. Também faço memória a minha mãe Mabel Kreuzer pela paciência, apoio, suporte e tudo que pode me oferecer durante minha jornada de vida até o presente momento. Agradeço aos órgãos Finatel e CAPES que bancaram com bolsa de estudo durante o meu período de mestrado. Agradeço ao Professor Arismar e aos demais colegas do laboratório WOCA por todo apoio e ajuda, os quais sempre foram muito bem-vindas.

Índice

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xii
Lista de Símbolos	xiii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xv
Lista de Publicações	xviii
Resumo	xix
Abstract	xx
Capítulo 1	1
1. Introdução	1
1.1. Contextualização e Motivação	2
1.2. Revisão Bibliográfica	6
1.3. Contribuições	9
1.4. Estrutura da Dissertação	9
Capítulo 2	10
2. Fundamentos Teóricos	11
2.1. Introdução aos Modelos de Propagação	11
2.2. Modelos Estatísticos de Predição em Pequena Escala	13
2.3. Modelos Estatísticos de Predição em Larga Escala	16
2.4. Modelos de Propagação para Sinais em 5G	19
2.4.1. Modelos de Propagação em FR1	25
2.4.2. Modelos de Propagação para FR2	27
2.4.2.1 Modelo NYUSIM	23
2.4.2.2 Modelo METIS	25
2.4.2.3 Modelo mmMAGIC	27
2.4.2.4 Modelo 3GPP.TR.38.901	29
2.4.2.5 Modelo 5GCM	31
Capítulo 3	33
3. Análises para Ambiente <i>Indoor</i> na Banda de 28 GHz	33
3.1. Características do Meio de Propagação em 28 GHz	36

3.2. Comparação dos Modelos de Propagação.....	37
3.2.1 Comparação Quantitativa.....	38
3.2.1.1 Erro Quadrático Médio (MSE).....	38
3.2.1.2 Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE).....	38
3.2.1.3 Erro Absoluto Médio (MAE).....	39
3.2.1.4 Erro Absoluto Percentual Médio (MAPE).....	39
3.2.2 Comparação Qualitativa.....	40
3.3. Determinação MAPE para Modelos <i>Indoor</i> com Linha de Visada.....	41
3.4. Determinação MAPE para Modelos <i>Indoor</i> sem Linha de Visada.....	45
3.5. Modelos de Propagação em Ambientes <i>Indoor</i> LOS.....	47
3.5.1 Modelo mmMAGIC <i>Indoor</i> LOS.....	48
3.5.2 Modelo 5GCM <i>Indoor</i> LOS.....	49
3.5.3 Modelo 3GPP TR 38 901 <i>Indoor</i> LOS.....	49
3.5.4 Modelo <i>Free Space Indoor</i> LOS.....	50
3.5.5 Modelo ABG <i>Indoor</i> LOS.....	51
3.5.6 Modelo CI <i>Indoor</i> LOS.....	52
3.6. Análise das Incertezas em Ambientes <i>Indoor</i> LOS.....	53
3.7. Modelos de Propagação em Ambientes <i>Indoor</i> LOS.....	55
3.7.1 Modelo mmMAGIC <i>Indoor</i> NLOS.....	55
3.7.2 Modelo 5GCM <i>Indoor</i> NLOS.....	56
3.7.3 Modelo 3GPP TR 38 901 <i>Indoor</i> LOS.....	57
3.7.4 Modelo ABG <i>Indoor</i> NLOS.....	58
3.7.5 Modelo CI <i>Indoor</i> NLOS.....	58
3.8. Análise das Incertezas em Ambientes <i>Indoor</i> NLOS.....	59
Capítulo 4.....	61
4. Análises para Ambiente <i>Outdoor</i> na Banda de 28 GHz.....	61
4.1. Cenário UMi com Linha de Visada (LOS).....	61
4.2. Cenário UMi sem Linha de Visada (NLOS).....	64
4.3. Modelos de Propagação em Ambientes UMi LOS.....	67
4.3.1 Modelo NYUSIM UMi LOS.....	67
4.3.2 Modelo mmMAGIC UMi LOS.....	68
4.3.3 Modelo METIS UMi LOS.....	69
4.3.4 Modelo de 5GCM UMi LOS.....;	69
4.3.5 Modelo 3GPP TR 38 901 UMi LOS.....	70
4.3.6 Modelo <i>Free Space</i> UMi LOS.....	71
4.3.7 Modelo ABG UMi LOS.....	72
4.3.8 Modelo CI UMi LOS.....	73

4.4. Análise das Incertezas em Ambientes UMi LOS.....	73
4.5. Modelos de Propagação em Ambientes UMi NLOS.....	75
4.5.1 Modelo NYUSIM UMi LOS.....	75
4.5.2 Modelo METIS UMi NLOS.....	76
4.5.3 Modelo mmMAGIC UMi NLOS.....	77
4.5.4 Modelo 3GPP TR 38 901 UMi NLOS.....	78
4.5.5 Modelo ABG UMi NLOS.....	79
4.5.6 Modelo 5GCM UMi NLOS.....	80
4.5.7 Modelo CI UMi NLOS.....	81
4.6. Análise das Incertezas em Ambientes UMi NLOS.....	82
4.7 Resumo dos Resultados Obtidos.....	83
Capítulo 5.....	84
5. Conclusões e Trabalhos Futuros	84
5.1. Conclusões.....	84
5.2. Trabalhos Futuros.....	86
Apêndice 1.....	93
Referências Bibliográficas	96

Lista de Figuras

Figura 1.1. <i>Pilares da rede móvel 5G</i>	3
Figura 1.2. <i>Bandas de frequência utilizadas no 5G NR</i>	4
Figura 2.1. <i>Ilustração dos fenômenos causados por obstáculos durante a propagação de um sinal</i>	14
Figura 2.2. <i>Principais pilares a se considerar em um modelamento de canal de propagação</i>	15
Figura 2.3. <i>Ilustração de um cenário de propagação Rayleigh</i>	16
Figura 2.4. <i>Atenuação no Espaço Livre para as frequências de 3 GHz, 28 GHz e 60 GHz</i>	23
Figura 2.5. <i>Passos esquematizados do modelo de propagação METIS</i>	28
Figura 2.6. <i>Passos esquematizados do modelo de propagação 3GPP TR 38.901</i>	33
Figura 3.1. <i>Atenuação por gases atmosféricos em função da frequência</i>	36
Figura 3.2. <i>Curvas aproximadas dos ambientes em cenário Indoor LOS</i>	42
Figura 3.3. <i>Curvas referentes a os modelos de propagação em cenário Indoor LOS</i>	43
Figura 3.4. <i>Curvas aproximadas dos ambientes em cenário Indoor NLOS</i>	46
Figura 3.5. <i>Curvas referentes aos modelos de propagação em cenário Indoor NLOS</i>	46
Figura 3.6. <i>Modelo mmMAGIC x Dados de ambientes em cenário Indoor LOS</i>	48
Figura 3.7. <i>Modelo 5GCM x Dados de ambientes em cenário Indoor LOS</i>	49
Figura 3.8. <i>Modelo 3GPP TR 38 901 x Dados de ambientes em cenários Indoor LOS</i>	50
Figura 3.9. <i>Modelo FreeSpace x Dados de ambientes em cenários Indoor LOS</i>	51
Figura 3.10. <i>Modelo ABG x Dados de ambientes em cenário Indoor LOS</i>	52
Figura 3.11. <i>Modelo CI x Dados de ambientes em cenário Indoor LOS</i>	53
Figura 3.12. <i>Modelo mmMAGIC x Dados de ambientes em cenário Indoor NLOS</i>	56
Figura 3.13. <i>Modelo 5GCMC x Dados de ambientes em cenário Indoor NLOS</i>	57
Figura 3.14. <i>Modelo 3GPP TR 38 901 x Dados de ambientes em cenário Indoor NLOS</i>	57
Figura 3.15. <i>Modelo ABG x Dados de ambientes em cenário Indoor NLOS</i>	58
Figura 3.16. <i>Modelo CI x Dados de ambientes em cenário Indoor NLOS</i>	59
Figura 4.1. <i>Curvas aproximadas dos ambientes em cenário UMI LOS</i>	62
Figura 4.2. <i>Curvas de modelos de propagação em cenário UMI LOS</i>	63
Figura 4.3. <i>Curvas aproximadas dos ambientes em cenário UMI NLOS</i>	65
Figura 4.4. <i>Curvas de modelos de propagação em cenário UMI NLOS</i>	66
Figura 4.5. <i>Modelo NYUSIM x Dados de ambientes em cenário UMI LOS</i>	68
Figura 4.6. <i>Modelo mmMAGIC x Dados de ambientes em cenário UMI LOS</i>	68
Figura 4.7. <i>Modelo METIS x Dados de ambientes em cenário UMI LOS</i>	69
Figura 4.8. <i>Modelo 5GCMC x Dados de ambientes em cenário UMI LOS</i>	70
Figura 4.9. <i>Modelo 3GPP TR 38 901 x Dados de ambientes em cenário UMI LOS</i>	71
Figura 4.10. <i>Modelo Free Space x Dados de ambientes em cenário UMI LOS</i>	72
Figura 4.11. <i>Modelo ABG x Dados de ambientes em cenário UMI LOS</i>	72
Figura 4.12. <i>Modelo CI x Dados de ambientes em cenário UMI LOS</i>	73

Figura 4.13. <i>Modelo NYUSIM x Dados de ambientes em cenárioUMi NLOS.....</i>	<i>76</i>
Figura 4.14. <i>Modelo METIS x Dados de ambientes em cenárioUMi NLOS.....</i>	<i>77</i>
Figura 4.15. <i>Modelo mmMAGIC x Dados de ambientes em cenárioUMi NLOS.....</i>	<i>78</i>
Figura 4.16. <i>Modelo 3GPP TR 38 901 x Dados de ambientes em cenárioUMi NLOS.....</i>	<i>79</i>
Figura 4.17. <i>Modelo ABG x Dados de ambientes em cenárioUMi NLOS.....</i>	<i>80</i>
Figura 4.18. <i>Modelo 5GCM x Dados de ambientes em cenárioUMi NLOS.....</i>	<i>81</i>
Figura 4.19. <i>Modelo CI x Dados de ambientes em cenárioUMi NLOS.....</i>	<i>82</i>

Lista de Tabelas

Tabela 1.1. <i>Estado da arte com os trabalhos analisados e as contribuições do trabalho.....</i>	10
Tabela 2.1. <i>Parâmetros para o modelo ABG em todos os tipos de cenários.....</i>	19
Tabela 2.2. <i>Parâmetros para o modelo CI em todos os tipos de cenários</i>	20
Tabela 2.3. <i>Parâmetros para o modelo CIF em todos os tipos de cenários</i>	21
Tabela 2.4. <i>Condições de aplicação do modelo Okumura</i>	24
Tabela 3.1. <i>Ambientes de medidas para o cenário de propagação Indoor LOS em 28 GHz</i>	42
Tabela 3.2. <i>Erro MAPE em cada ambiente para cada modelo em cenário Indoor LOS.....</i>	43
Tabela 3.3. <i>Ambientes de medidas para o cenário de propagação Indoor NLOS em 28 GHz.....</i>	45
Tabela 3.4. <i>Erro MAPE em cada ambiente para cada modelo em cenário Indoor NLOS.....</i>	47
Tabela 3.5. <i>Incerteza relativa para cada ambiente no cenário Indoor LOS.....</i>	53
Tabela 3.6. <i>Incerteza relativa para cada ambiente no cenário Indoor NLOS.....</i>	59
Tabela 4.1. <i>Ambientes de medidas para o cenário de propagação UMi LOS em 28 GHz.....</i>	62
Tabela 4.2. <i>Valores de MAPE de cada modelo no cenário UMi LOS em 28 GHz.....</i>	63
Tabela 4.3. <i>Ambientes de medidas para o cenário de propagação UMi NLOS em 28 GHz.....</i>	64
Tabela 4.4. <i>Valores de MAPE de cada modelo no cenário UMi NLOS em 28 GHz.....</i>	66
Tabela 4.5. <i>Incerteza relativa para cada ambiente no cenário UMi LOS.....</i>	74
Tabela 4.6. <i>Incerteza relativa para cada ambiente no cenário UMi NLOS.....</i>	83
Tabela 4.7. <i>Tabela resumo com os valores dos MAPEs de cada modelo nos diferentes cenários analisados.....</i>	83

Lista de Símbolos

S_{rk}	Sinal obtido através do k-ésimo percurso
φ	Fase do sinal
ω	Frequência angular
a_k	Amplitude do sinal
σ	Desvio padrão
f_0	Média das frequências
f_k	K-ésima frequência
N_k	Número de diferentes percursos entre transmissor e receptor
P_t	Potência de transmissão
P_r	Potência de recepção
G_t	Ganho da antena transmissora
G_r	Ganho da antena receptora
λ	Comprimento de onda do sinal
PL	Perda por percurso entre transmissor e receptor
d	Distância entre transmissor e receptor
d_0	Distância de referência
α	Coefficiente que relaciona a atenuação com a distância
β	Valor de <i>offset</i> estimado para a perda por percurso
γ	Coefficiente que relaciona a atenuação com a frequência
X_σ	Variável aleatória Gausseana de média zero e desvio padrão σ
n	Coefficiente que mostra a dependência do modelo com o ambiente

Lista de Abreviaturas e Siglas

3GPP	<i>3rd generation partnership project</i>
5G	Sistema de telefonia móvel de quinta geração
Gbps	<i>Giga bit por segundo</i>
mMTC	<i>Massive Machine Type Communication</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
URLLC	<i>Ultra Reliable Low Latency Communication</i>
NR	<i>New Radio</i>
FR1	<i>Frequency Range 1</i>
FR2	<i>Frequency Range 2</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
UMa	<i>Urban Macrocell</i>
UMi	<i>Urban Microcell</i>
InH	<i>Indoor Hotspot</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
NLOS	<i>Non Line of Sight</i>
O2O	<i>Outdoor to Outdoor</i>
O2I	<i>Outdoor to Indoor</i>
ERB	Estação Radio Base
IoT	<i>Internet of Things</i>
WINNER	<i>Wireless World Initiative New Radio</i>
GSCM	<i>Geometry-based Stochastic Channel Model</i>
SCM	<i>Spatial Channel Model</i>
MPC	<i>Multipath Component</i>
RAT	<i>Radio Access Technology</i>
QuaDriGa	<i>Quasi Deterministic Radio Channel Generator</i>
NYU	<i>New York University</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>
5GCM	<i>5G Channel Model</i>
NYUSIM	<i>New York University Simulator</i>
ABG	<i>Alpha Beta Gamma</i>
CI	<i>Close In</i>
CIF	<i>Close In Free Space</i>
PLE	<i>Path Loss Exponent</i>
FSPL	<i>Free Space Path Loss</i>

Lista de Publicações

[1] Marengo, G. K., Lima, E.S, Leite, G. E. S., Junior, A. C. S., & Mendes, L. L. (2020). Propagation models for 5G signals in the 60 GHz band. *Journal of Communication and Information Systems*, 35(1), 357-369.

[2] Marengo, G. K, Arismar C. S. Júnior. “*A Study on Propagation Models for 28 GHz*”, *Proceedings of IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, October, 2021.

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise comparativa das estimativas de perdas calculadas, a partir dos seguintes modelos de propagação para a faixa de ondas milimétricas: Espaço Livre; NYUSIM; mmMAGIC; METIS; 5GCM; 3GPP.TR.38.901; ABG; CI. Especificamente, utilizou-se medidas de campo de redes móveis de quinta geração (5G), oriundos da literatura especializada para a banda de 28 GHz, para os cálculos supracitados. O principal objetivo do trabalho é verificar a precisão das estimativas de perda para cenários *indoor* e *outdoor*, em condições de linha de visada direta (LOS – *Line of Sight*) e sem linha de visada direta (NLOS – *Non Line of Sight*). A métrica de comparação quantitativa foi o MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*). Além disso, avaliou-se o erro de incerteza das medidas de campo, com o objetivo de compará-lo com o erro das estimativas de perdas provenientes do MAPE de cada modelo nos ambientes estudados.

Palavras-chave: 5G, modelos de propagação, ondas milimétricas e propagação.

Abstract

This work presents a comparative analysis of the estimated losses, which are calculated using the following propagation models for millimeter waves: *Free Space*; NYUSIM; mmMAGIC; METIS; 5GCM; 3GPP.TR.38.901; ABG; CI. Specifically, campaign measurements of the fifth generation of mobile communications (5G) networks in the 28 GHz band, from the specialized literature, have been used for the mentioned calculations. The main goal of this work is to verify the accuracy of the loss estimations for indoor and outdoor scenarios, under line of sight (LOS) and non-line of sight (NLOS) conditions. The quantitative comparison metric was MAPE (Mean Absolute Percentage Error). In addition, the field measurement uncertainty error was evaluated, with the purpose of comparing it with the loss estimation error obtained using MAPE for each model in the studied environments.

Keywords: 5G, propagation models, millimeter waves and propagation.

Capítulo 1

1. Introdução

Este Capítulo tem por objetivo realizar uma introdução das redes móveis de quinta geração (5G), com foco na contextualização da utilização das ondas milimétricas nessas redes. Serão apresentadas revisões bibliográficas de trabalhos provenientes de diferentes grupos de pesquisas. O Capítulo está dividido em três seções: 1.1 Contextualização e Motivação; 1.2 Revisão Bibliográfica e 1.3 Contribuições.

1.1 Contextualização e Motivação

As redes de comunicações móveis necessitam sempre estar se adequando para garantir uma melhora na conectividade entre os usuários com a rede, no sistema de comunicação e no processo de transmissão de dados. Com a crescente demanda por um maior nível de interconectividade dos dispositivos móveis nas redes de telecomunicações tornou-se necessário um aprimoramento das mesmas, sendo esse um dos principais quesitos da rede móvel de quinta geração (5G). O desenvolvimento das redes 5G foi baseada em quatro pilares, a mencionar: mMTC (*massive machine type communication*), eMBB (*enhanced mobile broadband*), URLLC (*ultra reliable low latency communication*) e eRAC (*enhanced remoted area communitcation*). O pilar mMTC visa melhoria na interconectividade dos dispositivos móveis na rede, o eMBB visa aumento da taxa de transmissão para a ordem de Gbps, o URLLC visa reduzir a latência da rede para a ordem de 1 milissegundo e eRAC visa prover acesso móvel para áreas remotas, conforme o projeto 5G Range [1-4] do Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel). A Fig. 1.1 apresenta os pilares para o desenvolvimento da rede móvel 5G.

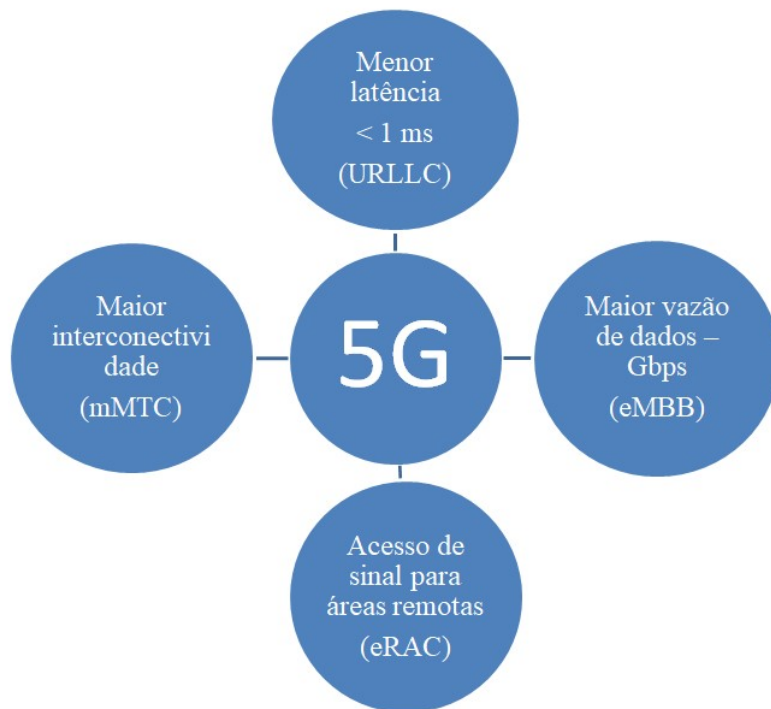


Fig. 1.1. Pilares da rede móvel 5G.

A rede móvel 5G, a partir da *Release 15* lançado pelo 3GPP (3rd *Generation Partnership Project*) em 2016, introduziu um novo conceito conhecido como NR (*New Radio*) [5]. Esse novo padrão 5G NR teve como característica principal a separação das bandas de frequência em duas faixas (FR1 e FR2) conforme ilustra a Figura 1.2. A faixa do FR1 (*Frequency Range 1*) engloba a faixa de frequência do sub-6 GHz, de 410 MHz até 7,125 GHz, e a faixa do FR2 (*Frequency Range 2*) engloba a faixa de operação em ondas milimétricas, de 24,25 GHz até 52,6 GHz aproximadamente [5-6]. As frequências compreendidas entre as faixas FR1 e FR2, de 7,125 GHz até 24,25 GHz, ainda não possui uma aplicação definida. Com o aumento da demanda por maior interconectividade dos dispositivos móveis na rede e a necessidade de aumento da taxa de transmissão fez com que o espectro de frequência da faixa do sub 6 GHz se tornasse insuficiente para atender a essas novas demandas. Assim, o espectro de frequências em ondas milimétricas passou a ser considerado como uma boa opção para as novas redes móveis por possuir uma alta gama de espectro de frequências disponíveis ainda não explorados [7].

O cenário de propagação de sinais em ondas milimétricas apresenta um grande desafio para os pesquisadores. Isso ocorre devido a maior atenuação de sinais na faixa das ondas milimétricas (FR2) em comparação aos sinais da faixa de sub-6 GHz (FR1). Esse fato deve-se a quanto maior a frequência de um determinado sinal menor será o seu comprimento de onda, por consequência, maior será a sensibilidade desse mesmo sinal frente aos obstáculos e a fatores atmosféricos em seu percurso. A Fig 1.2 ilustra resumidamente as duas faixas de frequências consideradas no 5G *New Radio* (NR), a FR1 e FR2, onde o FR1 é a principal faixa da rede 5G responsável pela coexistência dos seus sinais com o 4G LTE (*Long Term Evolution*) e o FR2 responsável por alocar maior número de terminais móveis dentro da rede, proporcionando uma maior vazão de dados.

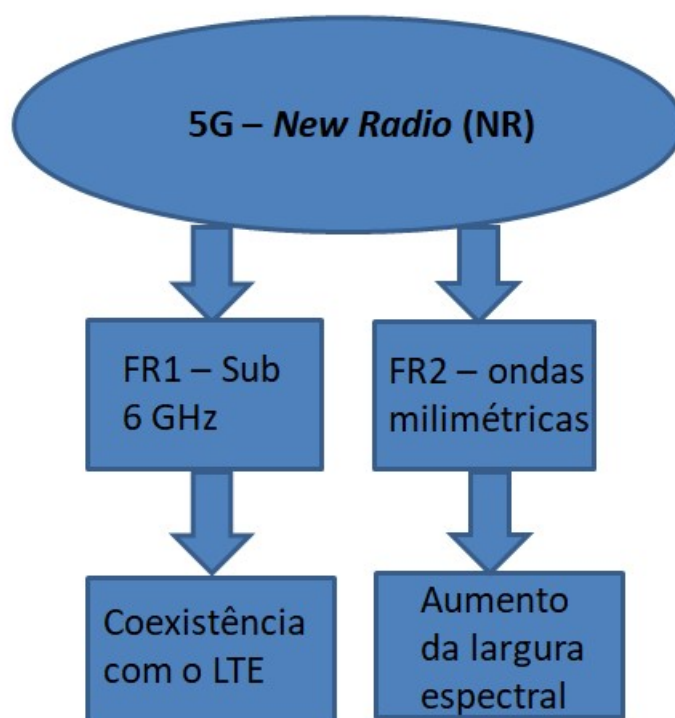


Fig. 1.2. *Bandas de frequências utilizadas em redes 5G NR.*

Obstáculos tendem a causar o fenômeno conhecido como múltiplo percurso durante a propagação do sinal. Múltiplos percursos são causados por fenômenos conhecidos como reflexão, difração e espalhamento [7]. Esses fazem com que uma

parcela do sinal transmitido não atinja o receptor e outras atinjam-no com diversas réplicas defasadas no tempo. Já os fatores ambientais (chuva, névoa, vento, gases etc.) influenciam também adversamente a propagação do sinal. Arranjar uma solução viável para esse problema e tornar possível a propagação em faixas de ondas milimétricas é uma tarefa bem desafiadora. As soluções que melhor se enquadram no contexto são a utilização de *massive MIMO* (*multiple input multiple output*) que utilizam feixes *beam-forming* altamente diretivos e redução do raio das células das estações radio-bases.

Para que seja possível estimar o nível de atenuação de um sinal em ondas milimétricas entre transmissor e receptor, foram desenvolvidos os modelos de propagação [7]. Esses modelos serão discutidos mais detalhadamente no Capítulo 2 onde se abordará os diferentes tipos de cenários, juntamente com a sua área de abrangência. Os cenários considerados nesses modelos são: UMa (*urban macrocell*), UMi (*urban microcell*) e InH (*indoor hotspot*). A proposta desse trabalho é realizar um estudo comparativo entre modelos de propagação nos cenários de UMi, com células de menor cobertura com alcance em torno de 200 a 300 metros e nos cenários de InH. O estudo foi realizado na frequência de 28 GHz, dentro da faixa FR2. Essa frequência apresenta baixa atenuação por absorção de gases atmosféricos em comparação com outras frequências da faixa FR2 conforme ilustra Fig.1.3. Partículas e gases atmosféricos contribuem para a atenuação e dispersão do sinal durante a sua propagação devido ao fato de as partículas atmosféricas possuírem um tamanho considerável frente ao comprimento de onda do sinal, principalmente para sinais em ondas milimétricas [7-8].

O Capítulo 3 desse trabalho aborda a análise de propagação de sinais na frequência de 28 GHz em ambientes *indoor*, nas situações LOS e NLOS, considerando estimativas de perda calculadas a partir de modelos de propagação disponíveis na literatura técnica e as comparando com as perdas medidas em campo, com o objetivo de verificar a qualidade das estimativas calculadas a partir desses modelos. O Capítulo 4 apresenta a mesma análise considerando ambientes *outdoor* UMi, em situações de LOS e NLOS.

Para cada modelo de propagação serão consideradas duas situações, LOS e NLOS, para cada cenário. Sabe-se que para a situação de propagação em LOS, o nível de atenuação sofrido pelo sinal será menor em comparação a situação de NLOS pois obstáculos obstruindo a condição de linha de visada direta impacta mais na atenuação e dispersão do sinal. O estudo desses modelos de propagação em ambiente com células de raio menor (UMi) é útil para prever o nível de atenuação de uma futura célula da estação radio-base (ERB). Nesse caso, a alta atenuação apresenta algumas vantagens, pois permite o reuso de frequências e evita que um determinado sinal de uma célula interfira na célula vizinha.

Um dos benefícios de redes móveis operando em ondas milimétricas refere-se a maior alocação de usuários móveis com uma banda de frequência de maior disponibilidade, além da garantia de uma taxa de transmissão de dados maior em relação as frequências do FR1 [7]. Além das altas vazões de dados, as redes móveis 5G são projetadas também para apresentar valores de latência entre 5 a 20 milisegundos, o que é um ganho substancial comparado as redes 4G (com latências entre 30 a 70 milisegundos). Altas taxas de transmissão de dados e baixa latência das redes móveis 5G viabilizam tecnologias como IoT (*Internet of Things*), navegação autônoma (veículos terrestres e aeronaves), Indústria 4.0, dentre outros [9].

1.2 Revisão Bibliográfica

Em função da introdução das redes móveis 5G houve o surgimento de vários grupos de trabalhos que se dedicaram ao modelamento dos canais de comunicação existentes. Foram realizados muitos trabalhos e pesquisas na área de modelamento dos cenários de propagação na faixa de ondas milimétricas. O principal desafio era como modelar um ambiente com todas as suas características, incluindo obstáculos presentes e fatores atmosféricos, que poderiam interferir na propagação da onda eletromagnética do sinal irradiado. O primeiro projeto realizado para se estudar o comportamento do canal foi proposto em 2004 pelo grupo WINNER (*Wireless World Initiative New Radio*). O modelo proposto no WINNER é baseado em GSCM (*Geometry-based Stochastic Channel Model*), cujo principal objetivo é analisar a dispersão dos sinais causada pelas geometrias dos obstáculos [10]. Esse modelo foi

desenvolvido através de medidas em campo, cobrindo ambientes *indoor*, *outdoor* e *outdoor to indoor*. O modelo de canal WINNER é baseado no 3GPP SCM (*Spatial Channel Model*) em que se objetiva estudar as posições das superfícies responsáveis pelo espalhamento do sinal.

Outro projeto levado em consideração foi o COST 2100 onde foi criado um modelo também baseado em GSCM. Um canal simplificado considera uma sobreposição de diferentes réplicas do sinal causada pela interação entre objeto e ondas de rádio, introduzindo um conceito de MPC (*Multipath Component*). O modelo COST 2100 é baseado em clusters classificados de acordo com a sua composição e posição no link, conforme explicado em [11]. Esse modelo é aplicado considerando uma faixa de frequência indo de 0.45 GHz até 100 GHz.

Outros projetos foram desenvolvidos como uma extensão do WINNER cobrindo a estrutura RAT (*Radio Access Technology*), esse projeto baseia-se no modelo de propagação mmMAGIC operando em uma faixa de frequência de 6 GHz até 100 GHz [12]. Esse novo modelo é uma extensão do GSCM atribuindo novas características a serem atribuídas ao canal de comunicação como: perda de penetração em edifícios, efeito de bloqueio, reflexão no solo, alto número de antenas, consistência espacial e alta largura de banda. O modelo mmMAGIC foi implementado utilizando QuaDriGa (*Quasi Deterministic Radio Channel Generator*) 2.0, sendo esse um *software* aberto de emulação de canal [12 - 13].

O uso de ondas milimétricas para redes 5G tornou-se mais relevante nos estudos de diversos pesquisadores em 2011 [14]. O grupo de pesquisa liderado pela Samsung foi o primeiro a reconhecer a adequabilidade do uso de ondas milimétricas para comunicação em sistemas celulares. A frequência de 28 GHz começou a ser implantado, muito provavelmente, em redes 5G no Japão, Coréia do Sul e Estados Unidos [14].

Estudos de propagação de sinais 5G operando em ondas milimétricas foram realizados incluindo universidades e empresas, como a NYU (*New York University*), NIST (*National Institute of Standards and Technology*), Huawei e Qualcomm. A NYU foi a principal responsável por desenvolver o modelo NYUSIM (*New York*

Simulation), que envolve um software de simulação para operar em frequências de ondas milimétricas envolvendo todos os tipos de cenários de propagação [7]. O modelo 5GCM foi desenvolvido pela NIST com parceria da Huawei, Qualcomm e NYU e se aplica para uma variedade de ambientes de propagação, incluindo ambiente rural com vegetação e ambiente urbano ambos em situação de LOS e NLOS. Para os casos de LOS o modelo divide o estudo de propagação para duas situações distintas: em open square, onde temos um cenário totalmente aberto com poucos obstáculos ao redor, e street canyon, onde nesse temos vários obstáculos ao redor da direção de linha de visada direta [7].

O grupo de pesquisa liderado por Rappaport *et al* [15] realizou um trabalho de medição de perdas em um cenário de propagação de um centro altamente urbanizado (cidade de Nova York) e de um cenário menos urbanizado (cidade Austin). Essas medidas foram realizadas considerando as situações de LOS e NLOS para sinais dentro da faixa de frequência de FR2, em especial para as frequências de 28 GHz e 38 GHz. Foram consideradas diversas posições do receptor onde foi determinado um caso em que o sinal foi menos atenuado possível, considerado uma situação de *best case*. Foi determinado o fator n ou PLE (*Path Loss Exponent* para cada situação de medida), considerando um cenário normal, um cenário de melhor caso e um de pior caso [15]. Nesses estudos foi comprovado que para uma situação de ambiente altamente urbanizado a atenuação sofrida pelo sinal será maior em comparação com a atenuação sofrida em um ambiente de menor urbanização.

Além desses experimentos o grupo de pesquisa liderado por T. Rappaport realizou um conjunto de medidas também em área urbana para a frequência de 60 GHz [16]. Foi verificado também situação de melhor e pior caso de medidas e um coeficiente n que gera um modelo que mais se aproxima dos pontos de medida. A frequência de 60 GHz foi inicialmente estudada para ser aplicada a ambientes *indoor* devido a sua alta atenuação, porém devido ao grande benefício trazido por essa banda de frequência, maiores taxas de transmissão e espectro disponível em relação a 28 GHz, foi analisado seu comportamento para ambientes *outdoors*.

Análises foram também feitas medidas utilizando ambiente *indoor*, como também, para ambientes rurais com vegetação [17-18]. Essas medidas englobam

análise para as frequências de 28 GHz e 73 GHz para ambientes internos e 73 GHz para ambiente rural. O principal objetivo foi estudar o comportamento de sinais de ondas milimétricas em diferentes cenários, além dos ambientes urbanos para que se fosse possível estimar o nível de atenuação para cada tipo de ambiente.

Diversos artigos trazem resultados de medidas de atenuações em campo para ambientes *Indoor* e *Outdoor* para saber o comportamento do sinal ao se propagar nesses ambientes, considerando transmissor fixo e receptor variando de posição. Já os modelos de propagação existentes na literatura são capazes de estimar a perda do canal de comunicação e são provenientes de diferentes projetos de pesquisa, onde os pesquisadores realizam um intenso número de medidas em campo. Nesses projetos todas as possíveis características presentes nos cenários de propagação que impactam na atenuação do sinal são consideradas no modelamento da equação que rege a perda do canal. Agora nesse trabalho foi realizado um estudo comparativo entre esses modelos de propagação, tomando como base cada modelamento de estimativa de atenuação, com os resultados de medidas em campo para diversos ambientes com o objetivo analisar a qualidade das estimativas de cada modelo em média. A Tabela 1.1 mostra alguns dos principais trabalhos realizados na área de propagação de ondas milimétricas juntamente com a contribuição deste trabalho.

Ref.	Título	Resumo do Trabalho	Contribuição do Trabalho
[10]	<i>Large scale parameter for the WINNER II channel model at 2.53 GHz in urban macro cell</i>	Considera o efeito da geometria dos obstáculos presentes nos canais de comunicação na dispersão dos sinais.	Metodologia para realização de análise comparativa das estimativas de perda calculadas pelos modelos de propagação para ondas milimétricas com resultados de medidas de campo com intuito de avaliar a precisão dessas estimativas para os diferentes tipos de cenários.
[11]	<i>The COST 2100 MIMO channel model</i>	Considera uma sobreposição de diferentes réplicas do sinal causado pela interação dos obstáculos com o sinal, introduzindo o conceito de MPC.	
[12]	<i>6–100 GHz channel modelling for 5G: Measurement and modelling plans in mmMAGIC</i>	Projeto de extensão do WINNER aonde considera-se mais parâmetros no processo de perda do sinal: reflexão por solo, perda por penetração, consistência espacial etc. Esse projeto deu origem ao modelo de propagação mmMAGIC.	
[13]	<i>White paper on 5G channel model for bands up to 100 GHz</i>	Realizado um estudo de propagação de sinais operando desde 6 GHz até 100 GHz.	
[14]	<i>Where, when, and how mmWave is used in 5G and beyond</i>	Realizado um estudo sobre a adequabilidade do uso de sinais operando em ondas milimétricas, englobando os possíveis cenários de propagação juntamente como contornar os desafios para se criar um link com sinal operando em ondas milimétricas.	
[15]	<i>Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work</i>	Medidas em campo de sinais operando em ondas milimétricas (nas frequências de 28 GHz e 38 GHz) em cenários <i>outdoors</i> para as situações de LOS e NLOS.	
[17]	<i>Theodore S. Rural macrocell path loss models for millimeter wave wireless communications</i>	Realização de medidas em campo para sinais operando em ondas milimétricas considerando os ambientes rurais, para situação de LOS e NLOS.	
[18]	<i>Indoor office wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models at 28 and 73 GHz for ultra-dense 5G wireless networks</i>	Realização de medidas em campo para sinais operando em ondas milimétricas (para 28 GHz e 73 GHz) considerando os ambientes <i>indoor</i> , para situação de LOS e NLOS.	
[19]	<i>Architectural aspects of mm-wave radio access integration with 5G ecosystem</i>	Realização de estudos sobre arquiteturas de redes 5G que auxiliem na implantação das ondas milimétricas.	

Tabela 1.1. Estado da arte com os trabalhos analisados e as contribuições do trabalho.

1.3 Contribuições

Apresentam-se como principais contribuições do presente trabalho:

1. Utilização de uma metodologia para avaliar e comparar os modelos de propagação para sinais em ondas milimétricas, utilizando resultados obtidos em campo.
2. Criação de um banco de dados de medidas em diversos ambientes provenientes de diferentes trabalhos acadêmicos, de forma a permitir um estudo comparativo dos modelos com dados de medidas em campo.
3. Análises determinísticas baseadas no cálculo do erro percentual absoluto médio (MAPE – *Mean Absolute Percentage Error*) e em estimativas de perda proveniente dos modelos e de resultados de medidas em campo.
4. Comparação entre o MAPE de cada modelo de propagação com o erro percentual de incerteza derivado dos resultados de medidas em campo.
5. Determinação do modelo que apresenta melhor estimativa de perda para cada cenário de propagação analisado.

1.4 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho é organizado em cinco capítulos. O Capítulo 2 retrata os fundamentos teóricos de modelos de propagação para cenários *indoor* e *outdoor* em FR1 e FR2. Os Capítulos 3 e 4 apresentam análises de propagação do cenário UMi na banda de 28 GHz em ambientes *indoors* e *outdoors*, respectivamente. Por fim, o Capítulo 5 discorre sobre as conclusões e os trabalhos futuros.

Capítulo 2

2. Fundamentos Teóricos

Este Capítulo tem por objetivo apresentar a fundamentação teórica referente a modelos de propagação para as redes móveis 5G, considerando tanto estudos determinísticos e estatísticos, quanto de pequena e de larga escala. O Capítulo foi dividido nas seguintes seções: 2.1 Introdução aos Modelos de Propagação; 2.2 Modelos de Propagação Estatísticos; 2.3 Modelos de Propagação Determinísticos, 2.4 Modelos de Propagação Derivados de Modelos Estatísticos de Larga Escala para 5G.

2.1 Introdução aos Modelos de Propagação

Em tempos recentes a humanidade vem passando por um aperfeiçoamento de novas tecnologias de comunicação. As telecomunicações vêm evoluindo cada vez mais com o decorrer dos anos, e, para isso faz-se necessário utilizar mecanismos para se prever, ou estudar, comportamentos de fenômenos existentes que irão influenciar em um sistema específico. O advento de novas redes móveis, em especial a rede de 5G necessitará de estudos para prever o comportamento de um sistema de comunicação viável para atender os seus requisitos de projeto. Nesse contexto, para podermos dimensionar um sistema de radio base, faz-se necessário estimar a atenuação presente em um determinado *link* entre transmissor e receptor.

O uso de modelos vem sendo utilizado em muitas situações em que se necessita prever comportamentos de determinados sistemas. Um modelo consiste em uma maneira simplificada de prever o comportamento de um determinado sistema sob diversas condições operacionais próximas de um cenário real [20-21]. Em sistemas de comunicações móveis há a necessidade de se estimar o nível de atenuação de um link entre transmissor e receptor. Isto é feito através do uso de modelos previamente desenvolvidos considerando fatores presentes no meio ambiente os quais são responsáveis pela degradação do sinal. Entre esses fatores incluem-se os obstáculos no percurso entre transmissor e receptor os quais são

responsáveis por causar os fenômenos da reflexão, difração e espalhamento [22]. Esses fenômenos são os responsáveis pela atenuação do sinal e, também, por causar o fenômeno do multi-percurso onde o receptor recebe várias réplicas do sinal em tempos e fases diferentes. A Fig.2.1 ilustra os diversos tipos de percursos causados pelos fenômenos citados anteriormente. Outros fatores que impactam a propagação de sinais são: a atenuação provocada por fatores atmosféricos (gases, chuva, névoa etc) [23-24] e a atenuação causada uma por movimentação dos obstáculos durante o percurso do sinal (pessoas transitando, movimentação de carros, deslocamento do receptor, deslocamento do transmissor etc). Devido a todos esses fatores, o nível do sinal recebido no receptor após a propagação do sinal, em um determinado cenário pode ser representado por uma variável aleatória [25].

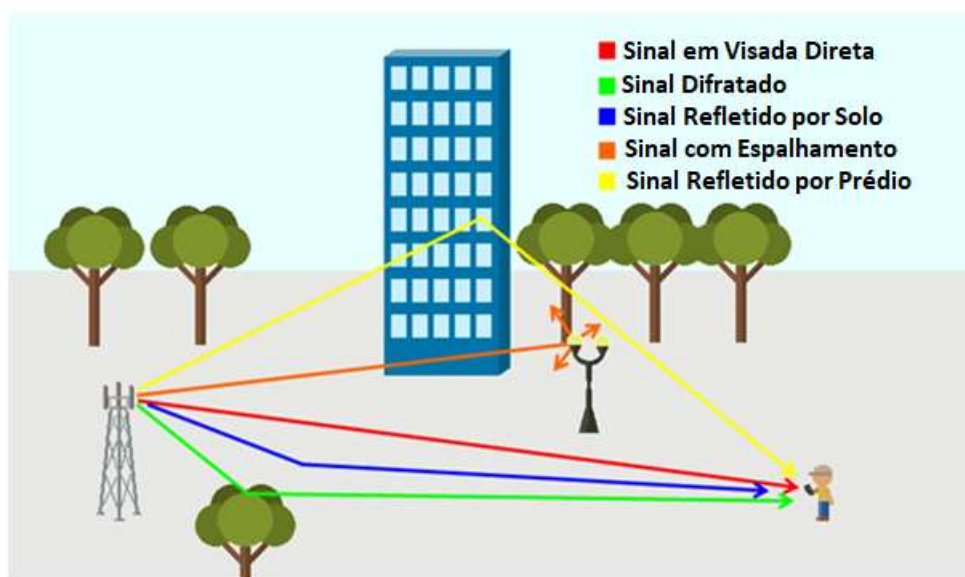


Fig. 2.1. Ilustração dos fenômenos causados por obstáculos durante a propagação de um sinal.

Devido a necessidade de se estimar o nível do sinal que será transmitido ao nível do receptor faz-se necessário o uso de modelos. A Fig.2.2 resume as principais características a serem consideradas nos modelos de propagação a fim de que as suas estimativas de perda sejam mais próximas possíveis das situações reais. Basicamente fazemos dois tipos de análise de propagação baseadas em modelos, as quais são a análise em pequena escala e a análise em larga escala [26].

Para análise em pequena escala, o modelo visa o estudo do comportamento de variações rápidas do sinal recebido por meio de curtas distâncias entre transmissor e receptor ou por pequeno intervalo de tempo (na ordem de segundos). Já para a análise em larga escala, o nível de sinal é estimado através de longas distância entre transmissor e receptor. Serão abordados esses tipos de análises no decorrer deste capítulo.

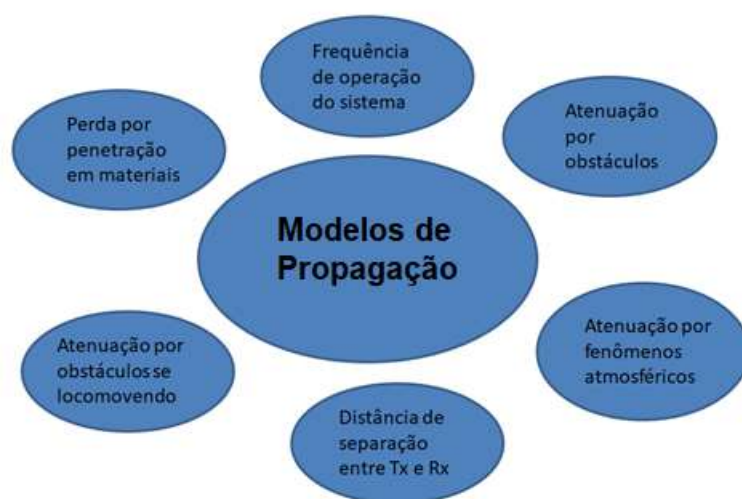


Fig. 2.2. Principais pilares a se considerar em um modelamento de canal de propagação

2.2 Modelos Estatísticos de Predição para Análise em Pequena Escala

A análise em pequena escala é verificada para cenários *indoor* ou *outdoor* com pequenas distâncias entre transmissor e receptor. O motivo principal para o uso deste tipo de análise é devido ao comportamento aleatório das componentes do sinal as quais atingem a antena receptora em um link de comunicação. Esse comportamento aleatório é resultado do fenômeno de multi-percurso onde réplicas do sinal chegam ao receptor com diferentes amplitudes, fases e tempos. Para fins de análise do nível de sinal no receptor podemos realizar uma análise estatística, ou probabilística, em pequena escala utilizando a distribuição Rayleigh ou Rice.

O modelo estatístico Rayleigh considera uma situação em que não há linha de visada direta entre o transmissor e o receptor, com as réplicas chegando no receptor

por meio dos fenômenos da reflexão, difração e espalhamento [26-27]. A Fig. 2.3 ilustra o cenário possível para se aplicar o modelo Rayleigh.

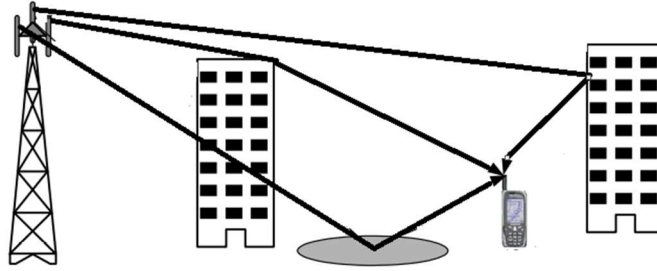


Fig. 2.3. Ilustração de um cenário de propagação Rayleigh [26].

Considerando a análise de apenas uma réplica do sinal recebido por uma antena do terminal móvel tem-se [27]:

$$S_{rk} = a_k(t) \exp [j(\omega_0 t + \varphi_k(t))] \quad (2.1)$$

onde S_{rk} é o sinal obtido através do k-ésimo multipercurso do sinal entre o transmissor e o receptor, a_k é a amplitude do sinal, ω_0 é a frequência angular do sinal e φ_k é a fase do sinal recebido [24]. Para um canal com uma quantidade n de múltiplos percurso o sinal total recebido será dado por [24][27]:

$$S_r = \sum_{k=1}^n (a_k(t) \exp [j(\omega_0 t + \varphi_k(t))]) \quad (2.2)$$

$$S_r = \sum_{k=1}^n (a_k(t) \exp [j(\omega_0 t)] \exp [j \varphi_k(t)]) \quad (2.3)$$

$$S_r = r (\exp [j(\omega_0 t)] \exp [j \varphi_k(t)]) \quad (2.4)$$

onde $r \exp [j \varphi_k(t)]$ poderá ser expresso na forma de um número complexo no formado $(x + jy)$. Em um canal de comunicação móvel com um número elevado de múltiplos percurso assume-se que a variável n é grande o suficiente, sendo x e y considerados como variáveis aleatórias com distribuição Gaussiana, conforme mostra as equações abaixo [24][27]:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (2.5)$$

$$p(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (2.6)$$

Considerando $\sigma_x = \sigma_y$, onde σ é o desvio padrão das variáveis aleatórias com distribuição Gaussiana. Expressando $r \exp(j\theta)$ na forma cartesiana de números complexos $(x + jy)$ teremos [24]:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (2.7)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (2.8)$$

transformando essas expressões para variáveis aleatórias gaussianas teremos [24]:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right), \quad r > 0 \quad (2.9)$$

$$p(\theta) = \frac{1}{2\pi}, \quad -\pi < \theta < \pi \quad (2.10)$$

Para situações em que se tem linha de visada direta entre o transmissor e receptor, além de múltiplos percursos, teremos o modelo Rice que melhor representa esse cenário. Nesse modelo, o sinal recebido pode ser separado em duas componentes: uma componente referente a linha de visada direta e a outra referente a parcela com múltiplos percursos [24 - 25][27]. A expressão abaixo nos mostra a equação referente ao sinal recebido segundo o modelo Rice [27]:

$$S_r = \sum_{k=1}^n (a_k(t) \exp[j(\omega_0 t + \varphi_k(t))]) + a \exp(j \omega_0 t) \quad (2.11)$$

$$S_r = r (\exp[j(\omega_0 t)] \exp[j \varphi_k(t)]) \quad (2.12)$$

onde, na equação 2.11, a parcela adicional dada por $a \exp(j \omega_0 t)$ representa a parte do sinal transmitido em linha de visada direta.

Fazendo a mesma análise do modelo Rayleigh, o fator $r \exp[j \varphi_k(t)]$ pode ser reescrito na forma cartesiana complexa $(x + jy)$, assim teremos que [27]:

$$(x + a)^2 + y^2 = r^2 \quad (2.13)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y}{x+a}\right) \quad (2.14)$$

considerando x e y variáveis aleatórias com distribuição Gaussiana podemos escrever a sua função como [27]:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2+a^2}{2\sigma_r^2}\right), r > 0 \quad (2.15)$$

Após feito essa análise de modelos estatísticos para pequena escala, o próximo passo consiste em detalhar os modelos estatísticos de predição de sinal considerando uma análise em larga escala. A próxima subseção irá abordar os principais modelos presentes na literatura.

2.3 Modelos Estatísticos de Propagação para Análise em Larga Escala

Nessa seção serão apresentados os estudos de modelos estatísticos de propagação em larga escala, que consideram os cenários de longas distâncias. Serão apresentados os modelos que foram estudados e analisados pelo órgão 3GPP de padronização da rede móvel 5G. Esses modelos englobam a faixa de frequência de 2 GHz até 73 GHz para diferentes tipos de cenários *urban macrocell* (UMa), *urban microcell* (UMi) e *indoor hotspot* (InH) como também as condições dos cenários *LOS* e *NLOS*. Entre os principais modelos destacam-se o modelo *Alpha-Beta-Gamma* (ABG), o modelo *Close in* (CI) e o modelo *Close In Free Space* (CIF).

O modelo ABG é um modelo probabilístico baseado nos parâmetros alpha (α), beta (β) e gamma (γ). Esses parâmetros possuem relação com as características do canal de comunicação e são ajustados de acordo com a predição envolvendo a frequência de operação e a distância do link entre transmissor e receptor [28]. A equação da perda dada pelo modelo ABG é definida conforme equação abaixo [28]:

$$PL_{Loss}^{ABG}(f, d) = 10\alpha \log\left(\frac{d}{1}\right) + \beta + 10\gamma \log(f) + X_{\sigma}^{ABG} \quad (2.16)$$

onde α é o coeficiente que representa a dependência da perda do sinal pela distância percorrida, β é o coeficiente que representa o valor de *offset* otimizado para a estimação da perda do sinal, γ representa a relação da perda com a frequência, d é a distância em metros do percurso entre transmissor e receptor, f é a frequência de operação do sistema em GHz e X_{σ}^{ABG} é uma variável aleatória Gaussiana de média nula e desvio padrão σ [12][28] que representa o efeito de sombreamento do sinal. A tabela abaixo ilustra os valores típicos dos parâmetros do modelo ABG considerando diferentes cenários [12][28]:

Cenário	Frequência (GHz)	Distância (m)	α	β	γ
UMa LOS	2 – 38	60 – 930	1,9	35,8	1,9
UMi LOS	28 – 73	27 – 54	1,1	46,8	2,1
InH LOS	2,9 – 73	4 – 49	1,6	32,9	1,8
UMa NLOS	2 – 38	61 – 1238	3,5	13,6	2,4
UMi NLOS	2,9 – 73	48 – 235	2,8	31,4	2,7
InH NLOS	2,9 – 73	4 – 67	3,9	19,0	2,1

Tabela 2.1. Parâmetros para o modelo ABG em todos os tipos de cenários [29].

O modelo CI é um modelo estatístico com menor número de parâmetros em relação ao modelo ABG. Esse modelo leva em conta apenas a variável n , que representa o *Path Loss Exponent* (PLE) [28]. Esse parâmetro possui um valor empírico baseados em medidas de campo. Ele possui relação direta com a perda do nível de sinal entre transmissor e receptor. A equação que rege o modelo CI é dada por [7][28]:

$$PL_{Loss}^{CI}(f, d) = FSPL(f, d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}^{CI} \quad (2.17)$$

$$FSPL(f, d_0) = 20 \log\left(\frac{4\pi f d_0 10^9}{c}\right) \quad (2.18)$$

onde $FSPL(f, d_0)$ representa a perda por espaço livre considerando a distância d_0 como referência, d representa a distância do link em metros, f é a frequência de

operação em GHz, c é velocidade da luz no vácuo (aproximadamente 3×10^8 metros/segundo) e X_{σ}^{CI} é a variável aleatória Gaussiana de média nula e desvio padrão σ [28] que representa o sombreamento do sinal. A Tabela. 2.2 apresenta os valores típicos de PLE em determinadas faixas de frequências e distâncias para diferentes cenários de propagação.

Cenário	Frequência (GHz)	Distância (m)	PLE (n)
UMa LOS	2 - 38	60 – 930	2
UMi LOS	2,9 - 73	27 – 54	2,1
InH LOS	2,9 - 73 GHz	4 – 49	3,2
UMa NLOS	2 - 38 GHz	61 – 1.238	2,9
UMi NLOS	2.9 – 73 GHz	48 – 235	3,2
InH NLOS	2,9 – 73 GHz	4 – 67	3,1

Tabela 2.2. Parâmetros para o modelo CI em todos os tipos de cenários [29].

O modelo CIF é um modelo multi-frequências derivado do modelo CI, onde assume-se uma distância de referência igual a 1 metro. Sua equação é fornecida abaixo [28]:

$$PL_{Loss}^{CIF}(f, d) = FSPL(f, 1 \text{ metro}) + 10n \left(1 + b \left(\frac{f-f_0}{f_0}\right)\right) \log\left(\frac{d}{1}\right) + X_{\sigma}^{CIF} \quad (2.19)$$

nessa equação a variável b representa um parâmetro do modelo que considera a dependência da perda do sinal (*path loss*) de uma determinada frequência considerando a média ponderada de todas as frequências do modelo. O fator f_0 é a média das frequências envolvidas, cuja a equação é dada por [28]:

$$f_0 = \frac{\sum_1^k f_k N_k}{\sum_1^k N_k} \quad (2.20)$$

onde k é o número de frequências envolvidas na análise e N_k é o valor da perda da k^{th} frequência. A Tabela 2.3 mostra os valores típicos dos parâmetros n e b em

determinadas faixas de frequência considerando a faixa de distâncias válidas para o modelo CIF.

Cenário	Frequência (GHz)	Distância (m)	n	b
UMa LOS	2 – 38 GHz	60 – 930	2,0	-0,014
UMi LOS	2,9 – 73 GHz	27 – 54	2,1	0,003
InH LOS	2,9 – 73 GHz	4 – 49	1,5	-0,102
UMa NLOS	2 – 38 GHz	61 – 1238	2,9	-0,002
UMi NLOS	2,9 – 73 GHz	48 – 235	3,2	0,076
InH NLOS	2,9 – 73 GHz	4 – 67	3,1	-0,001

Tabela 2.3. Parâmetros para o modelo CIF em todos os tipos de cenários [28].

Esses modelos de predição para o caso de larga escala são aplicados tanto para cenários *indoor* quanto para cenários *outdoor*. Os cenários *outdoor* incluem os ambientes urbanos e os ambientes rurais com vegetação que também causam fenômenos relacionados a reflexão, difração e espalhamento. Ambientes *indoor* incluem escritórios, moradias, shopping centers, estádio etc.

2.4 Modelos de Propagação Derivados de Modelos Estatísticos de Larga Escala para 5G

Os modelos de propagação são utilizados no 5G para se estimar a perda de propagação de um sinal dentro de um determinado ambiente, incluindo os fatores climáticos e os obstáculos. Os modelos de propagação podem ser aplicados tanto para a faixa de frequência FR1 quanto para a FR2, incluindo também frequências na faixa de EHF (*Extremely High Frequency* (30 GHz – 300 GHz)). Para a faixa de EHF (ondas milimétricas), sujeitas a alta atenuação faz com que seja necessária uma análise mais cautelosa de como contornar esse problema de uma maneira menos impactante.

Antes de analisarmos os modelos para ambas as faixas de aplicação do 5G NR (*New Radio*) é necessário analisarmos o comportamento de um determinado sinal se propagando em um ambiente ideal (sem obstáculos e sem fatores climáticos). Esse

modelo é conhecido por propagação no espaço livre, ou *Free Space*. Nesse modelo, as variáveis que influenciam na atenuação do sinal são apenas a distância entre transmissor e receptor e a frequência de operação [7][24]. A expressão da atenuação no Espaço Livre é definida pela equação de Friis [7]:

$$P_r = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi D}\right)^2 P_t \quad (2.21)$$

onde G_t e G_r são os ganhos das antenas transmissora e receptora, respectivamente, λ é o comprimento de onda da frequência de operação do sistema, D é distância do link entre transmissor e receptor, P_t é a potência do transmissor e P_r é a potência no receptor. Reescrevendo essa expressão em escala logarítmica teremos:

$$P_r \text{ (dBm)} = P_t \text{ (dBm)} + G_t \text{ (dB)} + G_r \text{ (dB)} - L \text{ (dB)} \quad (2.22)$$

A perda (L) pode ser definida por [24]:

$$L \text{ (dB)} = 32,44 + 20 \log(f \text{ (MHz)}) + 20 \log(D \text{ (km)}) \quad (2.23)$$

O modelo Espaço Livre é um modelo teórico que serve como base para muitos modelos de propagação existentes. Com ele, é possível de se prever que em um enlace ponto a ponto, um aumento da frequência de operação ou um aumento da distância entre transmissor e receptor fazem com que o nível de sinal se deteriore cada vez mais. A Fig. 2.4 apresenta os valores de atenuação provenientes do modelo Espaço Livre para as frequências de 3 GHz, 28 GHz e 60 GHz.

A Fig. 2.4 nos mostra que o nível da atenuação aumenta com a frequência e com a distância. A frequência de 3 GHz está dentro da faixa de FR1 do 5G NR (responsável pela questão da coexistência do 5G com o 4G-LTE), a frequência de 28 GHz está inserida na faixa de FR2 (24,25 GHz – 52,25 GHz) do 5G NR (faixa das ondas milimétricas) e o 60 GHz está inserido na faixa de EHF (30 GHz – 300 GHz).

Há modelos que se adequam apenas para a faixa de FR1, enquanto outros englobam também a faixa de FR2 e EHF. Será feito uma abordagem inicialmente dos

modelos de propagação para FR1, e logo após será feito uma abordagem de outros modelos englobando a faixa de ondas milimétricas.

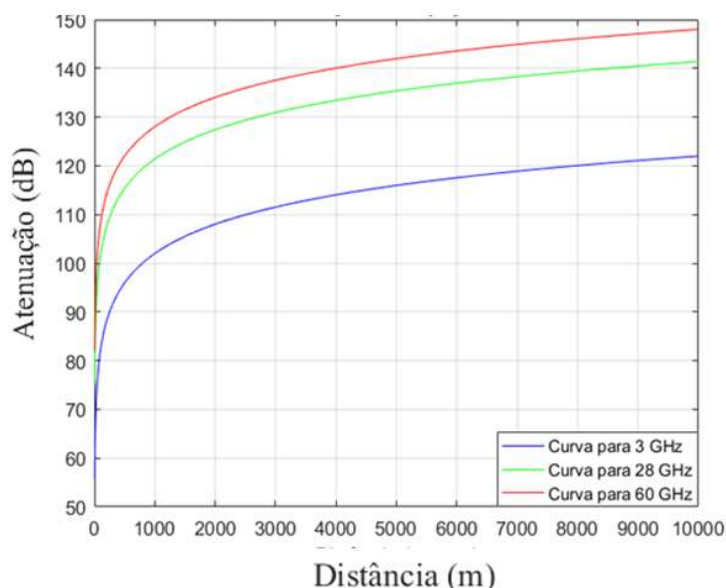


Fig. 2.4. Atenuação no Espaço Livre para as frequências de 3 GHz, 28 GHz e 60 GHz.

2.4.1 Modelos de Propagação para 5G em FR1

Nesta subseção serão apresentados os modelos de propagação para a faixa de frequência FR1 (sub-6 GHz). A atenuação dos sinais nessa faixa é menor em relação aos sinais da faixa FR2 (ondas milimétricas). Assim os sinais dessa faixa poderão percorrer maiores distâncias entre o transmissor e o receptor comparados aos sinais da faixa FR2. Os modelos mais utilizados para o estudo do comportamento do sinal na faixa de FR1 são: o modelo Okumura, o modelo Okumura Hata e o modelo COST 231.

O modelo Okumura é um modelo empírico baseado nos resultados de diversas campanhas de medidas em ambientes urbanos [29 - 30]. Esse modelo é utilizado para predição de cobertura de sinais de TV e nele há um aumento da atenuação em relação ao espaço-livre em função das condições do ambiente de propagação ao redor. A Tabela 2.4 detalha as principais condições para a utilização desse modelo.

Faixa de Frequência de Operação	150 MHz até 1,9 GHz
Altura da Antena do Móvel	1 a 3 metros
Altura da Antena da Radiobase	30 a 1000 metros
Comprimento do Enlace	1 a 100 quilômetros

Tabela 2.4. Condições para a aplicação do modelo Okumura [30].

A equação da perda utilizando o modelo Okumura é dada por [30]:

$$L = L_{FS} + A_{MU}(f, d) - H_{MG} - H_{BG} - G_{AREA} \quad (2.24)$$

onde L representa a perda em dB, L_{FS} representa a perda por espaço livre, A_{MU} é a perda média local, H_{MG} representa o fator de ganho da altura da antena móvel, H_{BG} representa o fator de ganho da antena da estação radiobase e G_{AREA} representa o fator de correção em função do ambiente [30].

Hata realizou um aprimoramento no modelo Okumura apresentando equações que representam os gráficos propostos por Okumura, incluindo fatores como reflexão e difração em edifícios. Surge com isso o modelo Okumura Hata, utilizado para frequências de operação inferiores a 1500 MHz. Esse modelo é aplicado na maior parte dos casos em ambientes urbanos [30 - 31]. A equação de sua perda é dada por [31]:

$$L_u = 69,5 + 26 \log(f) - 13,8 \log(h_b) - C_H + [45 - 6,5 \log(h_b)] \log(d) \quad (2.25)$$

onde L_u é a perda de percurso em ambiente urbano, h_b é a altura da antena da radiobase em metros, h_m é a altura do terminal móvel, f é a frequência do sistema em MHz, d é a distância entre transmissor e receptor em km e C_H é o fator de correção da altura da antena do terminal móvel. O C_H assume valores diferentes dependendo do porte da cidade. Para cidades de pequeno e médio porte teremos [31]:

$$C_H = 0,8 + (1,1 \log(f) - 0,7)h_m - 1,56 \log(f) \quad (2.26)$$

Para cidades de grande porte teremos [31]:

$$C_H = 8,29(\log(1,54h_m))^2 - 1,1, \text{ se } 150 \text{ MHz} < f < 200 \text{ MHz} \quad (2.27)$$

$$C_H = 3,2(\log(11,57h_m))^2 - 4,97 \text{ se } 200 \text{ MHz} < f < 1500 \text{ MHz} \quad (2.28)$$

Para o modelo Okumura Hata, as alturas do terminal móvel e da estação radiobase estão limitadas a $1 \text{ metro} < h_M < 10 \text{ metros}$, $30 \text{ metros} < h_b < 200 \text{ metros}$ [31].

O modelo Okumura Hata também pode ser utilizado para se realizar a predição do nível de atenuação em regiões no entorno de regiões urbanas e áreas rurais. Para áreas suburbanas temos a expressão da perda dada por [31]:

$$L_{SU} = L_U - 2(\log\left(\frac{f}{28}\right))^2 - 5 \quad (2.29)$$

Para áreas rurais tem-se a expressão de perda dada por [31]:

$$L_0 = L_U - 4,78(\log(f))^2 + 18,33 \log(f) - 40,94 \quad (2.30)$$

Podemos fazer uma expansão do modelo Okumura Hata para frequências de operação do sistema entre 1500 MHz a 2000 MHz. Esse modelo é conhecido como COST-231 [30]. Sua expressão é dada por [30]:

$$L = 46,3 + 34 \log(f) - 13,8 \log(h_B) - C_H + [45 - 6,5 \log(h_B)] \log(d) + C \quad (2.31)$$

O parâmetro C é o único que diverge do modelo Okumura Hata, assumindo valor 0 caso for considerado o sinal se propagando em áreas abertas e sub-urbanas, e valor 3 para áreas metropolitanas densas. Os outros parâmetros do modelo COST 231 seguem o mesmo critério do modelo Okumura Hata. O comprimento do enlace para o COST-231 é de 1 a 20 km.

2.4.2 Modelos de Propagação para 5G em ondas milimétricas

Os modelos de propagação que se aplicam tanto a faixa de sub-6 GHz quanto a faixa de ondas milimétricas são: o modelo NYUSIM, o modelo METIS, o modelo mmMAGIC, o modelo 3GPP TR 38.901 e o modelo 5GCM. As próximas subseções abordarão cada um desses modelos de propagação em maiores detalhes.

2.4.2.1 Modelo NYUSIM

O NYUSIM é um modelo aberto de simulação de canais de propagação desenvolvido pela Universidade de Nova York (NYU) e validado por várias campanhas de medidas em campo. Este modelo cobre os cenários de UMa (macro-células urbanas), UMi (micro-células urbanas) e ambientes rurais. O modelo NYUSIM cria funções de CIR (*Channel Impulse Response*) para análise espacial e temporal do canal de comunicação, com isso torna-se possível realizar uma análise omni-direcional do canal [15]. Este é um modelo estatístico de canal 3D espacial que permite caracterizar as propriedades espaciais e temporais das componentes de multipercurso. A simulação do modelo NYUSIM é aplicada em uma vasta gama de frequências variando desde 500 MHz até 100 GHz com largura de bandas de sinais chegando até 800 MHz. O NYUSIM utiliza o SSCM (*Statistical Spatial Channel Model*) para modelar um canal omnidirecional com funções CIR considerando AoD (*Angle of Departure*) e AoA (*Angle of Arrive*) [7]. O modelo NYUSIM utiliza como base o modelo de predição CI com uma distância de referência de 1 metro para todo o link considerado, desde que as medidas em ambiente externo não apresentem uma mudança de comportamento a partir de uma determinada distância, não apresentando assim um ponto de quebra (*breakpoint*) [32]. A equação da perda para o modelo NYUSIM pode ser descrita como [32]:

$$P_{Loss}(f, d) = FSPL(f, 1 \text{ metro})[\text{dB}] + 10n\log(d) + AT[\text{dB}] + X_{\sigma}^{CI} \quad (2.32)$$

onde f denota a frequência em GHz, d representa a distância em 3D entre transmissor e receptor, n representa o *Path Loss Exponent*, $AT[\text{dB}]$ representa as atenuações

adicionais causadas por fatores atmosféricos e X_{σ}^{CI} é uma variável aleatória Gaussiana de média zero com desvio padrão σ que representa o sombreamento que o sinal irá sofrer dependendo das condições do ambiente.

O simulador do modelo NYUSIM engloba ambientes urbanos de macro-células, micro-células e ambientes rurais para cenários de linha de visada direta (LOS) e sem linha de visada direta (NLOS). O modelo considera a altura da antena da estação radio-base na faixa de 10 metros até 150 metros e o terminal móvel na altura de 1 metro até 10 metros, além disso o modelo considera aspectos ambientais do meio de propagação do sinal (pressão atmosférica, temperatura local, taxa pluviométrica, atenuação por folhagem etc.). A polarização das antenas do transmissor e receptor juntamente com a quantidade de antenas utilizadas também são levadas em conta no modelo NYUSIM para melhor estimar o nível de atenuação em que o sinal irá sofrer ao propagar-se em um determinado ambiente.

2.4.2.2 Modelo METIS

O modelo METIS (*Mobile and wireless communication Enablers for the Twenty-twenty Information Society*) é um modelo de propagação para sinais operando em 5G que permite verificar o atendimento aos requisitos da rede 5G. Entre esses requisitos destacam-se: a alta largura de banda, a polarização 3D e o uso da técnica massive-MIMO. Esse modelo cobre cenários dinâmicos e compatíveis com vários ambientes de propagação. O modelo METIS é válido na faixa de 800 MHz a 60 GHz para cenários UMi. Porém para cenários UMa, ele é válido apenas na faixa de FR1 [7] [33-34].

O modelo METIS é construído a partir de quatro passos. O passo 1 é a determinação de um cenário de propagação considerando um ambiente com diversos tipos de obstáculos entre os quais podem ser considerados edifícios, casas, veículos, árvores, pessoas, postes etc. O passo 2 consiste em determinar os possíveis percursos existentes entre transmissor e receptor considerando os fenômenos da reflexão, difração e espalhamento que causam o fenômeno do multi-percurso gerando várias réplicas do sinal os quais chegam em diferentes amplitudes e fases no receptor. Devido a isso, é executado o passo 3, onde é criada uma matriz com os ângulos AoA e AoD das respectivas réplicas do sinal que chegam no receptor. Por fim, no passo 4

é determinado a resposta do canal através do modelamento de uma função de transferência para ele. A Fig. 2.4 ilustra os passos seguidos para a obtenção do modelo METIS.

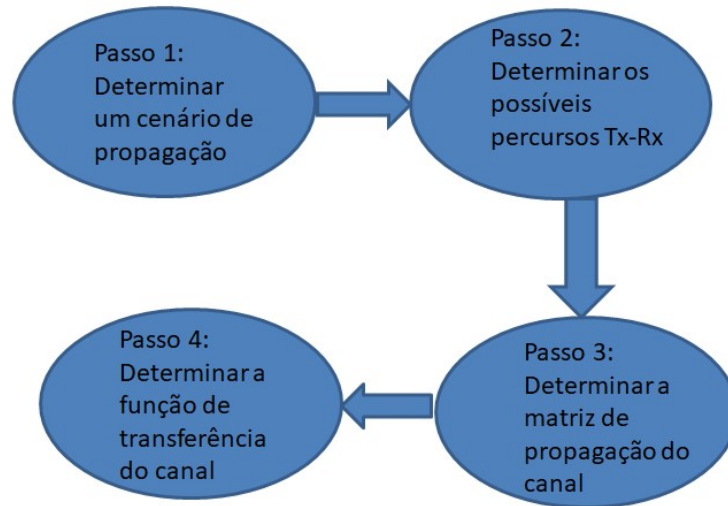


Fig. 2.5. Passos esquematizados do modelo de propagação METIS.

A atenuação no modelo METIS para o caso de UMi LOS considera a distância de *breakpoint* (d_{BP}), em metros, cuja expressão é dada por [34]:

$$d_{BP} = 0,87 \exp\left(-\frac{\log(f)}{0,65}\right) \frac{4(h_{BS}-1)(h_{UE}-1)}{\lambda} \quad (2.33)$$

Para um valor de perda por percurso, ou *Path Loss* (PL), considerando uma distância entre: 10 metros < $d < d_{BP}$ teremos [34]:

$$PL_{LOSS1}(d_1) = 10n_1 \log(d_1) + 28 + 18,62 \log(f) + 3,34 \quad (2.34)$$

Após a distância de *breakpoint* a perda por percurso passará a seguir a seguinte expressão [34]:

$$PL_{LOSS2}(d_2) = 10n_2 \log\left(\frac{d_1}{d_{BP}}\right) + PL_{LOSS1}(d_{BP}) \quad (2.35)$$

onde h_{BS} é a altura da antena da estação radiobase, h_{UE} é a altura da antena no terminal móvel, d_1 é a distância antes do ponto de *breakpoint* e d_2 é a distância após o ponto de *breakpoint* [36]. Para os valores de n_1 e n_2 assumimos 2,2 e 4, respectivamente, para a faixa de frequência de 800 MHz a 60 GHz. Esses valores foram obtidos a partir de resultados de medidas em campo [35]. Para cenários UMi NLOS temos a seguinte expressão para o modelo METIS [34]:

$$PL_{LOSS} = 36,7 \log(d) + 23,15 + 26 \log(f) - 0,3(h_{UE}) \quad (2.36)$$

Para o caso de UMi LOS, o modelo é válido para valores de distância (d) entre 10 metros e 5000 metros enquanto para o caso de UMi NLOS o modelo é válido entre 10 metros e 2000 metros. A altura da radiobase considerada é de 10 metros e a altura do terminal móvel deve estar compreendido entre 1,5 metros e 22,5 metros para ambos os cenários LOS e NLOS. Em ambientes *indoor*, o modelo METIS é representado pelas equações de perda abaixo, para ambos os cenários LOS e NLOS, respectivamente [34]:

$$PL_{LOS} = 68,8 + 18,4 \log(d) \quad (2.37)$$

$$PL_{NLOS} = 94,3 + 18,4 \log(d) \quad (2.38)$$

Em cenários *indoor*, o modelo METIS é válido apenas para uma frequência fixa de 60 GHz e a distância entre transmissor e receptor deve estar entre 1,5 metros e 13,4 metros para o cenário LOS e entre 4 metros e 16,1 metros para o cenário NLOS [36].

2.4.2.3 - Modelo mmMAGIC

O modelo mmMAGIC (*Millimeter-Wave based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communication*) [36] é um modelo de propagação para sinais 5G para cobrir a Tecnologia de Acesso de Rádio (*Radio Access Technology - RAT*), operando na faixa de 6 GHz até 100 GHz. Este modelo é baseado em resultados de medidas em campo e simulação de dados, com pelo menos 20 campanhas de medidas em mais de 8 bandas de frequências realizadas em 5 países europeus. O modelo mmMAGIC é baseado no modelo GSCM (*Geometry Statistical Channel Model*), com uma representação das geometrias presentes nos objetos no canal de comunicação que contribuem para a dispersão do sinal, sendo que o modelo mmMAGIC pode ser considerado uma extensão do modelo GSCM [7].

O modelo mmMAGIC permite uma análise mais aprofundada dos mecanismos que contribuem ainda mais com a atenuação do sinal, entre eles destacam-se a adição de efeitos de bloqueios por obstáculos, a reflexão por solo, a perda por penetração em construções, a vasta quantidade de antenas utilizadas e as altas larguras de banda. Esse modelo pode ser utilizado em ambientes UMi (*Street Canyon and Open Square*), ambientes *indoors* (shoppings, aeroportos, escritórios, estádios de futebol, domicílios etc) e em ambientes O2I (*outdoor to indoor*), considerando a perda de penetração quando um determinado sinal adentra em um ambiente interno vindo de um ambiente externo [15]. A equação da perda (*path loss*) para o modelo mmMAGIC é dividido em *outdoor* (UMi) LOS, *outdoor* (UMi) NLOS, *indoor* (LOS) e *indoor* (NLOS). Para o caso UMi LOS, a equação de perda é dada por [36]:

$$PL = 19,2 \log(d) + 32,9 + 20,8 \log(f) \quad (2.39)$$

Para o caso UMi NLOS, teremos a seguinte expressão da perda [36]:

$$PL = 45 \log(d) + 31 + 20 \log(f) \quad (2.40)$$

Para os casos de ambientes *indoor* em cenários LOS e NLOS, as equações 2.41 e 2.42 representam, respectivamente, essas perdas [36]:

$$PL = 13,8 \log(d) + 33,6 + 20,3 \log(f) \quad (2.41)$$

$$PL = 36,9 \log(d) + 15,2 + 26,8 \log(f) \quad (2.42)$$

onde f é a frequência em GHz e d é a distância 3D entre transmissor e receptor.

Em situação *outdoor* UMi com distâncias entre transmissor e receptor maiores do que 1000 metros, no cenário LOS, teremos uma distância de *breakpoint* (d_{BP}) dada por [36]:

$$d_{BP} = 4(h_{BS} - 1)(h_{MT} - 1) \frac{f}{c} \quad (2.43)$$

onde h_{BS} representa a altura da antena da estação rádio-base, h_{MT} representa a altura da antena do terminal móvel ambas em metros. A variável c representa a velocidade da luz no vácuo, onde seu valor é aproximadamente $3 \cdot 10^8$ metros/segundo e f é a frequência em GHz.

Antes da distância de *breakpoint* utilizamos a equação de perda PL_1 , expressada na equação 2.44 e após o ponto de *breakpoint* utilizamos a equação de perda PL_2 , dada pela equação 2.45 [36]:

$$PL_1 = 21 \log(d) + 32,4 + 20 \log(f) \quad (2.44)$$

$$PL_2 = 40 \log(d) + 32,4 + 20 \log(f) - 9,5 \log(d_{BP}^2 + (h_{BS} - h_{MT})^2) \quad (2.45)$$

Para ambientes *indoor*, temos as seguintes equações de perda para os casos LOS e NLOS, respectivamente [36]:

$$PL_{LOS} = 13,8 \log(d) + 33,6 + 20,3 \log(f) \quad (2.46)$$

$$PL_{NLOS} = 36,9 \log(d) + 15,2 + 26,8 \log(f) \quad (2.47)$$

2.4.2.4 - Modelo 3GPP TR 38.901

O modelo 3GPP TR 38.901 é um modelo válido para faixas de frequência de 0,5 GHz até 100 GHz suportando os cenários UMi, UMa e InH (*indoor hotspot*) [15]. Em cenário UMi, o modelo utiliza uma distância 3D que representa a altura da antena radiobase até a altura da antena do terminal móvel de recepção.

São utilizados 11 passos para se modelar a perda no modelo 3GPP. O primeiro passo consiste em selecionar o tipo do ambiente que será de interesse (UMi, UMa, InH) com a sua respectiva frequência de operação. O segundo passo consiste em analisar as condições do ambiente de propagação, incluindo as condições de LOS e NLOS. O terceiro passo consiste em determinar a atenuação no percurso do sinal (*Path Loss*) baseado nas informações dos passos 1 e 2. O quarto passo consiste em determinar os parâmetros de larga escala tais como sombreamento, desvanecimento e atraso de propagação. O quinto passo consiste na criação de um cluster para uma melhor análise dos parâmetros de larga escala. O sexto passo considera a inclusão dos ângulos de transmissão do sinal (AoD – *Angle of Departure*) e ângulo de recepção do mesmo sinal (AoA – *Angle of Arrival*), tanto em azimute quanto em elevação. O sétimo passo consiste em considerar o percurso do sinal como várias réplicas dele chegando ao receptor. O oitavo passo considera a polarização das réplicas do sinal se propagando por meio de múltiplos percursos. O nono passo consiste em levar em consideração as fases aleatórias das réplicas dos sinais. O décimo passo consiste em considerar os parâmetros dos canais definidos para cada cluster e o último passo consiste em considerar esses coeficientes no cálculo da atenuação do sinal [38]. A Fig.2.5 esquematiza os passos utilizados na estimativa de perda pelo modelo de propagação 3GPP TR 38.901.

A equação da perda (PL) para o modelo 3GPP envolve a determinação da distância de *breakpoint* cuja equação é dada por [38]:

$$d_{BP} = 4(h_{BS} - 1)(h_{MT} - 1) \frac{10^9}{c} \quad (2.48)$$

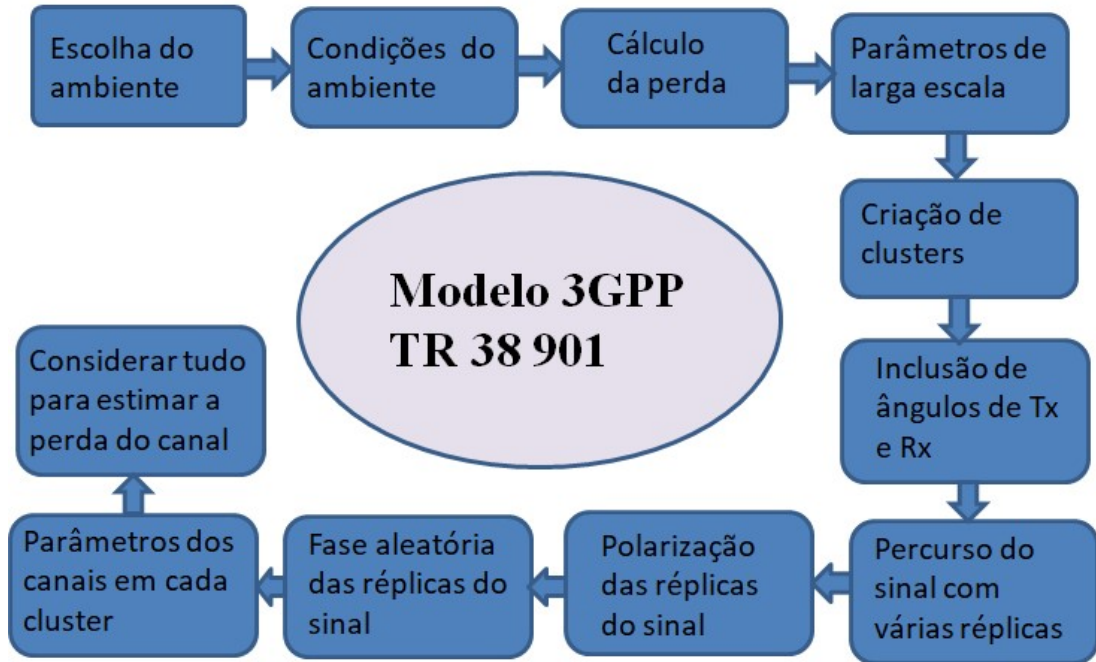


Fig. 2.6. Passos esquematizados do modelo de propagação 3GPP TR 38 901.

Com as variáveis h_{BS} e h_{MT} indicando as alturas das antenas da estação radio-base e terminal móvel em metros, respectivamente. Teremos, assim, duas equações distintas para perda: uma do transmissor ao ponto de *breakpoint* e outra do ponto de *breakpoint* ao receptor denominadas PL_1 e PL_2 , respectivamente [38]. As equações das mesmas para o cenário UMi LOS são dadas por [38]:

$$PL_1 = 32,4 + 22 \log(d) + 20 \log(f) \quad (2.49)$$

$$PL_2 = 32,4 + 40 \log(d) + 20 \log(f) - 9,5 \log(d_{BP}^2 + (h_{BS} - h_{MT})^2) \quad (2.50)$$

Para o cenário de UMi NLOS teremos a seguinte expressão de perda [38]:

$$PL_{UMiNLOS} = 35,3 \log(d) + 22,4 + 21,3 \log(f) - 0,3(h_{MT} - 1,5) \quad (2.51)$$

Para o cenário UMA com LOS teremos a distância de *breakpoint* determinada pela equação 2.48, gerando duas equações de perdas distintas em relação ao ponto de *breakpoint*, PL_1 e PL_2 . Essas são dadas por [38]:

$$PL_1 = 28,0 + 22 \log(d) + 20 \log(f) \quad (2.52)$$

$$PL_2 = 28,0 + 40 \log(d) + 20 \log(f) - 9 \log(d_{BP}^2 + (h_{BS} - h_{MT})^2) \quad (2.53)$$

Para o cenário de UMA com NLOS teremos a equação da perda dada por [38]:

$$PL_{UMaNLOS} = 39,08 \log(d) + 13,54 + 20 \log(f) - 0,6(h_{MT} - 1,5) \quad (2.54)$$

Para ambiente *indoor* temos as seguintes expressões para LOS e NLOS conforme mostra as equações 2.55 e 2.56, respectivamente [38]:

$$PL_{LOS} = 32,4 + 17,3 \log(d) + 20 \log(f) \quad (2.55)$$

$$PL_{NLOS} = 17,30 + 38,3 \log(d) + 24,9 \log(f) \quad (2.56)$$

2.4.2.5 - Modelo 5GCM

O modelo de propagação 5GCM foi proposto pelo instituto de pesquisa NIST (*National Institute of Standards and Technology*) com parcerias com a Huawei, a Qualcomm e a NYU (*New York University*) [15]. A faixa de frequência de operação para este modelo é de 0,5 GHz até 100 GHz cobrindo os cenários UMi *street canyon*, UMi *open square*, O2O (*outdoor to outdoor*), O2I (*outdoor to indoor*), UMA e ambientes *indoor* [7]. O modelo é baseado no modelo de canal 3GPP-3D, considerando as perdas por penetração, por percurso e por bloqueio de obstáculos para os cenários LOS e NLOS [36]. As equações 2.57 e 2.58 representam, respectivamente, os casos UMi *street canyon* e UMi *open square* [35]:

$$PL_{UMi_sc} = 32,4 + 21 \log(d) + 20 \log(f)$$

(2.57)

$$PL_{UMi_os} = 32,4 + 18,5 \log(d) + 20 \log(f)$$

(2.58)

Para o caso UMi NLOS, as equações 2.59 e 2.60 representam a perda para as condições de ambiente *street canyon* e *open square*, respectivamente [35]:

$$PL_{UMi_sc} = 32,4 + 31,7 \log(d) + 20 \log(f)$$

(2.59)

$$PL_{UMi_os} = 32,4 + 28,9 \log(d) + 20 \log(f)$$

(2.60)

Para os casos UMa LOS e NLOS, temos as seguintes equações de perda para o modelo 5GCM [35]:

$$PL_{UMa_LOS} = 32,4 + 20 \log(d) + 20 \log(f)$$

(2.61)

$$PL_{UMa_NLOS} = 32,4 + 30 \log(d) + 20 \log(f)$$

(2.62)

Para ambientes *indoors* no modelo 5GCM as expressões que regem o modelo LOS e NLOS são dadas por [35]:

$$PL_{IN_LOS} = 32,4 + 17,3 \log(d) + 20 \log(f) \tag{2.63}$$

$$PL_{IN_NLOS} = 38,3 \log(d) + 17,30 + 24,9 \log(f) \tag{2.64}$$

Capítulo 3 - Análises para Ambientes Indoors na Banda de 28 GHz

Esse Capítulo apresenta modelos de propagação para análise em ambientes *indoor* na faixa de 28 GHz. O Capítulo está estruturado da seguinte maneira: Seção 3.1 abordará as características do meio de propagação em 28 GHz; Seção 3.2 abordará a métrica de comparação utilizada no trabalho; Seção 3.3 abordará a comparação de modelos de propagação para essa frequência com resultados de medidas em campo para o cenário *indoor* em LOS; Seção 3.4 abordará a mesma comparação para o cenário *indoor* em NLOS.

3.1 Características do Meio de Propagação em 28 GHz

A frequência de 28 GHz encontra-se dentro da faixa de FR2 da rede 5G NR e será bastante utilizada para a propagação de sinais nas comunicações móveis em 5G. Essa frequência possui como principal vantagem o fato de possuir uma menor perda por absorção por gases atmosféricos em comparação com as outras frequências em ondas milimétricas, conforme ilustra Fig. 3.1, além de possuir uma largura de espectro ainda não utilizada.

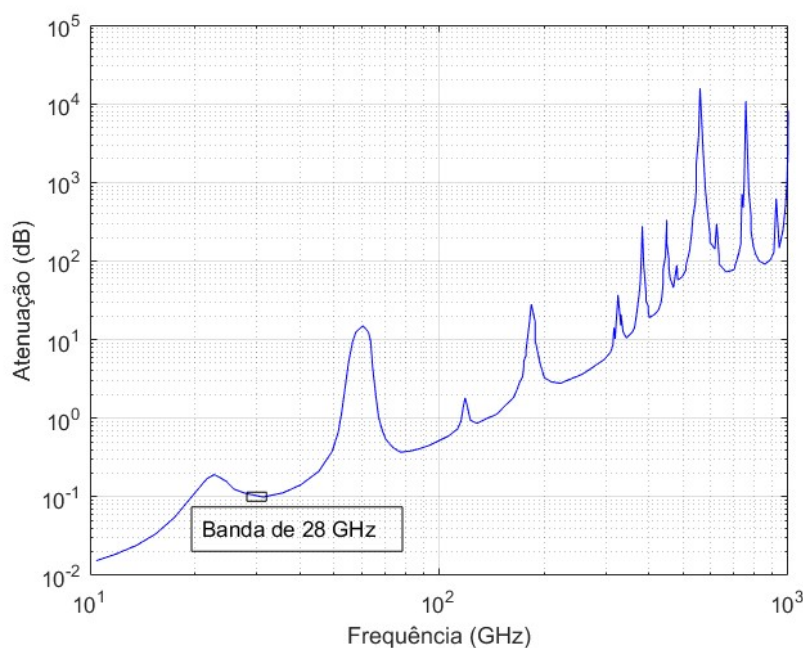


Fig. 3.1. Atenuação por gases atmosféricos em função da frequência [15].

A utilização da frequência de 28 GHz não foi autorizada pela Anatel para uso em rede 5G no Brasil, apenas para uso em aplicação de comunicação de satélite. Já em outros países do mundo, como Estados Unidos e os países da comunidade europeia, o uso da frequência de 28 GHz está aprovado para aplicações nas redes móveis 5G. No Brasil, foi aprovada a frequência de 26 GHz para utilização nessas redes móveis. Essa frequência também apresenta uma baixa perda por absorção de gases atmosféricos, com valores próximos aos valores apresentados pelos sinais operando em 28 GHz, de acordo com a Fig. 3.1. As análises presentes nesse trabalho foram realizadas na frequência de 28 GHz devido a maior disponibilidade de dados de estudos e medidas disponíveis na literatura técnica para essa frequência.

Neste Capítulo será apresentado uma análise comparativa dos resultados obtidos pelos modelos de propagação para 28 GHz, previamente apresentados no Capítulo 2. Essa análise será feita pela comparação quantitativa e qualitativa das estimativas de perda calculadas por esses modelos com resultados de medidas em campo obtidas na literatura técnica para cenários *indoor* nas situações LOS e NLOS.

3.2 Comparação dos Modelos de Propagação

Um modelo de propagação de sinais é uma representação matemática do fenômeno físico que visa estimar as perdas. Qualquer modelo que representa um fenômeno físico está sujeito a um determinado nível de imprecisão por representar a realidade de uma maneira simplificada [39 - 40]. Os modelos de propagação de sinais, tanto para a faixa de FR1 quanto para a faixa de FR2, citados no Capítulo 2 consideram as características do ambiente presentes na propagação do sinal entre transmissor e receptor. Existem na literatura diversas métricas que permitem avaliar a precisão de modelos. Além das análises quantitativas é possível também realizar análises qualitativas para comparar modelos. Assim podemos avaliar a facilidade de implementar e utilizar determinado modelo, comparar suas estimativas com os erros de medição e sazonalidade dentre outros.

3.2.1 Comparação Quantitativa

Essa subseção apresenta algumas métricas que permite realizar comparações quantitativas. Entre essas métricas se destacam: erro quadrático médio (MSE – *Mean Squase Error*), raiz do erro quadrático médio (RMSE – *Root Mean Square Error*), erro absoluto médio (MAE – *Mean Absolute Error*) e erro absoluto percentual médio (MAPE – *Mean Absolute Percentage Error*).

3.2.1.1 Erro Quadrático Médio (MSE)

O erro quadrático médio, ou MSE, é uma métrica de comparação que se baseia na média aritmética da diferença ao quadrado entre valores estimados e reais. Sua expressão é dada por [41]:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n |Y_r - Y_a|^2 \quad (3.1)$$

onde n é o número de amostras que se deseja analisar, Y_r é o valor da melhor aproximação medido e Y_a é o valor da curva do modelo considerado. O valor do MSE pode variar de 0 até infinito, onde quanto maior o seu valor pior é a estimativa do modelo. Essa métrica é boa em casos em que grandes erros (*outliers*) não são aceitáveis. Porém em casos em que temos *outliers* a métrica MSE passa a não ter boa performance.

3.2.1.2 Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)

A raiz do erro quadrático médio, ou RMSE, é uma métrica de comparação que se baseia na raiz quadrada da média aritmética da diferença ao quadrado entre valores estimados e reais. Sua expressão é dada por [41]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^n |Y_r - Y_a|^2} \quad (3.2)$$

Essa métrica, por tirar a raiz quadrada do valor do MSE, penaliza previsões muito distantes do valor real para os casos de *outliers*. O valor dessa métrica também varia de 0 a infinito, onde quanto maior o seu valor pior é a estimativa do modelo.

3.2.1.3 Erro Absoluto Médio (MAE)

O erro absoluto médio, ou MAE, é uma métrica de comparação que se baseia na média aritmética do módulo da diferença entre valores estimados e reais. Sua expressão é dada por [41]:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n |Y_r - Y_a| \quad (3.3)$$

Pelo fato de não elevar as diferenças ao quadrado essa métrica não pune tão severamente os erros de *outliers*. É uma métrica bastante utilizada em casos em que temos bastante dados a se prever, determinando a sazonalidade de um determinado fenômeno. Seu valor varia de 0 até infinito, sem um valor máximo determinado. Como as métricas anteriores quanto maior o seu valor pior a estimativa do modelo comparado com dados de campo.

3.2.1.4 Erro Absoluto Percentual Médio (MAPE)

O erro absoluto percentual médio, ou MAPE, é uma métrica que difere das demais pelo fato de expressar o valor do erro em porcentagem. Com isso, a análise e interpretação do erro MAPE torna-se mais intuitiva para qualquer indivíduo. Sua equação consiste na média da razão entre a diferença do valor real e predito com o valor real, onde a mesma é dada por [41]:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n \left| \frac{Y_r - Y_a}{Y_r} \right| \quad (3.4)$$

O seu valor varia de 0 a 1, onde quanto mais próximo de 1 pior é a estimativa do modelo. Este trabalho optou por utilizar o MAPE como métrica devido a possibilidade de expressar o erro em porcentagem, o que torna a análise mais

intuitiva para qualquer pesquisador, e por não penalizar casos de *outliers* uma vez que não eleva ao quadrado o erro de estimativa [39].

3.2.2 Comparação Qualitativa

Essa subseção aborda a análise de incerteza de medidas que pode ser utilizado na literatura para avaliar o grau de qualidade de dados experimentais. As medidas não são totalmente precisas devido a diversos fatores como a imprecisão do equipamento em campo, condições atmosféricas, topografia do ambiente etc. Isso é caracterizado por um certo nível de incerteza das medidas. A análise das incertezas realizadas em conjunto com uma determinada medida experimental permite avaliar a qualidade do experimento e realizar comparações com resultados provenientes de outros experimentos. Para qualquer medida é correto modelar o seu resultado de acordo com a expressão abaixo [39][42]:

$$Medida = (\text{Melhor Estimativa} \pm \text{Incertezas}) \quad (3.5)$$

A parcela referente a melhor estimativa não é conhecida de início e a mesma é determinada através de diversas medidas utilizando um mesmo método. Já as incertezas representam o nível de dispersão dos resultados obtidos através de inúmeras medidas. Assumindo que as dispersões das medidas seguem uma distribuição Gaussiana com desvio padrão σ , a probabilidade de uma medida apresentar dispersão de $[-\sigma, +\sigma]$ em torno da melhor estimativa é de 68%, para o intervalo $[-2\sigma, +2\sigma]$ a probabilidade é de 95,4% e entre $[-3\sigma, +3\sigma]$ é de 99,73% e assim por diante [42].

Uma maneira de avaliar a qualidade da medida é utilizando o algoritmo da incerteza relativa. Esse consiste em calcular a razão entre a incerteza absoluta, dada pelo desvio padrão, e a melhor estimativa. Quanto maior o valor da incerteza relativa pior é a qualidade da medida. A equação da incerteza relativa, em porcentagem, é dada por [42] :

$$Incerteza\ Relativa = \frac{Incerteza\ absoluta}{Melho\ Estimativa} \times 100\% \quad (3.6)$$

nesse trabalho foi considerada a incerteza absoluta igual a 2σ para os ambientes dos cenários *indoor* e *outdoor* para os casos de LOS (σ_{LOS}) e de NLOS (σ_{NLOS}) conforme mostra Tabela 3.2 e 3.4. A razão em se adotar o valor da incerteza absoluta de 2σ é de garantir que a probabilidade da dispersão da medida seja de 95,4% em torno da melhor estimativa, conforme explicado anteriormente.

Nesse trabalho foi calculado a incerteza relativa relacionada aos resultados de medidas em campo e feita uma análise comparativa com os valores do MAPE calculado para cada modelo de propagação em cada um dos ambientes analisados nos cenários *indoor* e *outdoor*. O intuito dessa análise é verificar se a estimativa dos modelos de propagação determinadas pelo MAPE se encontra na mesma ordem de grandeza ou menor em relação a incerteza relativa. Se isso for caso, podemos assumir que as estimativas provenientes dos modelos são adequadas. Para representar o valor da melhor estimativa foi escolhido um valor de atenuação na distância de 10 metros a partir do transmissor para os ambientes *indoor* e de 100 metros para os ambientes *outdoor*. O valor dos desvios padrão utilizados são provenientes dos resultados de medidas provenientes de trabalhos publicados em artigos acadêmicos, conforme apresentado nas Tabelas 3.2 e 3.4.

3.3 Determinação MAPE para Modelos *Indoor* com Linha de Visada

Essa seção apresenta uma análise comparativa de resultados obtidos por modelos de propagação em 28 GHz com dados de campo publicados em diversos artigos conforme ilustra a Tabela 3.1 para o cenário *indoor* LOS.

Devido ao comportamento aleatório das condições do ambiente (umidade, temperatura, material do obstáculo etc.), os resultados das medidas de atenuação em campo são diferentes dentro de um determinado percurso entre transmissor e receptor. Para representar essa situação, é possível utilizar uma curva baseada no modelo CI, conforme Eq. 2.16, aonde os valores de n (PLE) e da distância de referência (d_0) são ajustados utilizando um algoritmo de regressão linear e a

dispersão das medidas são representadas por uma variável aleatória Gaussiana de média nula. A comparação dos resultados obtidos dos modelos de propagação, descritos no Capítulo 2, com os resultados obtidos a partir de medidas em campo, é realizado utilizando a métrica do erro percentual absoluto médio (MAPE), conforme Eq. 3.4.

A Tabela 3.1 mostra os resultados de medidas publicados em diversos artigos considerando um cenário *Indoor LOS*. A distância de referência considerada é de 1 metro.

Ambiente Indoor LOS	Cidade	Antenas Tx-Rx	Altura Tx	Altura Rx	LOS PLE	LOS sigma (dB)	Referência
1	Santa Rita do Sapucaí	Corneta/Slotted	1,8 metros	1,8 metros	2	x	[43]
2	Nova York	Corneta/Corneta	2,5 metros	1,5 metros	1,7	2,5	[18]
3	Nova York	Corneta/Corneta	Não informado	Não informado	1,1	1,2	[28]
4	Malásia	Não Informado	1,7 metros	1,5 metros	0,6	3,3	[44]
5	Nova Zelândia	Narrow/Narrow	1,75 metros	1,75 metros	1,45	1,7	[45]
6	Coreia	Corneta/Corneta	2,1 metros	1,45 metros	1,68	1,32	[46]
7	Nova York	Narrow/Narrow	Não informado	Não informado	1,9	3,38	[47]
8	Nova York	Narrow/Wide	2,5 metros	1,5 metros	1,2	1,8	[48]

Tabela 3.1. Ambientes de medidas para o cenário de propagação Indoor LOS em 28 GHz.

A Fig. 3.2 representa a atenuação para cada ambiente calculados a partir das condições mostradas na Tabela 3.1. A curva em asteriscos vermelhos representa a condição que mais atenuou o sinal enquanto a curva em asteriscos azuis representa a condição do ambiente que menos atenuou o sinal.

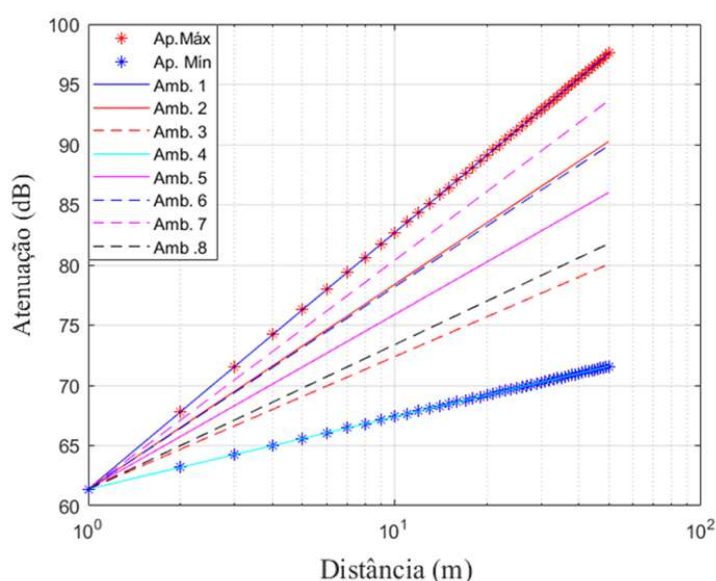


Fig 3.2. Curvas Aproximadas de Ambientes Distintos em Cenários Indoor LOS.

A Fig. 3.3 representa a atenuação calculada a partir da equação dos modelos de propagação considerados nesse trabalho. Além disso são plotadas as curvas máxima e mínima, conforme a Fig 3.2, respectivamente. Pela Fig. 3.3, é possível se verificar que as estimativas de atenuação estão em sua maior parte na faixa entre as curvas máxima e mínima de dados de campo. Para pequenas distâncias, as estimativas calculadas pelos modelos propagação são conservativas.

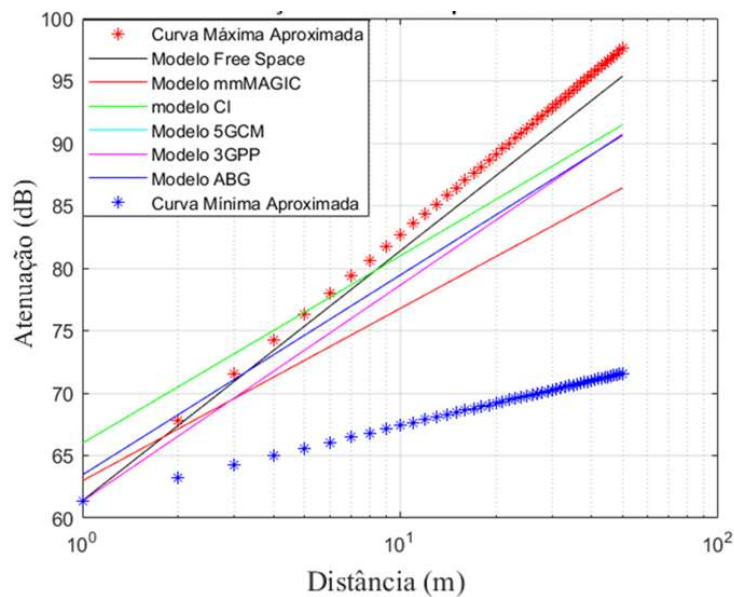


Fig 3.3. Curvas Referentes a Modelos de Propagação em Cenários Indoor LOS.

Foi realizado o cálculo do erro percentual absoluto médio (MAPE) entre a estimativa da atenuação proveniente de cada modelo de propagação e os resultados obtidos a partir de dados de campo para o cenário *Indoor* LOS conforme mostra a Tabela 3.2. Baseado no valor do MAPE determinado para cada ambiente foi calculado o MAPE médio de cada modelo com o intuito de verificar a aderência de cada modelo nos diversos ambientes.

Modelos	Ambiente 1	Ambiente 2	Ambiente 3	Ambiente 4	Ambiente 5	Ambiente 6	Ambiente 7	Ambiente 8	Média MAPE
mmMAGIC	8,94%	3,08%	6,82%	16,73%	0,89%	8,94%	5,88%	5,05%	7,04%
5GCM	5,72%	0,41%	10,54%	20,83%	4,38%	0,71%	2,55%	8,70%	6,73%
3GPP TR 38,901	5,72%	0,41%	10,54%	20,83%	4,38%	0,71%	2,55%	8,70%	6,73%
Free Space	1,85%	4,55%	15,13%	25,88%	8,70%	4,87%	1,47%	13,21%	9,46%
ABG	5,34%	0,98%	11,15%	21,48%	4,96%	1,28%	2,24%	9,30%	7,09%
CI	4,32%	2,52%	12,83%	4,32%	6,57%	2,84%	1,66%	10,96%	5,75%

Tabela 3.2. Erro MAPE em cada ambiente para cada modelo em cenário indoor LOS.

Pelo resultado do MAPE médio pode se verificar que as estimativas calculadas a partir dos modelos de propagação, em geral, tiveram uma boa aderência considerando os resultados provenientes das medidas em campo. O erro MAPE médio dos modelos estiveram dentro da faixa de 5,75% a 9,46% sendo considerados baixos dado a todas as imprecisões de medida e sazonalidades. Analisando os dados provenientes dos ambientes *indoors* (Tabela 3.1) percebe-se que a maioria deles possuem um valor de PLE menor do que 2, que é o valor referente a propagação de um sinal em um ambiente ideal sem quaisquer obstáculos (ambiente *Free Space*). Isso se deve ao fato que em ambientes *indoors* ocorrem reflexões construtivas, as quais são responsáveis por realizar o retorno de uma parcela do sinal que se propagaria em uma direção distinta para o receptor [58]. Dentre todos os ambientes analisados, o ambiente 4 foi o que apresentou a pior aderência dos modelos de propagação com os resultados de medidas em campo. Isso se deve ao fato desse ambiente, conforme descrito em [42], ser um ambiente *indoor* com medidas realizadas em um corredor (com paredes laterais, piso e teto) que são responsáveis por gerar uma maior reflexão construtiva das réplicas do sinal em direção ao receptor, possuindo assim um menor valor de PLE (0,6). Esse dado pode ser constatado pela Fig. 3.2, onde percebemos que o ambiente 4 representa o cenário que menos atenuou o sinal. Os modelos de propagação para cenários *indoor* possuem coeficientes com valores empíricos derivados, em sua maioria, de medidas em ambientes de escritórios ou residencial. Isso levaria a estimativas de perda conservativas ao se utilizar esses modelos em ambientes *indoors* com corredores.

Pela análise do MAPE da Tabela 3.1, concluímos que o modelo de propagação do Espaço Livre representa o modelo que possui pior estimativa em relação aos demais no cenário *indoor* LOS. Esse modelo considera um ambiente de propagação sem qualquer tipo de obstáculo onde não há reflexão, difração nem espalhamento. Em ambientes *indoors* por se tratar de ambientes fechados (com piso, paredes, teto, objetos no interior etc) ocorre uma quantidade grande de reflexões em relação a ambientes externos, fazendo que o modelo *Free Space* apresente estimativas mais conservativas em relação aos demais modelos por não considerar em sua formulação qualquer tipo de reflexão. O modelo CI por apresentar como

parâmetro apenas o valor de PLE, e esse valor para ambientes *indoor* na maioria dos casos é menor do que o valor 2 (valor referente a ambientes *Free Space*), fez com que esse modelo tivesse a melhor estimativa para os cenários *indoor* analisados.

3.4 Determinação MAPE para Modelos *Indoor* sem Linha de Visada Direta

Essa seção apresenta uma análise comparativa dos resultados obtidos por modelos de propagação em 28 GHz com medidas de campo publicadas em diversos artigos, conforme ilustra a Tabela 3.3 para o cenário *indoor* NLOS. A distância de referência considerada é de 1 metro.

Ambiente Indoor NLOS	Cidade	Antenas Tx-Rx	Altura Tx	Altura Rx	NLOS PLE	NLOS sigma (dB)	Referência
1	Santa Rita do Sapucaí	Corneta/Slotted	1,8 metros	1,8 metros	2,31	x	[43]
2	Nova York	Corneta/Corneta	2,5 metros	1,5 metros	4,4	11,6	[18]
3	Nova York	Corneta/Corneta	Não informado	Não informado	4,5	11,6	[49]
4	Nova York	Corneta/Corneta	Não informado	Não informado	2,7	9,1	[28]
5	Nova Zelândia	Narrow/Narrow	1,75 metros	1,75 metros	2,18	3,4	[45]
6	Nova York	Narrow/Narrow	Não informado	Não informado	4,39	7,3	[47]
7	Nova York	Narrow/Narrow	2,5 metros	1,5 metros	4,6	12,1	[48]
8	Nova York	Narrow/Wide	2,5 metros	1,5 metros	2,7	9,7	[51]

Tabela 3.3. Ambientes de medidas para o cenário de propagação *Indoor* NLOS em 28 GHz.

A Fig. 3.4 representa as curvas CI com dados obtidos das condições mostradas na Tabela 3.3. Assim como na Fig. 3.2, a curva traçada com asteriscos vermelhos se refere ao ambiente que mais atenuou o sinal e a curva com asteriscos azuis se refere ao ambiente que menos atenuou o sinal.

A Fig. 3.5 representa a atenuação calculada a partir da equação dos modelos de propagação considerados nesse trabalho. Além disso, as curvas dos ambientes de maior e menor atenuações são as mesmas curvas plotadas na Fig 3.4, respectivamente. Pela Fig. 3.5 é possível de se verificar que as estimativas de atenuação calculadas a partir dos modelos de propagação estão, em sua maior parte, dentro da faixa compreendida entre a curva aproximada máxima e a curva mínima derivadas de medidas em campo. Do mesmo modo que na Fig. 3.3, para pequenas distâncias as estimativas dos modelos são conservativas quando comparadas com resultados de campo. Uma vez que em um cenário NLOS não há linha de visada direta entre transmissor e receptor, não foi utilizado o modelo *Free Space*.

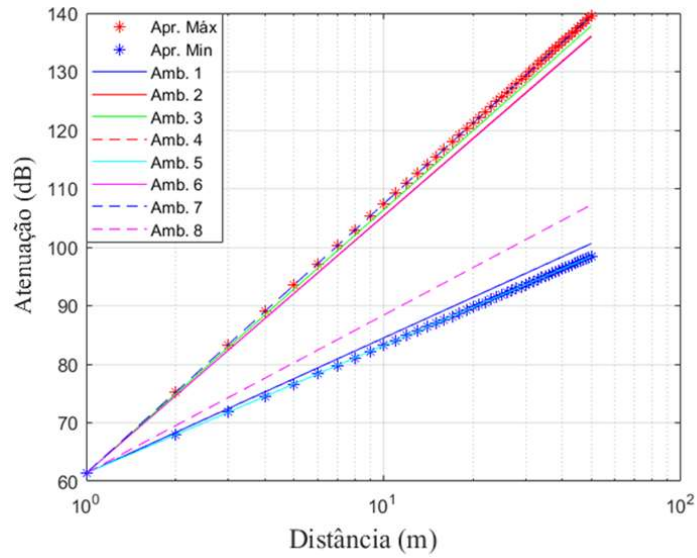


Fig 3.4. Curvas Aproximadas de Ambientes Distintos em Cenários Indoor NLOS.

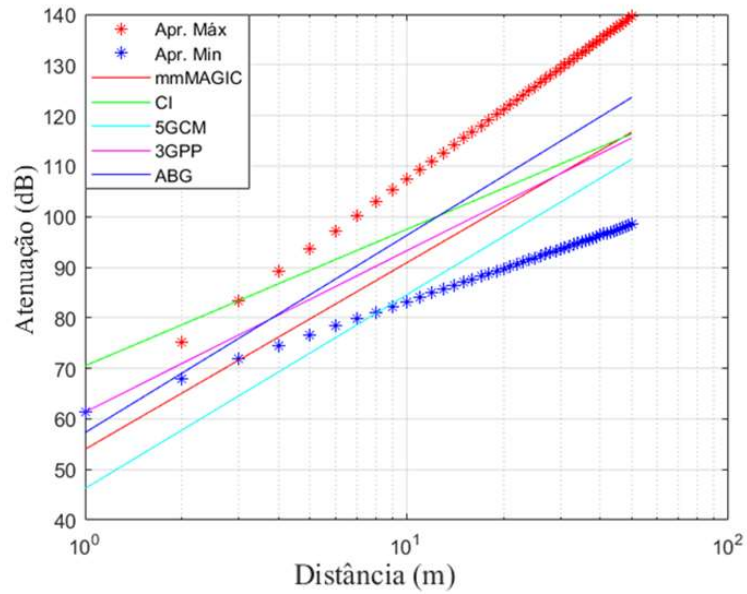


Fig 3.5. Gráfico das Estimativas dos Modelos de Propagação em Cenários Indoor NLOS.

A Tabela 3.4 apresenta o resultado do cálculo do erro MAPE para cada modelo de propagação nos ambientes estudados para o cenário *Indoor* NLOS. É apresentado também o valor do MAPE médio de cada modelo nos diversos ambientes.

Modelos	Ambiente A1	Ambiente A2	Ambiente A3	Ambiente A4	Ambiente A5	Ambiente A6	Ambiente A7	Ambiente A8	Média MAPE
mmMAGIC	11,58%	13,96%	14,86%	6,12%	13,58%	13,87%	15,74%	6,12%	11,98%
5GCM	7,18%	19,21%	20,06%	3,75%	8,80%	19,12%	20,89%	3,75%	12,84%
3GPP TR 38,901	12,12%	12,85%	13,76%	6,36%	14,18%	12,76%	14,65%	6,36%	11,63%
ABG	17,70%	8,86%	9,81%	11,67%	19,87%	8,76%	10,74%	11,67%	12,38%
CI	15,48%	10,95%	11,84%	9,59%	17,60%	10,86%	12,71%	9,59%	12,33%

Tabela 3.4. Erro MAPE em cada ambiente para cada modelo em cenário indoor NLOS.

Pelo resultado do MAPE médio pode se verificar que as estimativas calculadas a partir dos modelos de propagação, em geral, tiveram uma boa aderência considerando os resultados provenientes das medidas em campo. O erro MAPE médio calculado para os modelos, conforme Tabela 3.4, são próximos e estão dentro da faixa de 11,98% a 12,84%. Esses modelos de propagação tiveram um erro percentual médio maior em relação ao cenário *indoor* LOS devido ao fato de que em ambientes NLOS, os obstáculos que obstruem a linha de visada direta podem ser constituídos de diversos tipos de materiais como, também, podem apresentar diversos formatos de geometria. A consequência desse fenômeno é que teremos um comportamento mais aleatório da atenuação do sinal nos cenários NLOS em relação aos cenários LOS. Isso ocorre por haver um ou mais obstáculos obstruindo a linha de visada direta entre transmissor e receptor teremos atenuações e dispersões do sinal maiores em relação aos cenários LOS.

Pela análise da Tabela 3.4 percebemos que o modelo de propagação que obteve um menor MAPE médio em relação aos demais foi o modelo 3GPP TR 38.901 com valor de 11,63% e o que obteve um maior MAPE médio foi o modelo 5GCM com valor 12,84%. O 3GPP TR 38.901 por levar em consideração mais requisitos como perda por reflexão do solo, alturas das antenas transmissoras e receptoras, polarização 3D etc faz com que esse modelo possua uma melhor estimativa em casos de cenários NLOS. Entretanto, os erros MAPEs médios de todos os modelos considerados foram próximos uns dos outros, indicando que as estimativas de perda desses modelos de propagação são consideradas adequadas.

3.5 Modelos de Propagação em Ambientes *Indoor* LOS

Nas figuras a seguir, foi plotado a estimativa de perda calculada para cada um dos modelos estudados junto com os dados provenientes das medidas de campo dos ambientes *indoor* LOS analisados nesse trabalho. O objetivo foi permitir uma

análise visual dessas estimativas em comparação com os resultados de perda desses ambientes.

Nessas figuras são apresentados os valores máximos e mínimos de perdas provenientes de medidas em campo para o cenário *indoor* LOS. Eles são representados por asteriscos vermelhos e azuis, respectivamente. A estimativa de perda calculada para cada um dos modelos de propagação é representada em asteriscos pretos.

3.5.1 – Modelo mmMAGIC *Indoor* LOS

Pela análise do gráfico da Fig. 3.6, é possível de verificar que as estimativas provenientes do modelo mmMAGIC encontram-se aproximadamente no meio da faixa compreendida entre as medidas dos ambientes que apresentaram valores das atenuações máxima e mínima. O cálculo das perdas utilizando o modelo mmMAGIC apresentaram valores de MAPE compreendidos entre 0,89% e 16,73% para os ambientes do cenário *indoor* LOS, de acordo com a Tabela 3.2.

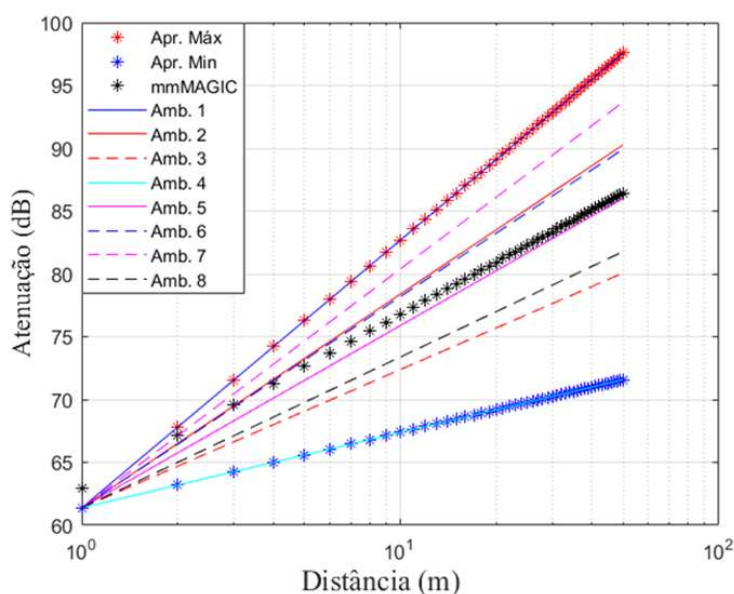


Fig 3.6. Modelo mmMAGIC x Dados dos Ambientes no Cenário Indoor LOS.

3.5.2 – Modelo 5GCM *Indoor* LOS

A Fig. 3.7 mostra que as estimativas de atenuação calculadas pelo modelo 5GCM encontram-se entre os valores de medidas de maior e menor atenuação, e são próximas das medidas dos ambientes 2 e 6. As estimativas do modelo 5GCM apresentam valores de MAPE compreendidos entre 0,41% e 20,83%.

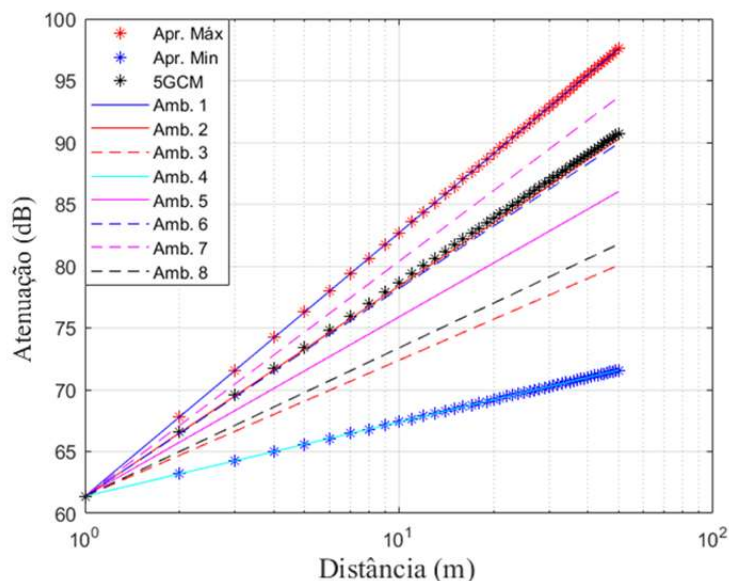


Fig 3.7. Modelo 5GCM x Dados dos Ambientes no Cenário Indoor LOS.

3.5.3 – Modelo 3GPP TR 38 901 *Indoor* LOS

O gráfico da Fig 3.8 mostra que as estimativas provenientes do modelo 3GPP TR 38.901 encontram-se dentro da faixa delimitada pelas medidas provenientes dos ambientes para o cenário *indoor* LOS, sendo como no caso anterior mais próximas dos ambientes 2 e 6. Isso ocorre pois para o cenário indoor LOS a equação que rege a estimativa de perda para o modelo 3GPP TR 38 901 é a mesma da que rege o modelo 5GCM. Devido a isso, as estimativas provenientes do modelo 3GPP TR 38.901 apresentam valores de MAPE iguais aos valores do modelo 5GCM e são compreendidos entre 0,41% e 20,83% para esse mesmo cenário.

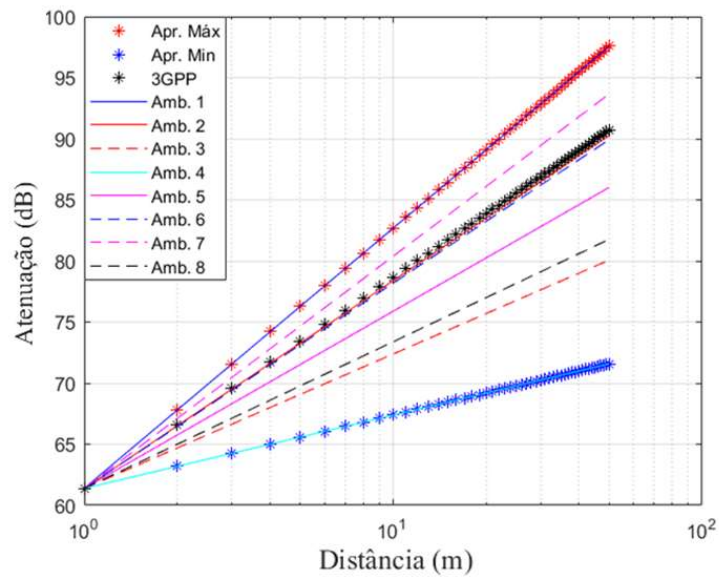


Fig 3.8. Modelo 3GPP TR 38.901 x Dados dos Ambientes no Cenário Indoor LOS.

3.5.4 – Modelo *Free Space Indoor* LOS

As estimativas provenientes do modelo *Free Space* deveriam ser as que apresentassem o maior valor de atenuação calculada. Isso ocorre pois em ambientes *indoors* LOS ocorrem reflexões construtivas, o que leva a obtenção de valores de PLE menores do que 2 que é o valor de PLE do vácuo [49-50]. Assim os valores máximos medidos que são provenientes das medidas do ambiente 1 podem ser considerados como um caso de *outlier* por apresentar atenuação acima do valor máximo de atenuação esperado. As estimativas provenientes do modelo *Free Space* apresentam valores de MAPE compreendidos entre 1,47% a 25,88% para o cenário *Indoor* LOS, conforme mostra Tabela 3.2. Os valores de MAPE calculados para o modelo *Free Space* são maiores em relação aos demais modelos. Isso ocorre pelo fato de que esse modelo não considera as reflexões construtivas.

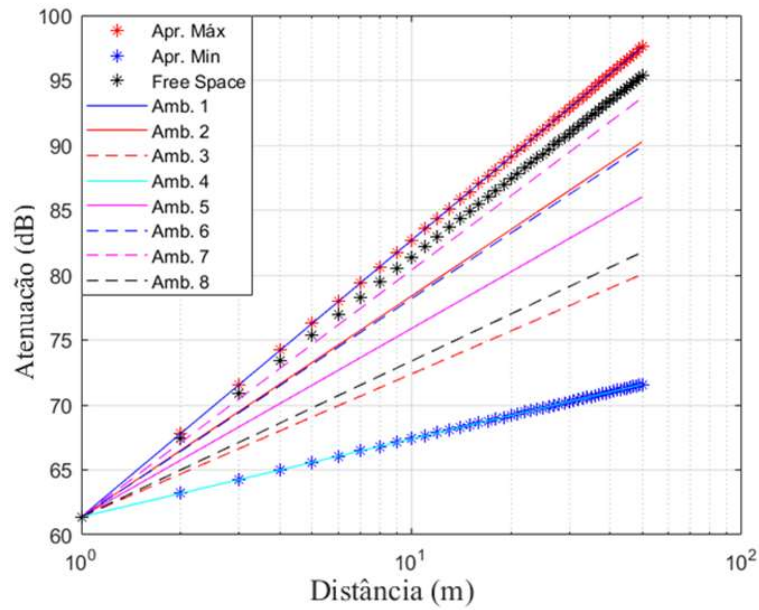


Fig 3.9. Modelo Free Space x Dados dos Ambientes no Cenário Indoor LOS.

3.5.5 – Modelo ABG Indoor LOS

A análise visual da Fig 3.10 mostra que as estimativas calculadas para pequenas distâncias pelo modelo ABG são maiores do que as calculadas por outros modelos. Esse modelo por depender de 3 diferentes parâmetros (alpha, beta e gamma) mostra valores estimados próximos de valores estimados pelo modelo Free Space principalmente quando se considera pequenas distâncias. As estimativas calculadas pelo modelo ABG apresentam valores de MAPE compreendidos entre 0,98% e 21,48% para o cenário *indoor* LOS.

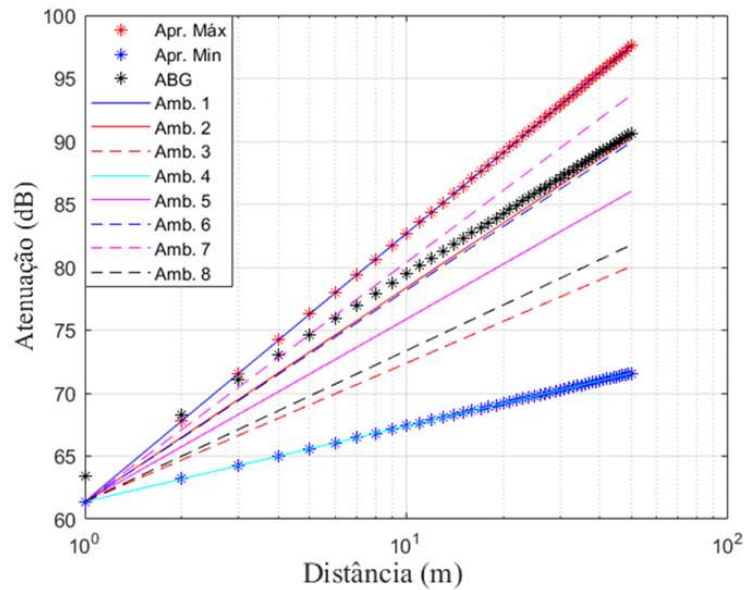


Fig 3.10. Modelo ABG x Dados dos Ambientes no Cenário Indoor LOS.

3.5.6 – Modelo CI *Indoor* LOS

Para o cenário *indoor* LOS o modelo CI apresenta estimativas de perda maiores do que as medidas provenientes do ambiente 1 para pequenas distâncias, conforme gráfico da Fig 3.11. Comparando a Fig 3.11 com a Fig 3.9 verificamos que esses valores de perda estimadas pelo modelo CI são inclusive maiores do que os valores de perda calculados pelo modelo *Free Space* que deveriam ser as maiores perdas estimadas [49-50]. Isso indica que o modelo CI leva a estimativas mais conservativas para distâncias inferiores a 5 metros. As estimativas provenientes do modelo CI apresentam valores de MAPE compreendidos entre 1,66 % e 21,48% para o cenário *indoor* LOS.

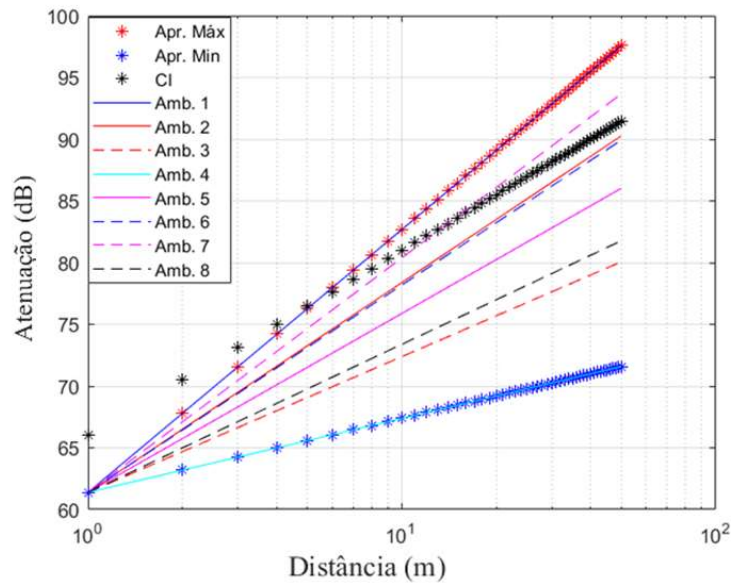


Fig 3.11. Modelo CI x Dados dos Ambientes no Cenário Indoor LOS.

3.6 – Análise das Incertezas no Cenário *Indoor* LOS

Essa seção apresenta a análise das incertezas relativas relacionadas as medidas de campo utilizadas neste trabalho para os cenários *indoor* LOS. Na Tabela 3.5 estão sumarizados os erros MAPE dos modelos estudados para cada ambiente analisado no cenário *indoor* LOS, a atenuação para cada ambiente na distância de 10 metros, a incerteza absoluta considerando um intervalo 2σ e a incerteza relativa calculada a partir das medidas de campo.

Modelos/MAPE	Ambiente 1	Ambiente 2	Ambiente 3	Ambiente 4	Ambiente 5	Ambiente 6	Ambiente 7	Ambiente 8
mmMAGIC	8,94%	3,08%	6,82%	16,73%	0,89%	8,94%	5,88%	5,05%
5GCM	5,72%	0,41%	10,54%	20,83%	4,38%	0,71%	2,55%	8,70%
3GPP TR 38,901	5,72%	0,41%	10,54%	20,83%	4,38%	0,71%	2,55%	8,70%
Free Space	1,85%	4,55%	15,13%	25,88%	8,70%	4,87%	1,47%	13,21%
ABG	5,34%	0,98%	11,15%	21,48%	4,96%	1,28%	2,24%	9,30%
CI	4,32%	2,52%	12,83%	4,32%	6,57%	2,84%	1,66%	10,96%
Atenuação em 10 metros (dB)	82,68	78,38	72,38	67,38	75,88	78,18	80,38	73,38
Incerteza 2 sigma (dB)	NA	5,00	2,40	6,60	3,40	2,64	6,76	3,60
Incerteza Relativa Percentual	NA	6,38%	3,32%	9,79%	4,48%	3,38%	8,41%	4,91%

Tabela 3.5. Incertezas relativas em cada ambiente para o cenário indoor LOS.

Comparando o erro MAPE das estimativas de atenuação dos modelos estudados com os valores das incertezas relativas percentuais e aplicando o critério qualitativo definido na subseção 3.2.2, considerando uma distância de 10 metros como referência, podemos afirmar:

- O erro MAPE das estimativas dos modelos estudados para os ambientes 3, 4 e 8 são relativamente maiores do que a incerteza relativa percentual. Isso mostra que para esses ambientes as estimativas dos modelos são mais discrepantes. Em particular as medidas de atenuação proveniente desses ambientes são substancialmente menores em relação aos dados obtidos por outros pesquisadores. De acordo com a Tabela 3.2, esses ambientes apresentaram os menores valores de PLE, a mencionar: 1.1, 0.6 e 1.2, respectivamente.
- Nos ambientes 2, 5, 6 e 7, as estimativas de perda provenientes dos modelos de propagação apresentaram melhores resultados comparados com o critério qualitativo discutido na subseção 3.2.2.
- Os ambientes 2, 5 e 7, mostraram uma melhor aderência para o modelo mmMAGIC uma vez que o seu valor de erro MAPE foi menor do que o valor da incerteza relativa.
- Para os ambientes 2, 5, 6 e 7, o modelo 5GCM apresentou uma melhor estimativa também comparando o seu valor de erro MAPE em cada ambiente com os valores das incertezas relativas provenientes das medidas em campo também para cada ambiente.
- Para os ambientes 2, 5, 6 e 7, o modelo 3GPP TR 38 901 apresentou uma melhor estimativa, também pelo fato de seu erro MAPE nesses ambientes serem menor do que o valor da incerteza relativa provenientes dos resultados de medidas em campo desses ambientes.
- O modelo Free Space possui um erro MAPE menor do que as incertezas relativas apenas nos ambientes 2 e 7, indicando que esse modelo não possui uma boa aderência na maioria dos ambientes indoor devido as estimativas provenientes desse modelo não considerar as reflexões construtivas que estão presentes nos

ambientes indoors LOS [49-50]. Os cálculos de perda utilizando o modelo Free Spece levam a maiores estimativas de perda para esse tipo de cenário.

- O modelo ABG apresentou boas estimativas para os ambientes 2, 6 e 7 pela comparação de seu erro MAPE com a incerteza relativa provenientes das medidas dos ambientes
- O modelo CI teve uma melhor estimativa de perda para os ambientes 2, 4, 6 e 7 também realizando a análise comparativa do seu valor de erro MAPE e incerteza relativa percentual de cada ambiente.

3.7 Modelos de Propagação em Ambientes *Indoor* NLOS

Nas figuras a seguir, assim como na seção 3.5, foi plotado a estimativa de perda calculada para cada um dos modelos estudados junto com os dados provenientes das medidas de campo dos ambientes *indoor* NLOS analisados nesse trabalho. O objetivo foi realizar uma análise visual das estimativas dos modelos com os resultados de perda provenientes de medidas em campo. Nessas figuras também são destacados os valores de atenuações máxima e mínima, representadas da mesma forma do que para os ambientes *indoor* LOS descritos anteriormente, com asteriscos vermelhos e azuis, respectivamente. As estimativas de perda referente a cada um dos modelos de propagação são representadas por asteriscos pretos da mesma forma que na seção 3.5.

3.7.1 – Modelo mmMAGIC *Indoor* NLOS

Pela análise do gráfico da Fig. 3.12, é possível de verificar que para pequenas distâncias as estimativas de perda provenientes do modelo mmMAGIC foram menores em relação aos dados de medidas em campo para o cenário *indoor* NLOS. A partir de uma distância de aproximadamente 4 metros a partir do transmissor o modelo mmMAGIC passa a adentrar na faixa entre o ambiente de menor e maior atenuação. As estimativas provenientes do modelo mmMAGIC

apresentam valores de MAPE compreendidos entre 6,12% e 15,74% para a situação de NLOS, de acordo com a Tabela 3.4.

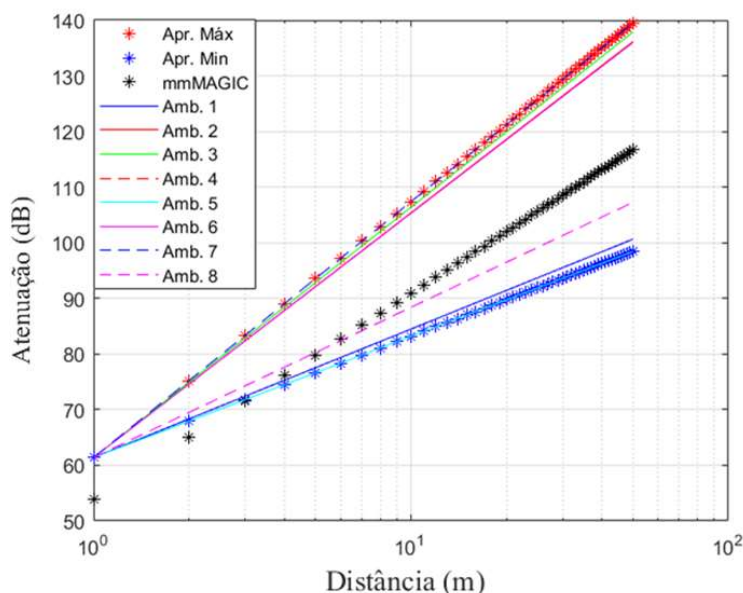


Fig 3.12. Modelo mmMAGIC x Curvas dos Ambientes em Cenários Indoor NLOS.

3.7.2 – Modelo 5GCM Indoor NLOS

Pela Fig. 3.13, verifica-se que as estimativas provenientes do modelo 5GCM possui uma estimativa de perda menor em relação aos resultados de campo para o cenário *indoor* NLOS. A partir de uma distância de aproximadamente 10 metros em relação ao transmissor as estimativas de perda provenientes do modelo 5GCM passam a estar compreendidas na faixa delimitada pelas medidas provenientes dos ambientes de maior e menor atenuação. Pelo gráfico pode-se constatar que para distâncias menores de 10 metros no cenário *indoor* NLOS, as estimativas desse modelo não apresentam bons resultados. O modelo 5GCM apresenta valores de MAPE compreendidos entre 3,75% e 20,89% para o cenário *indoor* NLOS.

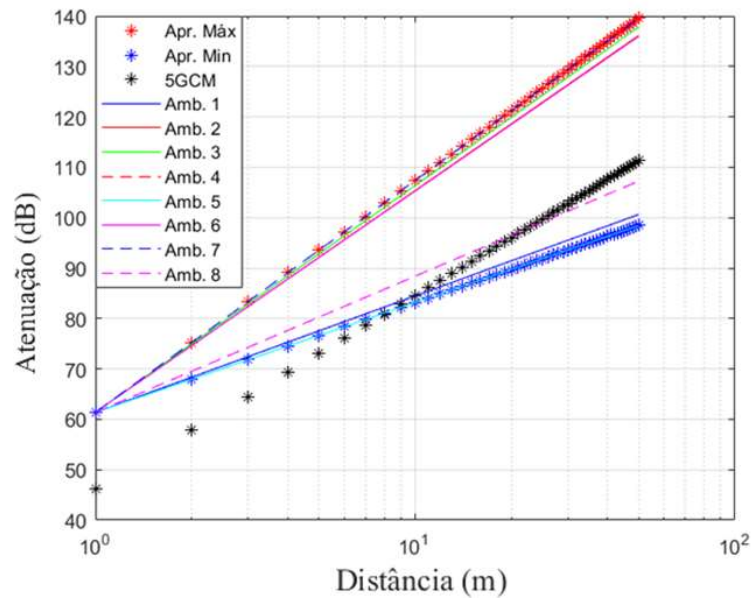


Fig 3.13. Modelo 5GCM x Curvas de Ambientes Distintos em Cenários Indoor NLOS.

3.7.3 – Modelo 3GPP TR 38 901 Indoor NLOS

A Fig. 3.14 mostra que o modelo 3GPP TR 38 901 possui estimativas de perda para o cenário *indoor* NLOS com valores intermediários entre as medidas dos ambientes de maior e menor atenuação. O modelo 3GPP TR 38 901 apresenta valores de MAPE compreendidos entre 6,36% e 14,65% para a situação de NLOS e em média possui o menor valor de erro MAPE o cenário *indoor* NLOS, valor de 11,63% de acordo com a Tabela 3.4.

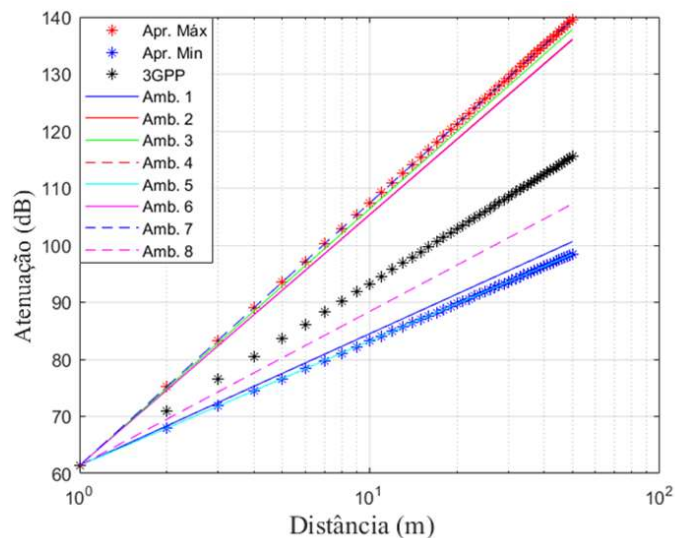


Fig 3.14. Modelo 3GPP TR 38.901 x Curvas de Ambientes em Cenários Indoor NLOS.

3.7.4 – Modelo ABG *Indoor* NLOS

A Fig. 3.15 nos mostra que o modelo ABG possui estimativas de perda para o cenário *indoor* NLOS dentro da faixa dos ambientes de maior e menor atenuação para distâncias maiores que 2 metros. Abaixo de 2 metros as estimativas desse modelo são ligeiramente menores em relação aos dados de medidas em campo. O modelo ABG apresentam valores de MAPE entre 8,76% e 19,87% para o cenário *indoor* NLOS.

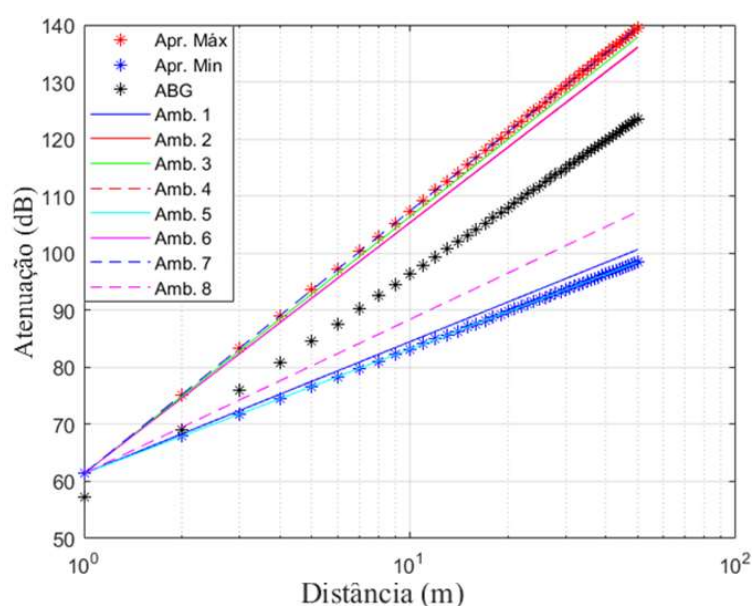


Fig 3.15. Modelo ABG x Curvas de Ambientes em Cenários Indoor NLOS.

3.7.5 – Modelo CI *Indoor* NLOS

A análise da Fig. 3.16 mostra que o modelo CI possui estimativas de perda maiores que a medida do ambiente de máxima atenuação para distâncias entre transmissor e receptor abaixo de 3 metros. Isso torna as estimativas mais conservativas nessa região. Para distâncias superiores a 3 metros, as estimativas de perda do modelo CI passam a estar dentro da faixa entre os ambientes de maior e menor atenuação. Esse modelo apresentou valores de MAPE compreendidos entre 8,76% e 19,87% para o cenário *indoor* NLOS.

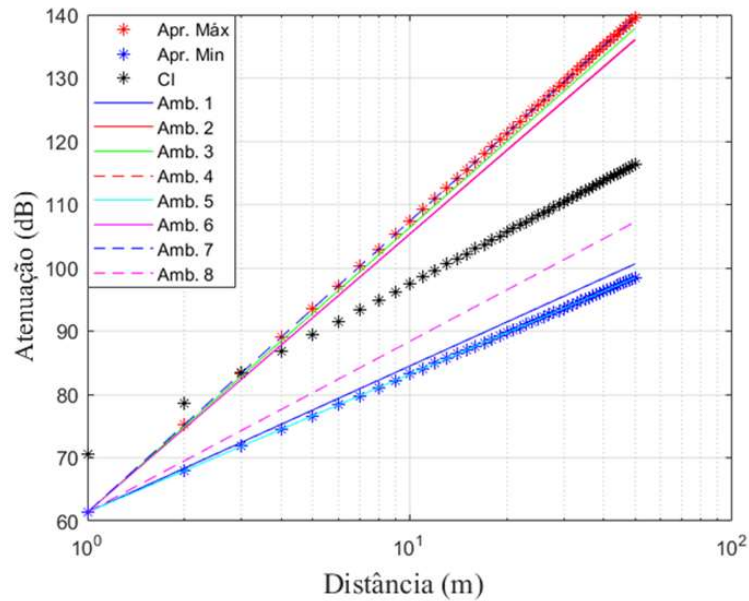


Fig 3.16. Modelo CI x Curvas dos Ambientes em Cenários Indoor NLOS.

3.8 – Análise das Incertezas no Cenário *Indoor* NLOS

Essa seção apresenta a mesma análise comparativa feita para o cenário *indoor* LOS agora para a situação *indoor* NLOS. Na Tabela 3.6 estão sumarizados os erros MAPE dos modelos estudados para cada ambiente analisado no cenário *indoor* NLOS, a atenuação para cada ambiente na distância de 10 metros, a incerteza absoluta considerando um intervalo 2σ e a incerteza relativa calculada a partir das medidas de campo.

Modelos	Ambiente A1	Ambiente A2	Ambiente A3	Ambiente A4	Ambiente A5	Ambiente A6	Ambiente A7	Ambiente A8
mmMAGIC	11,58%	13,96%	14,86%	6,12%	13,58%	13,87%	15,74%	6,12%
5GCM	7,18%	19,21%	20,06%	3,75%	8,80%	19,12%	20,89%	3,75%
3GPP TR 38,901	12,12%	12,85%	13,76%	6,36%	14,18%	12,76%	14,65%	6,36%
ABG	17,70%	8,86%	9,81%	11,67%	19,87%	8,76%	10,74%	11,67%
CI	15,48%	10,95%	11,84%	9,59%	17,60%	10,86%	12,71%	9,59%
Atenuação em 10 metros (dB)	84,48	105,38	106,38	88,38	83,18	105,28	107,38	88,38
Incerteza 2 sigma	NA	23,2	23,2	18,2	6,8	14,6	24,2	19,4
Incerteza Relativa Percentual	NA	22,01%	21,81%	20,59%	8,17%	13,87%	22,54%	21,95%

Tabela 3.6. Incertezas relativas em cada ambiente para o cenário indoor NLOS

Comparando o erro MAPE referente as estimativas dos modelos de propagação considerados nesse trabalho com os valores das incertezas relativas

percentuais e aplicando o mesmo critério qualitativo definido na subseção 3.2.2, considerando a atenuação proveniente dos dados de campo para a distância 10 metros, podemos afirmar:

- As estimativas de perda determinadas pelo modelo mmMAGIC apresentam os melhores resultados nos ambientes 2, 3, 4, 6, 7 e 8, uma vez que o valor do erro MAPE calculados para esses ambientes são próximos do valor da incerteza relativa percentual. O ambiente 5 foi o único que não atendeu ao critério.
- O modelo 5GCM apresentou boas estimativas para os ambientes 2, 3, 4, 5, 7 e 8, ao se comparar o valor do erro MAPE em cada ambiente com os valores das incertezas relativas percentuais provenientes das medidas em campo. Apenas o ambiente 6 não atendeu ao critério.
- Para os ambientes 2, 3, 4, 6, 7 e 8, o modelo 3GPP TR 38 901 apresentou bons resultados, pois atende ao mesmo critério proposto.
- O modelo ABG atendeu ao critério proposto para os ambientes 2, 3, 4, 6, 7 e 8. Apenas o ambiente 5 não atendeu ao critério.
- O modelo CI apresentou bons resultados para os ambientes 2, 3, 4, 6, 7 e 8.

Capítulo 4 – Análises para Ambientes *Outdoors* na Banda de 28 GHz

Esse Capítulo apresenta modelos de propagação para análise das perdas dos sinais operando na faixa de 28 GHz para ambientes *outdoor*, dentro da faixa do FR2 do 5G NR. O Capítulo está estruturado da seguinte maneira: a Seção 4.1 apresenta uma introdução ao cenário *urban microcell* (UMi) LOS juntamente com uma análise dos ambientes pesquisados para estudo relacionados a esse cenário; a Seção 4.2 faz a mesma análise da seção anterior para o cenário UMi NLOS; a Seção 4.3 apresenta uma análise comparativa de cada modelo de propagação com os resultados de medidas em campo para os ambientes UMi LOS; a Seção 4.4 apresenta a análise qualitativa baseada na incerteza relativa dos resultados de medidas em campo para o cenário UMi LOS; a Seção 4.5 realiza a mesma análise apresentada na Seção 4.3 para os ambientes UMi NLOS e a Seção 4.6 apresenta a mesma análise qualitativa da Seção 4.4 para o cenário UMi NLOS.

4.1 Cenário UMi com Linha de Visada (LOS)

Esta seção irá introduzir uma breve discussão a respeito do cenário de propagação em UMi LOS. Diferente do cenário *indoor* analisado no capítulo anterior onde tem-se uma menor distância de separação entre transmissor e receptor, e menor atenuação por efeitos ambientais, no cenário *outdoor* esses fenômenos causam maior atenuação. Entretanto, a frequência de 28 GHz possui uma característica muito interessante que é a menor atenuação por absorção de gases e fenômenos atmosféricos em comparação com outras frequências de ondas milimétricas [9].

O cenário UMi é caracterizado por enlaces *outdoor* com células de raios menores, na faixa entre 100 a 300 metros. Considerando uma região de UMi com um enlace entre transmissor e receptor de aproximadamente 200 metros com sinal operando em 28 GHz, o valor da atenuação será pequeno, na ordem de 0,012 dB para a perda por absorção de gases atmosféricos e 1.4 dB para a perda em casos de chuva forte [9].

A Tabela 4.1 abaixo mostra os resultados de medidas publicados em diversos artigos acadêmicos para o cenário UMi LOS que foram considerados nesse trabalho.

Ambiente UMi LOS	Local	Antenas Tx-Rx	Altura Tx	Altura Rx	Dist, Referência	LOS PLE	LOS sigma	Referência
1	Nova Yorque	Narrow /Narrow	7; 17 metros	1,5 metros	1 metro	2,1	3,6 dB	[52]
2	Nova Yorque	Narrow/Narrow	Não informado	Não informado	5 metros	2,55	8,66 dB	[15]
3	China	Narrow/Wide	10 metros	Não informado	1 metro	2,13	x	[53]
4	Nova Yorque	Não Informado	Não informado	Não informado	1 metro	1,6	1,2 dB	[54]

Tabela 4.1. Ambientes de medidas para o cenário de propagação UMi LOS em 28 GHz.

A Fig. 4.1 representa as curvas referentes aos resultados de medidas referentes aos ambientes mencionados na Tabela 4.1.

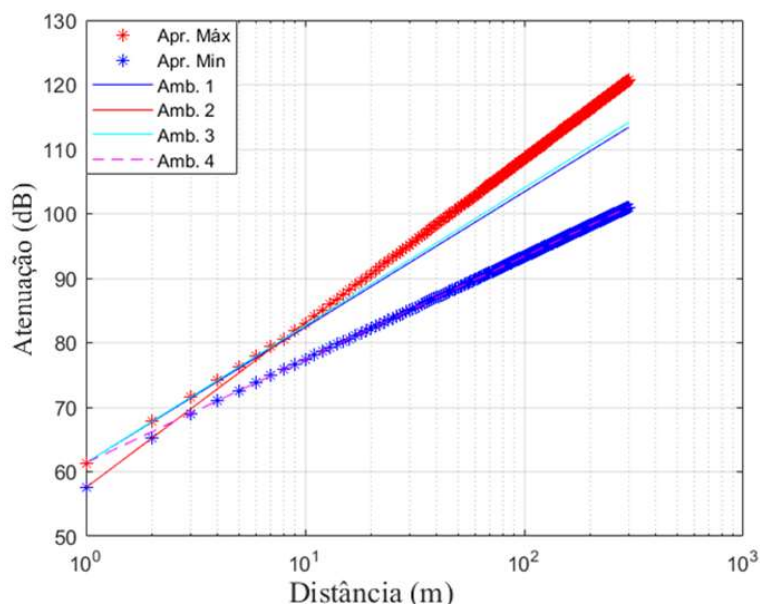


Fig 4.1. Curvas Aproximadas dos Ambientes em Cenário UMi LOS.

Na Fig 4.1 acima, as condições de maior atenuação provenientes das medidas de campo são representadas em asteriscos vermelhos e as de menor atenuação são representados por asteriscos azuis.

A Fig. 4.2 abaixo apresenta as atenuações calculadas a partir das equações dos modelos de propagação considerados nesse trabalho. Além disso, as curvas de atenuação máxima e mínima, são as mesmas curvas plotadas na Fig 4.1, respectivamente. Pela Fig. 4.2, é possível de se verificar que a maior parte das

estimativas de atenuação calculadas a partir dos modelos de propagação estão dentro da faixa compreendida entre a curva de atenuação máxima e mínima.

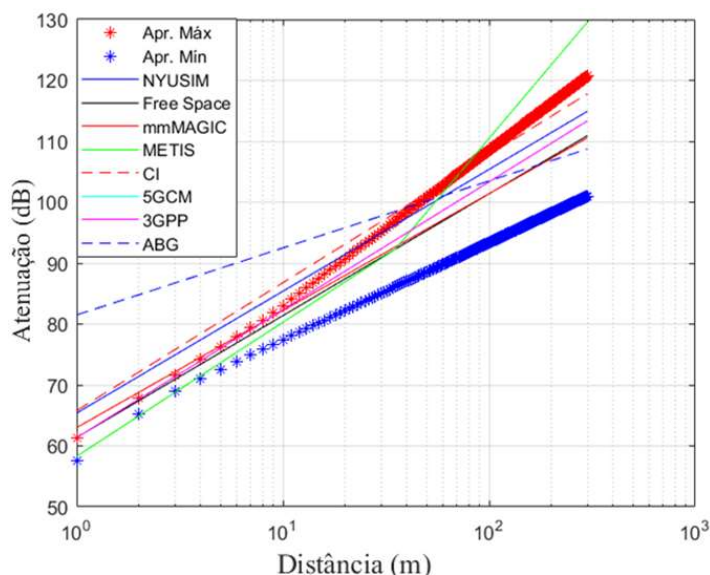


Fig 4.2. *Curvas dos Modelos de Propagação em Cenário UMi LOS.*

A Tabela 4.2 apresenta o valor calculado do erro percentual absoluto médio (MAPE) entre o resultado obtido da atenuação para cada modelo de propagação e os resultados obtidos a partir das medidas de atenuação em campo no cenário *Outdoor* UMi LOS. Baseado no valor do MAPE determinado para cada ambiente, foi calculado o MAPE médio de cada modelo com o intuito de verificar a precisão das estimativas para cada modelo nos diversos ambientes analisados.

Modelos	Ambiente 1	Ambiente 2	Ambiente 3	Ambiente 4	Média MAPE
NYUSIM	1,93%	3,41%	1,34%	12,88%	4,89%
mmMAGIC	1,97%	6,72%	2,53%	8,61%	4,96%
METIS	8,64%	4,22%	8,13%	19,81%	10,20%
5GCM	0,04%	4,88%	0,62%	10,71%	4,06%
3GPP TR 38,901	0,04%	4,88%	0,62%	10,71%	4,06%
Free Space	1,94%	6,67%	2,51%	8,60%	4,93%
ABG	3,32%	6,87%	3,58%	10,72%	6,12%
CI	4,25%	1,71%	3,65%	15,46%	6,27%

Tabela 4.2. *Valores de MAPE de cada modelo no cenário UMi LOS.*

Pelo resultado do MAPE médio pode se verificar que as estimativas calculadas a partir dos modelos de propagação, em geral, tiveram uma boa precisão considerando os resultados provenientes das medidas em campo. O erro MAPE médio dos modelos estiveram dentro da faixa de 4,06% a 10,20% sendo considerados relativamente baixos. Os valores de PLE, conforme mostrados na Tabela 4.1, são próximos de 2 que é o valor do PLE referente a propagação em espaço livre considerando um ambiente ideal, o que é esperado em cenários *outdoor*.

4.2 Cenário UMi sem Linha de Visada (NLOS)

Esta seção mostra a análise para um cenário de UMi sem linha de visada direta (NLOS) entre transmissor e receptor, representando uma situação de pior caso de atenuação que é muito comum nos ambientes urbanos. A atenuação causada pelos obstáculos será mais acentuada dentro de ambientes urbanos, em NLOS, devido aos fenômenos (reflexão, difração, espalhamento e perda por penetração) serem mais intensos. Os obstáculos são de vários tipos (prédios, casas, postes de luz, veículos, seres humanos, árvores etc.) que contribuem para o aumento da dispersão do sinal se propagando entre dois pontos distintos. Com isso, o comportamento e o nível de potência recebida terão maiores variações em comparação aos cenários com linha de visada direta.

A tabela 4.3 abaixo apresenta os ambientes utilizados para realizar a análise comparativa dos modelos de propagação analisados nesse trabalho para o cenário de UMi NLOS.

Ambiente UMi NLOS	Local	Antenas Tx-Rx	Altura Tx	Altura Rx	Dist, Referência	LOS PLE	NLOS sigma	Referência
1	Nova Yorkue	<i>Narrow/Narrow</i>	7; 17 metros	1,5 metros	1 metro	3,4	9,7 dB	[52]
2	Nova Yorkue	<i>Narrow/Narrow</i>	Não informado	Não informado	5 metros	5,76	9,02 dB	[15]
3	China	<i>Narrow/Wide</i>	10 metros	Não informado	1 metro	3,9	x	[53]
4	Suiça	<i>Narrow/Wide</i>	27 metros	Não informado	1 metro	3,53	6,69 dB	[54]
5	Coreia	Corneta/Corneta	Não informado	Não informado	1 metro	3,1	11,2 dB	[53]
6	Nova Yorkue	Não Informado	Não informado	Não informado	1 metro	3	3,8 dB	[54]
7	Nova Yorkue	<i>Narrow/Narrow</i>	7; 17 metros	Não informado	5 metros	6,2	5,9 dB	[55]

Tabela 4.3. Ambientes de medidas para o cenário de propagação UMI NLOS em 28 GHz.

A Fig. 4.3 representa as curvas referentes aos resultados de medidas referentes aos ambientes mencionados na Tabela 4.3.

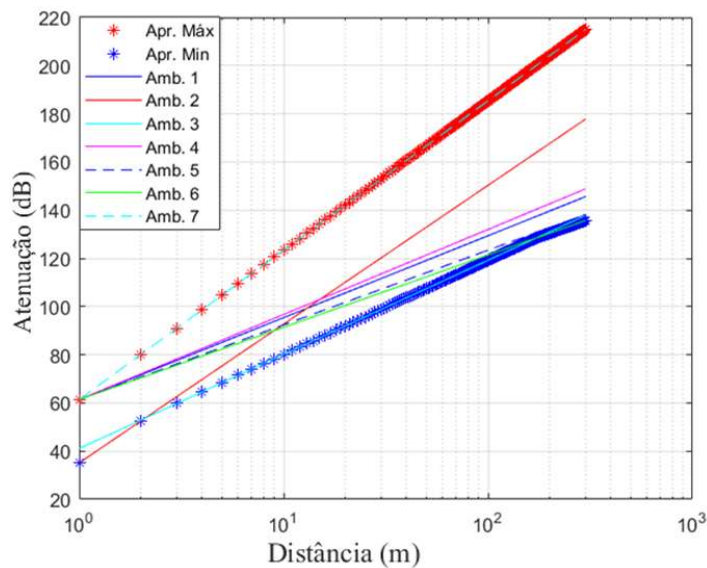


Fig 4.3. Curvas Aproximadas dos Ambientes em Cenário UMi NLOS.

A Fig 4.3 acima apresenta as condições de maior e menor atenuação provenientes das medidas de campo. Essas condições são representadas por asteriscos vermelhos e azuis, respectivamente.

A Fig. 4.4 representa a atenuação calculada a partir da equação dos modelos de propagação considerados nesse trabalho para o cenário UMi NLOS. Além disso, as condições de atenuação máxima e mínima, são as mesmas plotadas na Fig 4.3, respectivamente. Pela Fig. 4.4, é possível de se verificar que as estimativas de atenuação calculadas a partir dos modelos de propagação estão dentro da faixa compreendida entre a curva de atenuação máxima e mínima derivadas de medidas de campo na maior parte das vezes.

A Tabela 4.4 apresenta o valor calculado do erro percentual absoluto médio (MAPE) entre o resultado obtido da atenuação para cada modelo de propagação e os resultados obtidos a partir das medidas de atenuação em campo no cenário *Outdoor* UMi NLOS. Baseado no valor do MAPE determinado para cada ambiente, foi calculado o MAPE médio de cada modelo com o intuito de verificar a precisão das estimativas para cada modelo nos diversos ambientes analisados.

Pelo resultado do MAPE médio pode se verificar que as estimativas calculadas a partir dos modelos de propagação, em geral, tiveram uma boa precisão considerando os resultados provenientes das medidas de campo, dadas todas imprecisões e incertezas presentes na estimativa de um ambiente *outdoor* NLOS. O

erro MAPE médio dos modelos estiveram dentro da faixa de 8,78% a 10,93%. A comparação das estimativas de modelos mostra piores resultados para os ambientes 2 e 7. Isso pode ser atribuído as características peculiares desses dois ambientes [9][53].

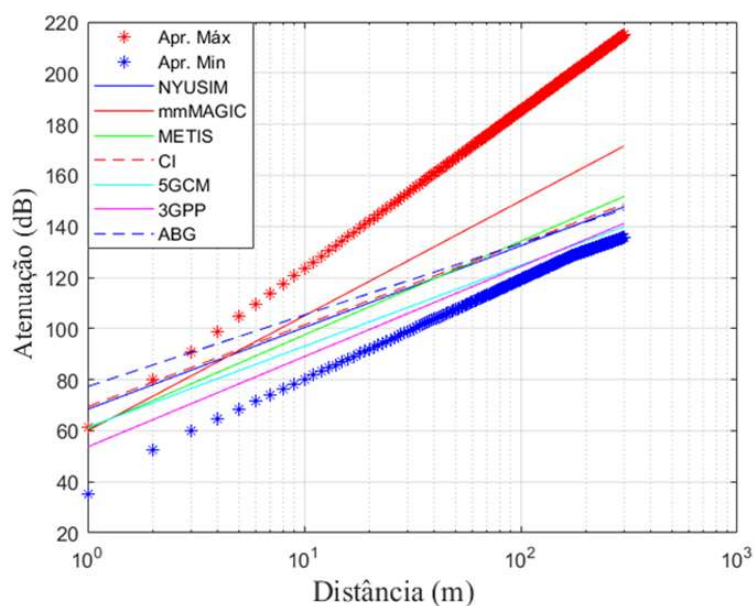


Fig 4.4. Curvas de Modelos de Propagação em Cenário UMi NLOS.

Modelos	Ambiente 1	Ambiente 2	Ambiente 3	Ambiente 4	Ambiente 5	Ambiente 6	Ambiente 7	Média MAPE
NYUSIM	2,34%	13,24%	11,37%	0,85%	7,30%	9,07%	28,42%	10,37%
METIS	3,70%	11,61%	12,76%	1,66%	8,73%	10,53%	27,43%	10,92%
mmMAGIC	2,34%	13,24%	11,37%	0,85%	7,30%	9,07%	28,42%	10,37%
3GPP TR 38,901	3,97%	17,49%	4,40%	5,86%	1,51%	2,85%	32,84%	9,85%
ABG	3,06%	13,46%	12,24%	1,89%	8,05%	9,82%	28,00%	10,93%
5GCM	3,58%	17,52%	4,90%	5,47%	1,10%	2,76%	32,51%	9,69%
CI	4,25%	1,71%	3,65%	4,25%	4,25%	15,46%	27,89%	8,78%

Tabela 4.4 Valores de MAPE de cada modelo em cenário UMi NLOS.

O ambiente UMi NLOS representa o pior caso de propagação de um sinal, devido a maior dispersão e atenuação causada por obstáculos no sinal durante o seu percurso entre transmissor e receptor. O cenário de propagação em UMi, tanto LOS quanto NLOS, poderá simular uma situação de uma célula com o transmissor sendo a estação radio-base e o receptor sendo o terminal móvel, ou vice-versa. Normalmente dentro de uma célula há diversos obstáculos (casas, prédios, veículos, seres humanos, árvores, postes de luz etc.) com muitas vezes o usuário móvel dentro de lugares fechados (casa, escritório, shopping, estádio de futebol etc.). Vários fatores devem

ser levados em conta (perda por penetração em materiais, reflexão, difração, espalhamento etc.) no equacionamento dos modelos de propagação para esses cenários. Para se projetar uma rede de comunicação *wireless* é interessante considerar um cenário de pior caso, sendo esse a situação UMi NLOS, uma vez que em grande parte dos casos o terminal móvel não se encontra em linha de visada direta com o transmissor.

4.3 Modelos de Propagação em Ambientes UMi LOS

Essa seção apresenta os gráficos que mostram a estimativa de perda de cada modelo em conjunto com dados provenientes de medidas em campo para o cenário UMi LOS provenientes de diferentes referências acadêmicas. O objetivo é realizar uma análise comparativa das estimativas com os resultados de perda dos diversos ambientes.

Nos gráficos são apresentados os valores máximos e mínimos de perdas provenientes de medidas em campo para os ambientes analisados nesse trabalho no cenário UMi LOS. Esses valores máximos e mínimos são representados por asteriscos vermelhos e azuis, respectivamente. A estimativa de perda referente a cada um dos modelos de propagação é representada em asteriscos pretos.

4.3.1 – Modelo NYUSIM UMi LOS

Pela análise do gráfico da Fig. 4.5, é possível de verificar que as estimativas de atenuação provenientes do modelo NYUSIM são maiores do que os dados das medidas de campo para distâncias de até 30 metros entre transmissor e receptor. A partir dessa distância a estimativa de perda calculada por esse modelo passa a estar inserida na faixa entre os ambientes de maior e menor atenuação. As estimativas provenientes do modelo NYUSIM apresentam valores de MAPE compreendidos entre 1,34% e 12,88% para o cenário UMi LOS, de acordo com a Tabela 4.2.

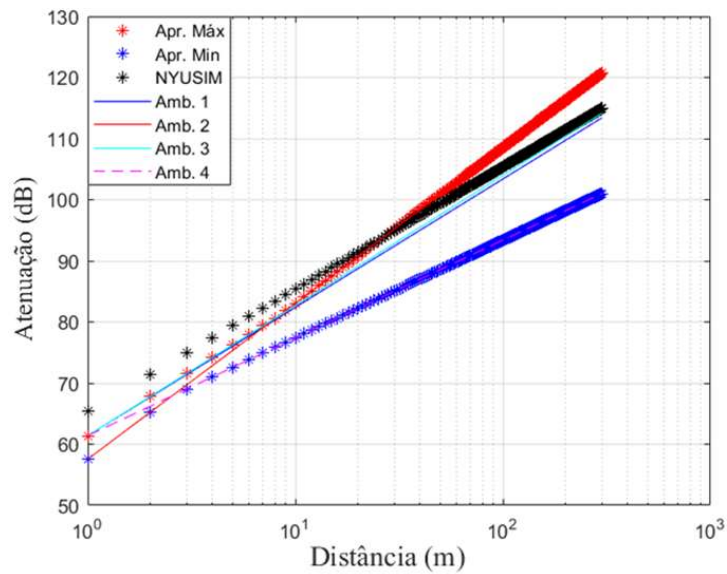


Fig 4.5. Modelo NYUSIM x Dados dos Ambientes no Cenário UMi LOS.

4.3.2 – Modelo mmMAGIC UMi LOS

Pela análise do gráfico da Fig. 4.6, verifica-se que as estimativas de atenuação calculadas pelo modelo mmMAGIC encontram-se na faixa delimitada pelos resultados de medida de maior e menor atenuação para distâncias acima de 10 metros. Para distâncias menores do que 10 metros, as estimativas desse modelo são ligeiramente conservativas, com valores próximos do ambiente de maior atenuação. As estimativas do modelo mmMAGIC apresentam valores de MAPE compreendidos entre 1,97% e 8,61%.

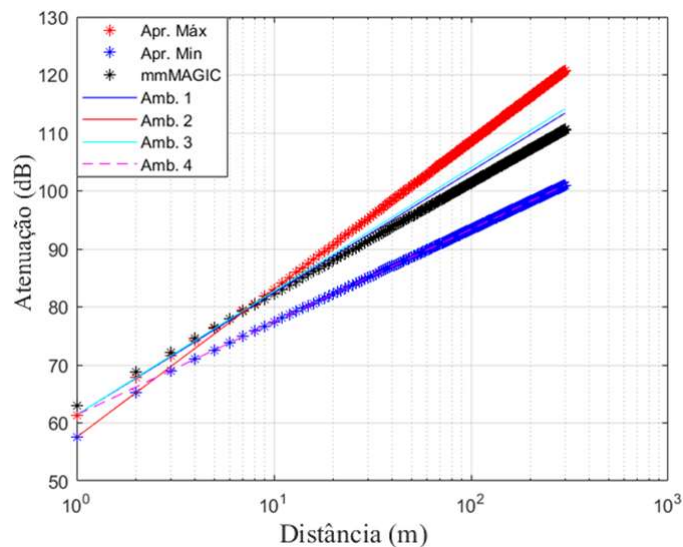


Fig 4.6. Modelo mmMAGIC x Dados dos Ambientes no Cenário UMi LOS.

4.3.3 – Modelo METIS UMi LOS

O gráfico da Fig 4.7 apresenta as estimativas calculadas pelo modelo METIS juntamente com resultados de atenuação derivados de medidas de campo. Esse modelo para cenário UMi LOS apresenta um ponto de *breakpoint*, onde a equação de estimativa de atenuação muda após esse ponto. Isso se deve porque o modelo METIS considera na sua formulação a reflexão do sinal com o solo, modificando a sua equação de estimativa de perda [33-34]. As estimativas de perda do modelo METIS para distâncias maiores que 90 metros apresentam valores superiores de perda em relação ao ambiente que mais atenuou o sinal. As estimativas de perda calculadas utilizando o modelo METIS apresentam valores de MAPE compreendidos entre 4,22% e 19,81% para o cenário UMi LOS.

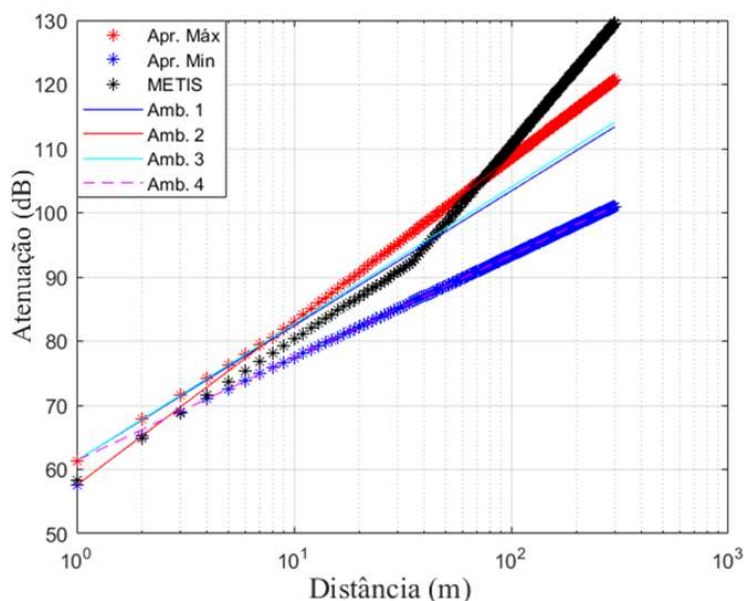


Fig 4.7. Modelo METISx Dados dos Ambientes no Cenário UMi LOS.

4.3.4 – Modelo 5GCM UMi LOS

Pela Fig. 4.8 verifica-se que as estimativas provenientes do modelo 5GCM se encontram dentro da faixa delimitada pelas medidas provenientes dos ambientes de maior e menor atenuação para o cenário UMi LOS, sendo as estimativas de perda desse modelo mais próximas do ambiente que mais atenuou o sinal. As estimativas

de perda calculadas a partir do modelo 5GCM apresentam valores de MAPE compreendidos entre 0,44% e 10,71% para o cenário UMi LOS.

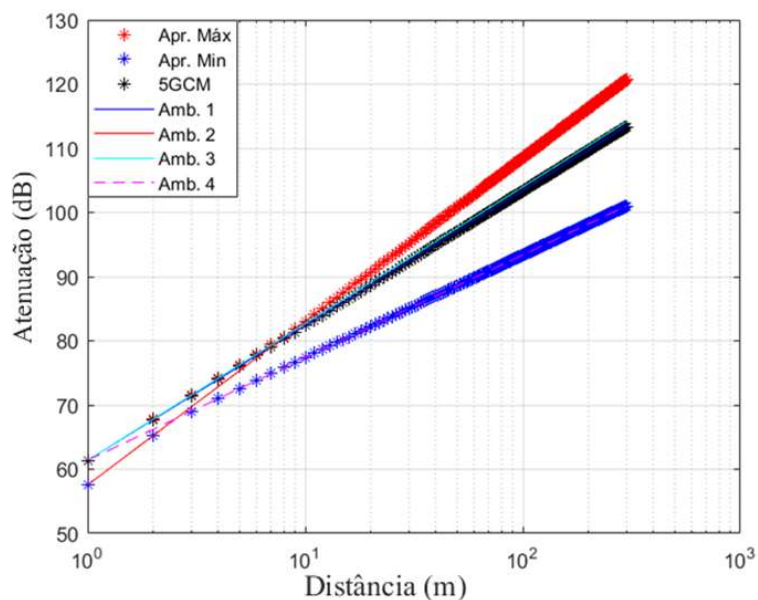


Fig 4.8. Modelo 5GCM x Dados dos Ambientes no Cenário UMi LOS.

4.3.5 – Modelo 3GPP TR 38 901 UMi LOS

A Fig 4.9 apresenta o gráfico onde é possível de verificar que as estimativas provenientes do modelo 3GPP TR 38 901 encontram-se dentro da faixa delimitada pelas medidas provenientes dos ambientes de maior e menor atenuação, sendo mais próximos dos ambientes que mais atenuam o sinal. Para cenário UMi LOS, o modelo 3GPP TR 38 901 apresenta equação de estimativa de perda idêntica ao modelo 5GCM, com erros MAPE compreendidos entre 0,44% e 10,71%.

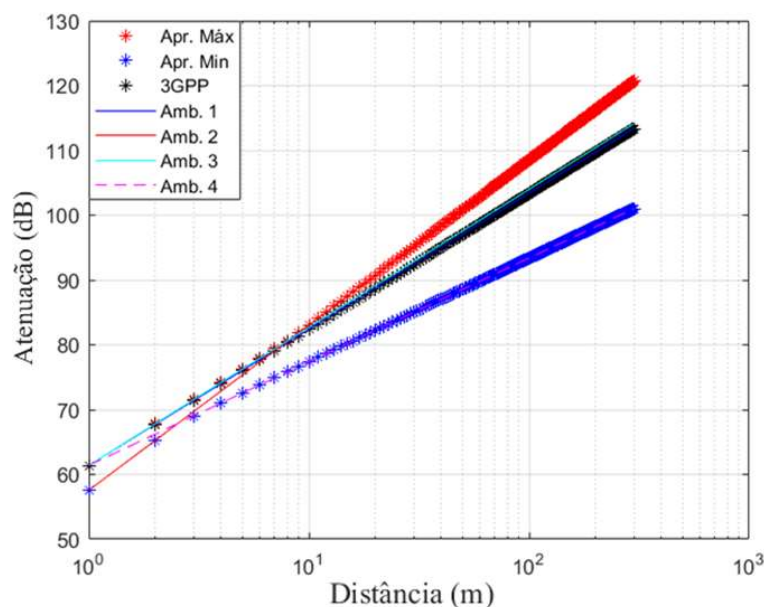


Fig 4.9. Modelo 3GPP TR 38 901 x Dados dos Ambientes no Cenário UMi LOS.

4.3.6 – Modelo *Free Space* UMi LOS

As estimativas de perdas provenientes do modelo Espaço Livre (*Free Space*) encontram-se dentro da faixa delimitada pelas medidas provenientes dos ambientes de maior e menor atenuação, conforme mostra a Fig 4.10. O modelo *Free Space* representa propagação em ambientes abertos não considerando reflexões, presença de partículas atmosféricas e efeitos de sazonalidade. O cenário UMi LOS é representado por ambientes abertos onde há presença de partículas atmosféricas e reflexões por obstáculos. Nessas condições é esperado que os ambientes apresentem valores de PLE ligeiramente maiores do que 2, que é o valor referente ao espaço livre. As estimativas provenientes do modelo *Free Space* apresentam valores de MAPE compreendidos entre 1,94 % a 8,60% para o cenário UMi LOS considerando os ambientes analisados.

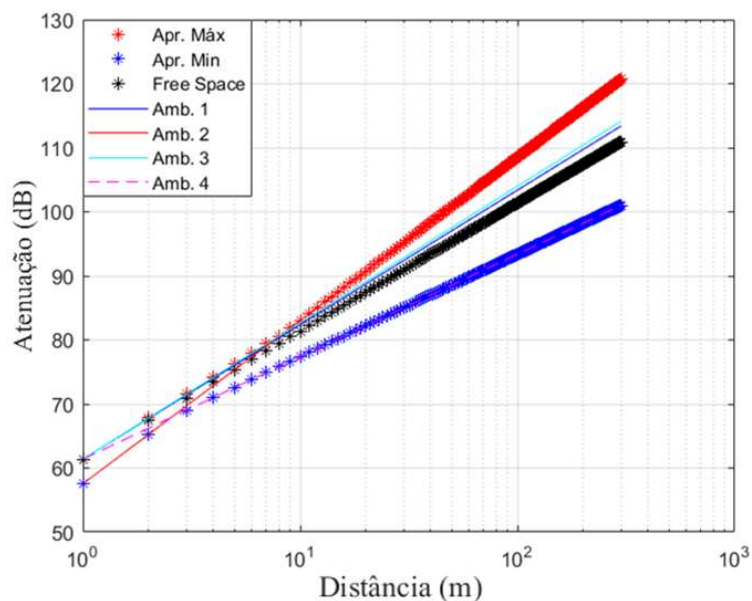


Fig 4.10. Modelo Free Space x Dados dos Ambientes no Cenário UMi LOS.

4.3.7 – Modelo ABG UMi LOS

As estimativas de perda calculada a partir do modelo ABG são mais conservativas para distâncias menores do que 50 metros em relaao a medida de maior atenuaao proveniente das referências analisadas nesse trabalho, conforme mostrado na Fig 4.11. Para cenário UMi LOS, as estimativas de perda calculadas pelo modelo ABG apresentaram erro MAPE na faixa de 3,32% a 10,72%.

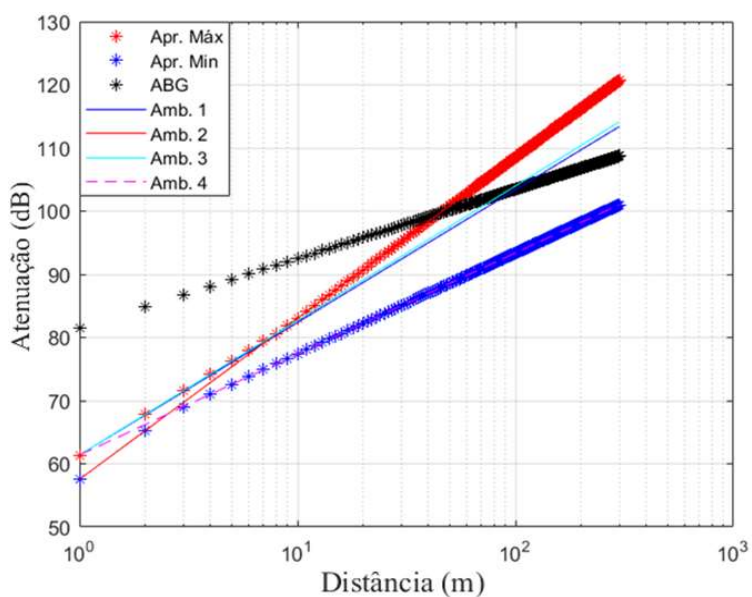


Fig 4.11. Modelo ABG x Dados dos Ambientes no Cenário UMi LOS.

4.3.8 – Modelo CI UMi LOS

A Fig 4.12 apresenta o gráfico da perda calculada pelo modelo CI em conjunto com dados de perdas referente a medidas de campo. O modelo CI é ligeiramente conservativo para pequenas distâncias e após uma distância de aproximadamente 80 metros ele passa a ter estimativas de perda compreendidas entre o ambiente que mais atenuou e o que menos atenuou o sinal. Para o cenário UMi LOS as estimativas de perda calculadas pelo modelo CI apresentou erro MAPE na faixa de 1,71% a 15,46%.

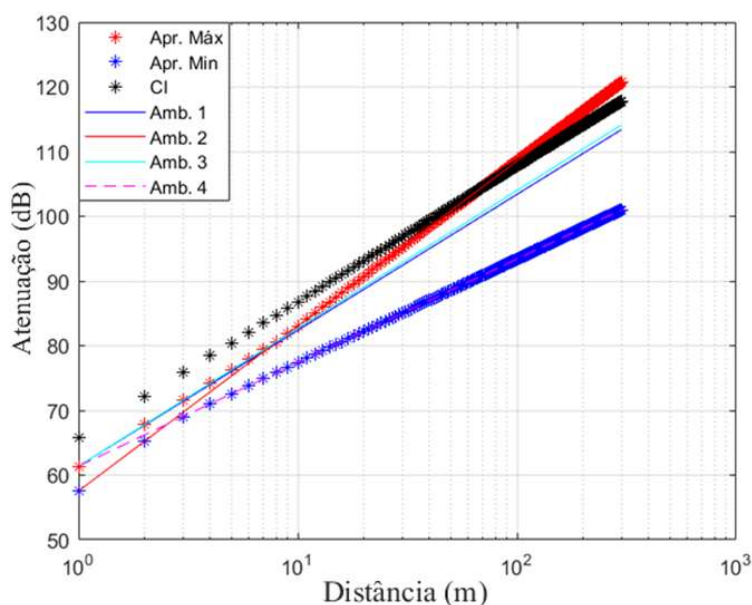


Fig 4.12. Modelo CI x Dados dos Ambientes no Cenário UMi LOS.

4.4 – Análise das Incertezas no Cenário UMi LOS

Essa seção apresenta a análise comparativa de cada modelo de propagação utilizado neste trabalho para os cenários UMi LOS. Na Tabela 3.7 estão sumarizados os erros MAPE dos modelos estudados para cada ambiente analisado no cenário indoor LOS. Também são apresentados o cálculo da atenuação para cada ambiente e a incerteza relativa percentual considerando uma dispersão das medidas sendo gaussiana em um intervalo de incerteza 2σ para o mesmo cenário.

Modelos	Ambiente 1	Ambiente 2	Ambiente 3	Ambiente 4
NYUSIM	1,93%	3,41%	1,34%	12,88%
mmMAGIC	1,97%	6,72%	2,53%	8,61%
METIS	8,64%	4,22%	8,13%	19,81%
5GCM	0,04%	4,88%	0,62%	10,71%
3GPP TR 38,901	0,04%	4,88%	0,62%	10,71%
Free Space	1,94%	6,67%	2,51%	8,60%
ABG	3,32%	6,87%	3,58%	10,72%
CI	4,25%	1,71%	3,65%	15,46%
Atenuação em 100 metros (dB)	103,38	108,54	103,98	93,38
Incerteza 2 sigma (dB)	7,2	17,32	NA	2,4
Incerteza relativa percentual	6,96%	15,96%	NA	2,57%

Tabela 4.5. Incerteza relativa em cada ambiente para o cenário UMi LOS.

Comparando o erro MAPE das estimativas de atenuação dos modelos estudados com os valores das incertezas relativas percentuais e aplicando o critério qualitativo definido na subseção 3.2.2, considerando uma distância de 100 metros como referência para o cenário UMi LOS, podemos afirmar:

- Os ambientes 1 e 2 apresentaram boas estimativas para os modelos de propagação analisados segundo o critério qualitativo já definido na subseção 3.2.2, com exceção do modelo METIS para o ambiente 1 apresentando um erro MAPE maior do que a incerteza relativa percentual para esse ambiente.
- O ambiente 4 foi o ambiente que representou a pior estimativa dos modelos de propagação em relação aos outros ambientes considerados nesse trabalho.
- No ambiente 3 não foi informado o valor da incerteza relacionada a suas medidas.

4.5 Modelos de Propagação em Ambientes UMi NLOS

Nessa seção serão apresentados os gráficos que mostram as estimativas de cada um dos modelos de propagação considerados neste trabalho com os resultados de perda derivados de medidas em campo para o cenário UMi NLOS. O objetivo foi o mesmo da seção 4.3, ou seja, realizar uma análise comparativa das estimativas calculadas a partir dos modelos com os resultados de perda provenientes de medidas em campo. Nos gráficos também são destacados os ambientes que obtiveram valores de atenuações máxima e mínima, representadas da mesma forma que nos ambientes UMi LOS, com asteriscos vermelhos e azuis, respectivamente. As estimativas de perda referente a cada um dos modelos de propagação são representadas por asteriscos pretos.

4.5.1 – Modelo NYUSIM UMi NLOS

A Fig. 4.13 mostra que as estimativas provenientes do modelo NYUSIM para pequenas distâncias se aproximam mais dos resultados de perda dos ambientes de maior atenuação e para maiores distâncias se aproximam mais dos de menor atenuação. Para distâncias menores do que 1 metro esse modelo é ligeiramente conservativo, com estimativas de perda calculadas sendo maiores em relação as perdas do ambiente de maior atenuação. As estimativas de atenuação provenientes do modelo NYUSIM apresentam valores de MAPE compreendidos entre 0,85% e 28,42% para o cenário UMi NLOS, considerando esses ambientes analisados no trabalho.

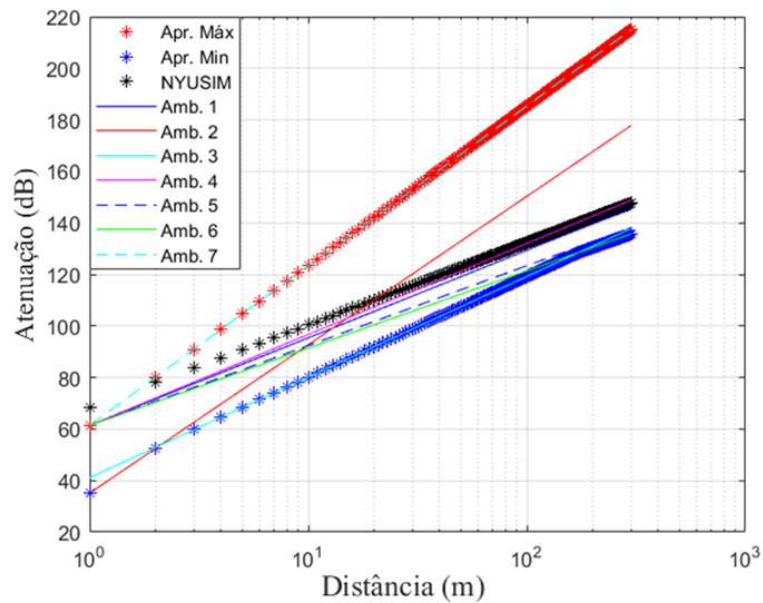


Fig 4.13. Modelo NYUSIM x Curvas dos Ambientes no Cenários UMi NLOS.

4.5.2 – Modelo METIS UMi NLOS

A Fig. 4.14 mostra que as estimativas de perda provenientes do modelo METIS para o cenário UMi NLOS encontram-se dentro da faixa delimitada pelas medidas provenientes dos ambientes de maior e menor atenuação. Porém, assim como o modelo NYUSIM, para pequenas distâncias essas estimativas calculadas pelo modelo METIS se aproximam mais dos resultados de perda provenientes do ambiente de maior atenuação. A partir da distância de 10 metros as estimativas de perda derivadas do modelo METIS se aproximam das medidas dos ambientes de menor atenuação. O modelo METIS apresenta estimativas com valores de MAPE compreendidos entre 1,66% e 27,43% para o cenário UMI NLOS.

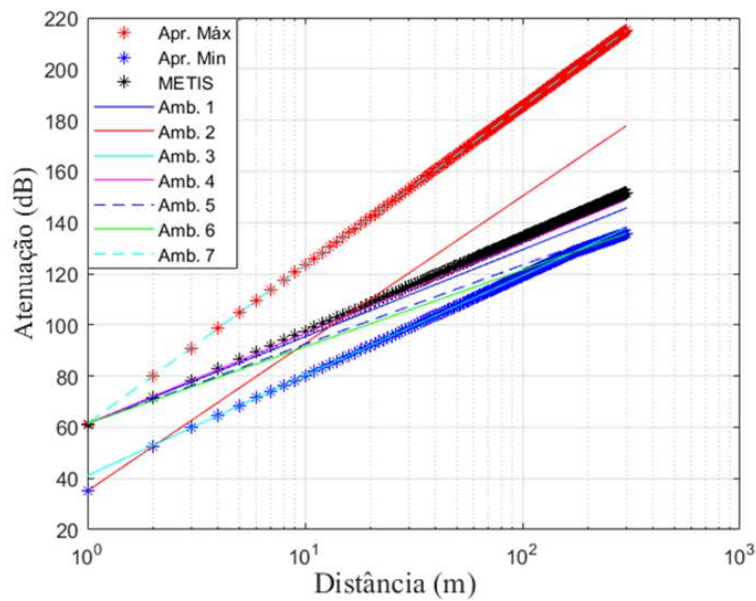


Fig 4.14. Modelo METIS x Curvas dos Ambientes no Cenários UMi NLOS.

4.5.3 – Modelo mmMAGIC UMi NLOS

A Fig. 4.15 nos mostra que o modelo mmMAGIC possui estimativas de perda para o cenário UMi NLOS dentro da faixa dos ambientes de maior e menor atenuação. Assim como no caso dos modelos anteriores, o modelo mmMAGIC para pequenas distâncias possui estimativas de perdas mais próximas dos resultados de perda dos ambientes de maior atenuação. A partir de 10 metros as estimativas desse modelo são próximas aos valores intermediários em relação as medidas de maior e menor atenuação. O modelo mmMAGIC apresentam estimativas com valores de MAPE compreendidos entre 0,85% e 28,42% para o cenário UMi NLOS.

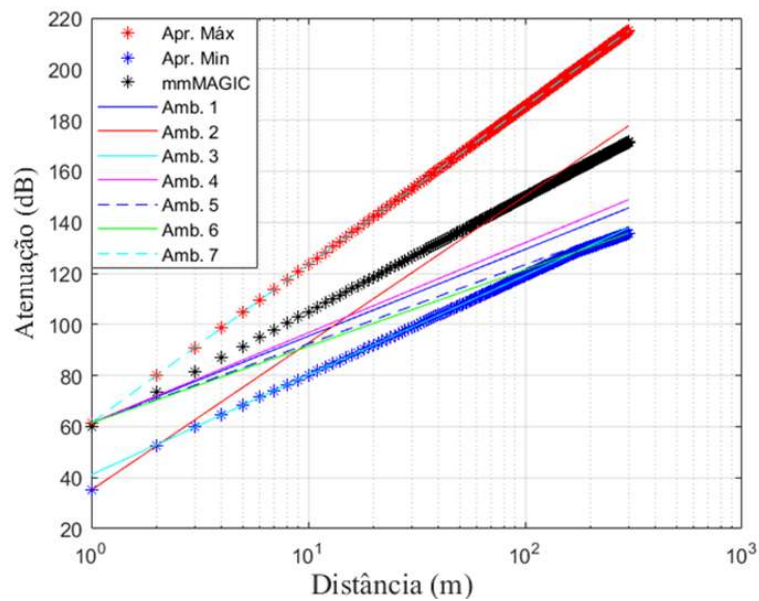


Fig 4.15. Modelo mmMAGICx Curvas dos Ambientes no Cenários UMi NLOS.

4.5.4 – Modelo 3GPP TR 38 901 UMi NLOS

A Fig 4.16 mostra que o modelo 3GPP TR 38 901 possui estimativas de perda para o cenário UMi NLOS dentro da faixa dos ambientes de maior e menor atenuação. A partir de uma distância de aproximadamente 3 metros as estimativas de perda do modelo 3GPP passam a se aproximar das medidas de perda do ambiente de menor atenuação. As estimativas de atenuação calculadas a partir do modelo 3GPP TR 38 901 apresentam valores de MAPE compreendidos entre 1,51% e 32,84% para o cenário UMi NLOS.

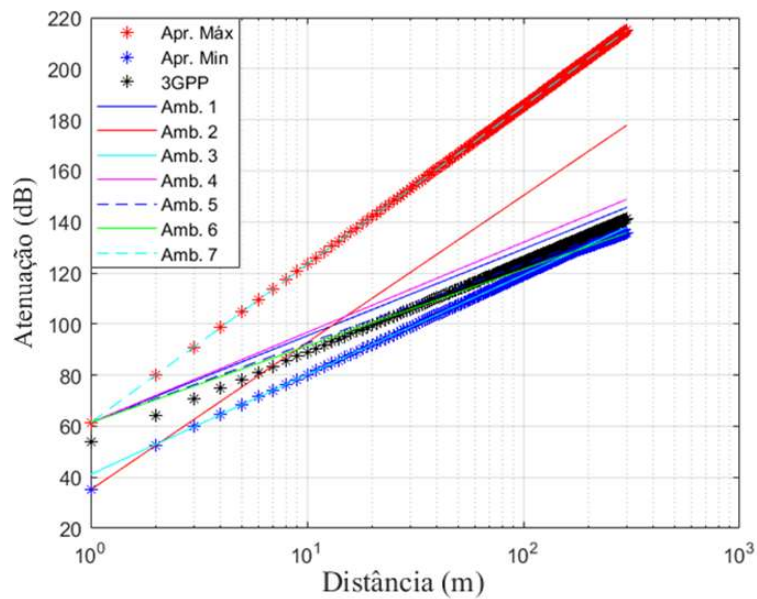


Fig 4.16. Modelo 3GPP TR 38 901x Curvas dos Ambientes no Cenários UMi NLOS.

4.5.5 – Modelo ABG UMi NLOS

Pela Fig. 4.17, o modelo ABG possui estimativas de perda acima dos resultados de atenuação do ambiente que mais atenuou o sinal para uma distância de até 3 metros. Acima de 3 metros, as estimativas desse modelo passam a adentrar a faixa entre as medidas dos ambientes de maior e menor atenuação, se aproximando das medidas de menor atenuação para distâncias acima de 50 metros. Esse modelo apresentou estimativas com valores de MAPE compreendidos entre 1,89% e 28,00% para o cenário UMi NLOS.

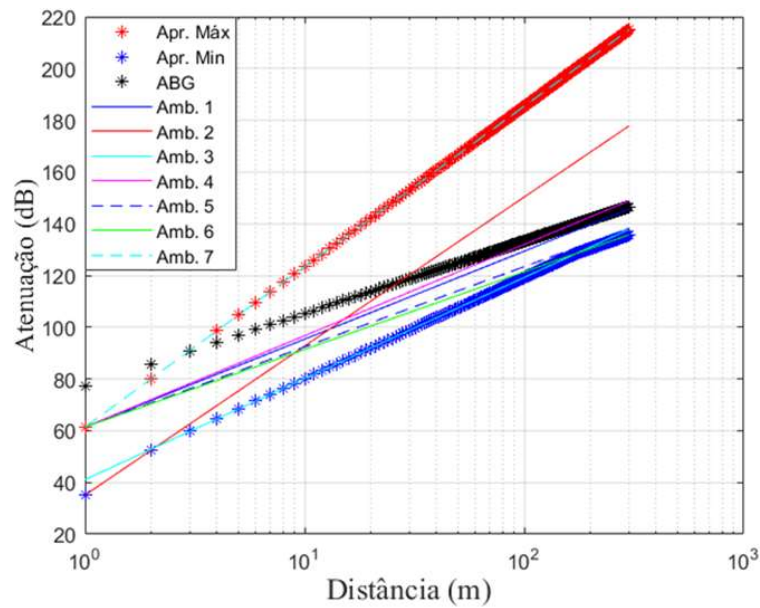


Fig 4.17. Modelo ABG x Curvas dos Ambientes no Cenários UMi NLOS.

4.5.6 – Modelo 5GCM UMi NLOS

A Fig 4.18 mostra que o modelo 5GCM possui estimativas de perda para o cenário UMi NLOS dentro da faixa dos ambientes de maior e menor atenuação. Entre todos os modelos de propagação considerados neste trabalho, o modelo 5GCM foi o que obteve valores de estimativas de perdas calculadas mais próximas das medidas do ambiente de menor atenuação. O modelo 5GCM possui estimativas de perda bem próximas das calculadas pelo modelo 3GPP TR 38 901, conforme os valores de MAPE calculados para cada ambiente conforme mostra Tabela 4.6. As estimativas de atenuação calculadas a partir do modelo 5GCM apresentam valores de MAPE compreendidos entre 1,10% e 32,51% para o cenário UMi NLOS.

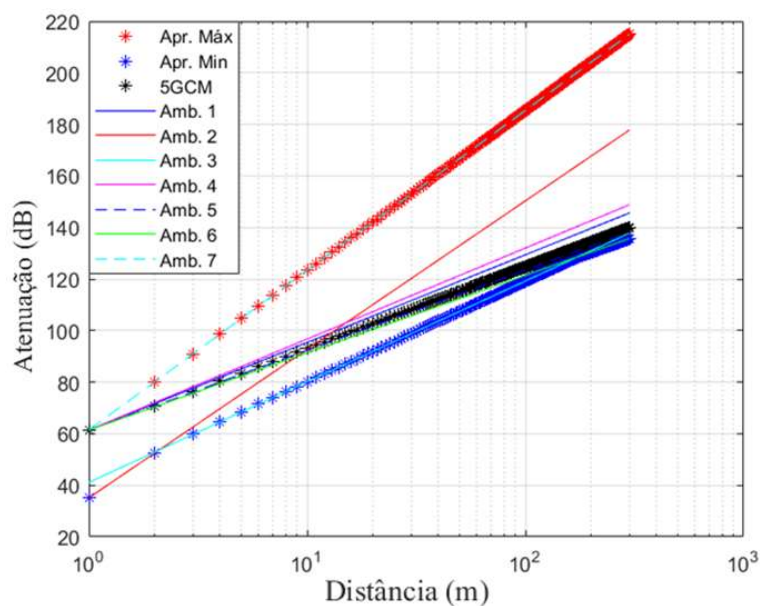


Fig 4.18. Modelo 5GCM x Curvas dos Ambientes no Cenários UMi NLOS.

4.5.7 – Modelo CI UMi NLOS

A Fig. 4.19 mostra que as estimativas provenientes do modelo CI para distâncias abaixo de 2 metros são ligeiramente superiores aos valores de perdas medidos provenientes do ambiente de maior atenuação. Para distâncias acima de 2 metros, as estimativas desse modelo passam a adentrar a faixa entre as medidas dos ambientes de maior e menor atenuação. Como os demais modelos de propagação analisados, o modelo CI apresenta estimativas de perda mais próximas do ambiente de menor atenuação para grandes distâncias. As estimativas de atenuação provenientes do modelo CI apresentam valores de MAPE de 1,71% a 27,89% para o cenário UMi NLOS para os ambientes analisados nesse trabalho.

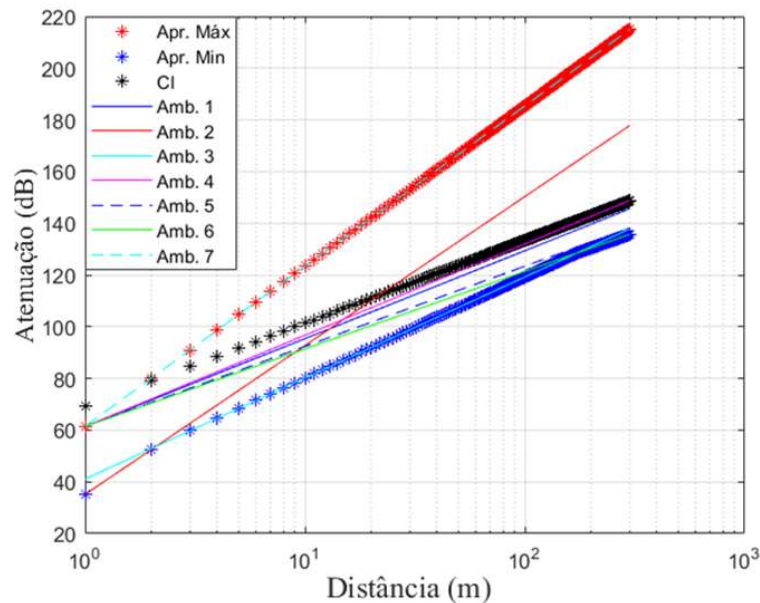


Fig 4.19. Modelo CI x Curvas dos Ambientes no Cenários UMi NLOS.

4.6 – Análise das Incertezas no Cenário UMi NLOS

Essa seção apresenta a análise comparativa feita para o cenário UMi NLOS. Na Tabela 3.6 são apresentados os valores dos erros MAPE de cada modelo estudado para cada ambiente analisado no cenário UMi NLOS. Também são apresentados o cálculo da atenuação para cada ambiente e a incerteza relativa percentual considerando uma dispersão das medidas sendo gaussiana em um intervalo de incerteza 2σ considerando uma distância de 100 metros como referência para o mesmo cenário.

Comparando o erro MAPE referente as estimativas dos modelos de propagação considerados nesse trabalho com os valores das incertezas relativas percentuais e aplicando o mesmo critério qualitativo definido na subseção 3.2.2, podemos afirmar:

- Todos os modelos de propagação analisados apresentaram boas estimativas de perda para os ambientes 1, 4 e 5, considerando o critério definido na subseção 3.2.2.
- Todos os modelos de propagação apresentaram piores estimativas para o ambiente 7.

- Apenas os modelos 5GCM e 3GPP TR 38 901 apresentaram boas estimativas para o ambiente 6.

Modelos	Ambiente 1	Ambiente 2	Ambiente 3	Ambiente 4	Ambiente 5	Ambiente 6	Ambiente 7
NYUSIM	2,34%	13,24%	11,37%	0,85%	7,30%	9,07%	28,42%
METIS	3,70%	11,61%	12,76%	1,66%	8,73%	10,53%	27,43%
mmMAGIC	2,34%	13,24%	11,37%	0,85%	7,30%	9,07%	28,42%
3GPP TR 38,901	3,97%	17,49%	4,40%	5,86%	1,51%	2,85%	32,84%
ABG	3,06%	13,46%	12,24%	1,89%	8,05%	9,82%	28,00%
5GCM	3,58%	17,52%	4,90%	5,47%	1,10%	2,76%	32,51%
CI	4,25%	1,71%	3,65%	4,25%	4,25%	15,46%	27,89%
Atenuação em 100 metros (dB)	129,38	150,30	119,22	131,98	123,38	121,38	185,38
Incerteza 2 sigma (dB)	19,4	18,04	NA	13,38	22,4	7,6	11,8
Incerteza Relativa Percentual	14,99%	12,00%	NA	10,14%	18,15%	6,26%	6,37%

Tabela 4.6. Incertezas relativas para cada modelo em cenário UMi NLOS

4.7 Resumo Geral dos Resultados Obtidos

A Tabela 4.20 apresenta um resumo dos erros MAPEs médios de cada modelo de propagação utilizados no trabalho em cada cenário de propagação analisados no decorrer da dissertação. É possível de se analisar as estimativas do erro MAPE médio para cada um dos modelos de propagação ao se considerar os cenários de medidas, tanto *indoor* quanto *outdoor* UMi, nas situações de LOS e NLOS.

Modelos de Propagação	Cenário Indoor LOS	Cenário Indoor NLOS	Cenário UMi LOS	Cenário UMi NLOS
ABG	7,09%	12,38%	6,12%	10,93%
CI	5,75%	12,33%	6,27%	8,78%
mmMAGIC	7,04%	11,98%	4,96%	10,37%
3GPP TR 38 901	6,73%	11,63%	4,06%	9,85%
5GCM	6,73%	12,84%	4,06%	9,69%
NYUSIM	NA	NA	4,89%	10,37%
METIS	NA	NA	10,20%	10,92%
Free Space	9,46%	NA	4,93%	NA

Tabela 4.7 Tabela resumo com os valores dos MAPEs de cada modelo nos diferentes cenários analisados.

Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

O trabalho de análise de propagação em ondas milimétricas envolvendo comparação de modelos de propagação existentes na literatura com resultados de medidas em campo, derivados de outros trabalhos, é importante para analisarmos a performance e confiabilidade de um modelo específico dentro de um determinado cenário de propagação. Os modelos de propagação são baseados em um modelamento da estimativa de perda de um canal validados por uma grande quantidade de medidas em campo, levando em conta os fatores responsáveis pela dispersão do sinal que se propaga em um determinado meio. Assim como todos os modelos existentes na literatura, os modelos de propagação apresentam um certo nível de incerteza que pode ser avaliada utilizando determinadas métricas de comparação (erro quadrático médio, raiz do erro quadrático médio, erro percentual absoluto médio etc.). Essas incertezas vêm do fato desses modelos serem uma representação simplificada de fenômenos complexos da natureza.

A comparação dos diversos modelos de propagação em diferentes cenários com dados provenientes de medidas de campo, mostram que os modelos apresentam boas estimativas de uma forma geral. Esse trabalho realiza uma análise do erro percentual absoluto médio (MAPE) das estimativas desses modelos de propagação em diversos ambientes de um mesmo cenário em relação a dados provenientes das medidas de campo. A métrica escolhida para a comparação foi o MAPE pois essa já leva em conta a escala das medidas utilizadas e expressa o erro em porcentagem. Quanto mais preciso for um modelo melhor será a sua estimativa comparado a valores medidos, conseqüentemente, menor será o seu MAPE.

Outra análise adotada neste trabalho foi a incerteza relativa percentual que determina o grau de incerteza das medidas de campo provenientes de diferentes referências acadêmicas. Esse valor de incerteza quando comparado com o MAPE proveniente das estimativas de cada modelo de propagação indica se o modelo possui

boas estimativas de perda ou não para um determinado ambiente. Valores de MAPE menores do que a incerteza relativa indica boa estimativa do modelo.

Devido ao fato de as características pertencentes aos ambientes possuírem um comportamento aleatório (umidade do ar, material dos obstáculos, chuvas, ventos etc) faz com que não seja possível analisar de maneira exata qual modelo irá melhor estimar a perda do canal em um ambiente em específico. Para isso, foi realizado uma análise do MAPE médio de cada modelo de propagação. Além disso, foi realizada comparação qualitativa dos resultados do MAPE de cada modelo em cada ambiente com os resultados da incerteza relativa percentual obtidos de cada ambiente analisado para cada um dos cenários, *indoor* (LOS e NLOS) e UMi (LOS e NLOS). Para o cenário *Indoor* foi considerada uma distância padronizada de 10 metros para o cálculo da incerteza relativa das medidas de cada ambiente e para o cenário UMi foi considerada a distância de 100 metros.

Analisando o cenário *Indoor* LOS, conforme tabela 4.7, verifica-se que o modelo CI possuiu um menor valor de MAPE em média, em relação aos demais modelos. Para esse cenário foi analisado ambientes de escritório com diferentes posições do receptor em relação ao transmissor. Por se tratar de um cenário em que os ambientes são fechados (com piso, teto e paredes) haverá uma quantidade maior de reflexões construtivas, contribuindo para a diminuição da perda por dispersão, o que resulta na diminuição do valor do parâmetro PLE para valores ligeiramente inferiores a 2, que é o valor característico da propagação no espaço livre. Por esse motivo, o modelo *Free Space* possui uma pior estimativa em relação aos demais por considerar um meio de propagação sem qualquer tipo de reflexões entre transmissor e receptor.

Para o cenário *Indoor* NLOS, o modelo 3GPP TR 38.901 possui um menor MAPE médio em relação aos demais modelo. Esse modelo leva em conta os parâmetros responsáveis pela dispersão do sinal, além disso ele considera a distância 3D entre o transmissor e receptor na sua formulação. A diferença do MAPE médio de todos os modelos para esse cenário foi pequena, entre 11,63% e 12,84%. Isso indica que a utilização dos outros modelos de propagação analisados poderá levar também a bons resultados estimados.

Para os casos de cenário UMi, as equações dos modelos, com exceção do modelo *Free Space*, consideraram parâmetros relacionados aos fatores atmosféricos. Esses parâmetros contribuem para o aumento da atenuação e da dispersão do sinal dentro de um determinado enlace. O modelo 5GCM apresentou um MAPE médio menor em cenários UMi LOS. Esse modelo considera duas possíveis situações de cenários *outdoor* (*open square* e *street canyon*). No primeiro caso, considera-se uma situação sem obstáculos ao redor do link de comunicação enquanto no segundo caso é considerado a presença de obstáculos ao redor do canal entre transmissor e receptor. Já para cenários UMi NLOS, o modelo CI apresentou um menor MAPE médio.

As características dos ambientes NLOS, com obstáculos que bloqueiam a linha de visada, são responsáveis por acentuar fenômenos como a reflexão, a difração e o espalhamento. Isso causa um aumento do nível de atenuação. Para esses ambientes, o valor do erro percentual MAPE dos modelos foi maior em relação aos ambientes de situação LOS, pois não há linha de visada direta entre o transmissor e o receptor, tornando as estimativas mais imprecisas.

Os modelos de propagação são importantes no projeto de um sistema de comunicação ponto a ponto em um meio *wireless*, principalmente quando não se há dados de medidas disponíveis. As estimativas de perda desses modelos necessitam ser previamente validadas. Isso é feito pela comparação das estimativas com o resultado de medidas provenientes de campo nas mais diversas condições. Com isso, o intuito do trabalho foi justamente analisar o nível de aderência dos modelos de propagação considerados no trabalho com resultados de medidas de campo provenientes de trabalhos de diferentes referências acadêmicas.

5.2 Trabalhos Futuros

Como um possível tema para um trabalho futuro, sugere-se realizar essa mesma análise para outras frequências na faixa de ondas milimétricas, como também para as frequências na faixa de sub-THz. Em particular, a faixa de sub-THz será utilizada nas futuras redes móveis de sexta geração (6G) no espectro de 100 GHz a 300 GHz [57]. O desenvolvimento de novos modelos de propagação para faixa de THz e sub-THz juntamente com a comparação de performance e confiabilidade

desses modelos nos cenários de propagação existentes, conforme apresentado nesse trabalho, será necessário para o desenvolvimento das futuras redes 6G.

Sugere-se também a utilização de técnicas inteligência artificial/ *machine learning* para a análise de erros e confiabilidade de novos modelos de propagação. Em particular, o método da classificação proveniente de técnicas de *machine learning* permite organizar os resultados de medidas em grupos. Cada grupo é determinado de acordo com as características das medidas. Isso permite avaliar a performance e confiabilidade de diversos modelos para cada grupo de medida e, eventualmente definir modelos dedicados para grupos de medidas com determinadas características.

Nesse trabalho, nota-se um aumento significativo das perdas para os cenários NLOS em comparação com os cenários LOS. Assim, propõe-se o estudo e desenvolvimento de materiais que contribuam para reduzir o nível de atenuação nesses cenários para as redes móveis de novas gerações.

Apêndice 1

As Figuras A.1 até A.4 apresentam partes dos códigos do MATLAB utilizados para se implementar as funções utilizadas para compararmos o desempenho dos modelos de propagação com resultados de medidas em campo.

```
% Cálculo da Função Erro Percentual MAPE
%
function erro_percentual = erro_MAPE(PL_model,PL_measure,erro)
dim = size(erro);           % Leitura planilha excel com dados importados
imax = dim(1,2);           % Extração dos dados
soma = 0;
for i = 1:imax
    soma = soma + abs((PL_measure(i) - PL_model(i))/PL_measure(i));
end
erro_percentual = soma/imax;
end
```

Figura A.1 Função para calcular o erro MAPE para cada modelo de propagação.

```
%
% Função do desvio padrão
%
function [desvio_padrao,media] = standard_deviation(erro)
dim = size(erro);           % Leitura planilha excel com dados importados
imax = dim(1,2);           % Extração dos dados
sum = 0;
for i = 1:imax
    sum = sum + erro(i);     % Soma dos erros para cada modelo
end
media = sum/imax;           % Cálculo da média do erro
s = 0;
for i = 1:imax
    s = s + (erro(i)-media)^2;
end
desvio_padrao = sqrt(s/imax); % Cálculo do desvio padrão
end
```

Figura A.2 Função para o cálculo do desvio padrão referente ao comportamento dos modelos de propagação.

```

function [CI_FSPL_R,CI_PLoss_R] = CI_Rap(f,d,d0,hbs,hmt,c,n)
%
% Calculo do FSPL - Free Space Path Loss
%
CI_FSPL_R = 20*log10(4*pi*f*d0*10^9/c);
%
% Variáveis de entradas para UMi LOS do CI prediction model
%
sigmaCI = 0; % desvio padrão Gaussiano para frequência de 28GHz
%
% Calculando o Path Loss
%
hbs1 = 0;
hmt1 = 0;
CI_PLoss_R = CI_FSPL_R+10*n*log10(sqrt(d.^2+(hbs1-hmt1)^2)/d0)+sigmaCI;
end

```

Figura A.3 Função que gera analiticamento as curvas aproximadas referentes a outros artigo..

```

% Determinando as curvas aproximadas máximas e mínimas de análises de
% medidas em campo
%
dim = size(d);
imax = dim(1,2);
%
for i = 1:imax
    y_A(i,1) = y_A1(i);
    y_A(i,2) = y_A2(i);
    y_A(i,3) = y_A3(i);
    y_A(i,4) = y_A4(i);
    y_A(i,5) = y_A5(i);
    y_A(i,6) = y_A6(i);
    y_A(i,7) = y_A7(i);
    y_A(i,8) = y_A8(i);
    y_A(i,9) = y_A9(i);
    y_A(i,10) = y_A10(i);
end
y_B = transpose(y_A);
y_max = max(y_B);
y_min = min(y_B);

```

Figura A.4 Determinação das curvas aproximadas máximas e mínimas para os resultados de medidas em campo referente a outras revisões bibliográficas.


```

function [CI_FSPL_R,CI_PLoss_R] = CI_Rap(f,d,d0,hbs,hmt,c,n)
%
% Calculo do FSPL - Free Space Path Loss
%FSPL = 20*log10(4*pi*f*5*10^9/c);
CI_FSPL_R = 20*log10(4*pi*f*d0*10^9/c);
%
% Variáveis de entradas para UMi LOS do CI prediction model
%
%n = 2.1;          % Path Loss Exponent para frequência de 28GHz
sigmaCI = 0;      % desvio padrão Gaussiano para frequência de 28GHz
%
% Calculando o Path Loss
hbs1 = 0;
hmt1 = 0;
CI_PLoss_R = CI_FSPL_R+10*n*log10(sqrt(d.^2+(hbs1-hmt1)^2)/d0)+sigmaCI;
end

```

Figura A.5 Função para o cálculo da atenuação do modelo de propagação CI

```

function PL_ABG = PLoss_ABG_Model(f,d,hbs,hmt)
alpha = 1.6;
beta = 32.9;
gamma = 1.8;
PL_ABG = 10*alpha*log10(sqrt(d.^2+(hbs-hmt)^2))+beta+10*gamma*log10(f)+4.5;
end

```

Figura A.6 Função para o cálculo da atenuação do modelo de propagação ABG

```

function PLoss_3GPP = PLoss_3GPP_Model(f,d,hbs,hmt,c)
PLoss_3GPP = 32.4+17.3*log10(sqrt(d.^2+(hbs-hmt).^2))+20*log10(f);
end

```

Figura A.7 Função para o cálculo da atenuação do modelo de propagação 3GPP TR 38.901

```

function PL5GCM = PLoss_5GCM(f,d,hbs,hmt)
PL5GCM = 32.4+17.3*log10(sqrt(d.^2+(hbs-hmt).^2))+20*log10(f);
end

```

Figura A.8 Função para o cálculo da atenuação do modelo de propagação 5GCM

```

function PL_mmMagic = mmMagic_PLoss(f,d,hbs,hmt)
PL_mmMagic = 13.8*log10(sqrt(d.^2+(hbs-hmt)^2))+33.6+20.3*log10(f);
end

```

Figura A.9 Função para o cálculo da atenuação do modelo de propagação mmMAGIC

```

function FS_PL = Free_Space_PLoss(f,d,hbs,hmt)
FS_PL = 32.44+20*log10(f*1000)+20*log10(sqrt(d.^2+(hbs-hmt)^2)/1000);
end

```

Figura A.10 Função para o cálculo da atenuação do modelo de propagação Free Space

```

function [dist_breakpoint,METIS_PLoss] = METIS(f,d,hbs,hmt,lambda)
%
% Constantes
%
n1 = 2.2; % Path Loss Exponent (n1)
n2 = 4.0; % Path Loss Exponent (n2)
%
dist_breakpoint = 0.87*exp(-log10(f)/0.65)*4*(hbs-1)*(hmt-1)/lambda;
%
dim = size(d);
imax = dim(1,2);
%
for i = 1:imax
    dist = d(i);
    if dist < dist_breakpoint
        METIS_PLoss(i) = 10*n1*log10(sqrt(dist^2+(hbs-hmt)^2))+28.0+20*log10(f)-1.38*log10(f)+3.34;
    else
        METIS_PLoss(i) = 10*n2*log10(sqrt(dist^2+(hbs-hmt)^2)/dist_breakpoint)+10*n1*log10(dist_breakpoint)+28.0+20*log10(f)-1.38*log10(f)+3.34;
    end
end
% fim da função
end

```

Figura A.11 Função para o cálculo da atenuação do modelo de propagação METIS

```

function PL_NYUsim = NYUsim(f,d,c,hbs,hmt)
PL_NYUsim = 20*log10(4*pi*f*1*10^9/c)+20*log10(sqrt(d.^2+(hbs-hmt)^2))+4;
end

```

Figura A.12 Função para o cálculo da atenuação do modelo de propagação NYUSIM

Referências Bibliográficas

- [1] CHEN, Shanzhi; ZHAO, Jian. The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication. *IEEE communications magazine*, 2014, 52.5: 36-43
- [2] POPOVSKI, Petar, et al. 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view. *IEEE Access*, 2018, 6: 55765-55779.
- [3] CHEN, Whai-En; FAN, Xiang-Yuan; CHEN, Li-Xian. A CNN-based Packet Classification of eMBB, mMTC and URLLC Applications for 5G. In: *2019 International Conference on Intelligent Computing and its Emerging Applications (ICEA)*. IEEE, 2019. p. 140-145.
- [4] FERREIRA, Alexandre, et al. 5G-RANGE project field trial. In: *2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*. IEEE, 2019. p. 490-494.
- [5] OMRI, Aymen, et al. Synchronization procedure in 5G NR systems. *IEEE Access*, 2019, 7: 41286-41295.
- [6] CAMPOS, Javier. Understanding the 5G NR physical layer. *Keysight Technologies release*, 2017.
- [7] Marengo, G. K., Leite, G. E. S., Junior, A. C. S., & Mendes, L. L. (2020). Propagation models for 5G signals in the 60 GHz band. *Journal of Communication and Information Systems*, 35(1), 357-369.
- [8] HAN, Congzheng; DUAN, Shu. Impact of atmospheric parameters on the propagated signal power of millimeter-wave bands based on real measurement data. *IEEE Access*, 2019, 7: 113626-113641
- [9] Rosa, Larissa de Souza Pereira, et al. "Aplicações do 5G em Internet das Coisas (IoT)." NARANDZIC, Milan, et al. Comparison of SCM, SCME, and WINNER channel models. In: *2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference-VTC2007-Spring*. IEEE, 2007. p. 413-417.
- [10] SCHNEIDER, Christian, et al. Large scale parameter for the WINNER II channel model at 2.53 GHz in urban macro cell. In: *2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2010. p. 1-5.
- [11] Liu, Lingfeng, et al. "The COST 2100 MIMO channel model." *IEEE Wireless Communications* 19.6 (2012): 92-99.
- [12] PETER, Michael; SAKAGUCHI, K. 6–100 GHz channel modelling for 5G: Measurement and modelling plans in mmMAGIC. *White paper W2. 1, the mmMAGIC project*, 2016.

- [13] Docomo, N. 'White paper on 5G channel model for bands up to 100 GHz. Tech. Rep., 2016.[Online]. Available: <http://www.5gworkshops.com/5GCM.html>, 2016.
- [14] SAKAGUCHI, Kei, et al. Where, when, and how mmWave is used in 5G and beyond. *IEICE Transactions on Electronics*, 2017, 100.10: 790-808.
- [15] RAPPAPORT, Theodore S., et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!. *IEEE access*, 2013, 1: 335-349.
- [16] RAPPAPORT, Theodore S., et al. 38 GHz and 60 GHz angle-dependent propagation for cellular & peer-to-peer wireless communications. In: *2012 IEEE international conference on communications (ICC)*. IEEE, 2012. p. 4568-4573.
- [17] MACCARTNEY, George R.; RAPPAPORT, Theodore S. Rural macrocell path loss models for millimeter wave wireless communications. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 2017, 35.7: 1663-1677.
- [18] MACCARTNEY, George R., et al. Indoor office wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models at 28 and 73 GHz for ultra-dense 5G wireless networks. *IEEE access*, 2015, 3: 2388-2424.
- [19] HALBAUER, Hardy, et al. *Architectural aspects of mm-wave radio access integration with 5G ecosystem*. 5G PPP mmMAGIC, 2016.
- [20] VAN DER VALK, Ton; VAN DRIEL, Jan H.; DE VOS, Wobbe. Common characteristics of models in present-day scientific practice. *Research in Science Education*, 2007, 37.4: 469-488.
- [21] BARBIERI, Nicola; BONCHI, Francesco; MANCO, Giuseppe. Topic-aware social influence propagation models. *Knowledge and information systems*, 2013, 37.3: 555-584.
- [22] WEYNA, S. Identification of reflection, diffraction and scattering effects in real acoustic flow fields. *Archives of Acoustics*, 2003, 28.3.
- [23] QINGLING, Zhao; LI, Jin. Rain attenuation in millimeter wave ranges. In: *2006 7th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory*. IEEE, 2006. p. 1-4.
- [24] RIBEIRO, José Antônio Justino. *Propagação das ondas eletromagnéticas: princípios e aplicações*. Érica, 2004.
- [25] SUN, Shu; MACCARTNEY, George R.; RAPPAPORT, Theodore S. Millimeter-wave distance-dependent large-scale propagation measurements and path loss models for outdoor and indoor 5G systems. In: *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2016. p. 1-5.
- [26] SKLAR, Bernard. Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems. I. Characterization. *IEEE Communications magazine*, 1997, 35.7: 90-100.
- [27] PAPAFAEIROPOULOS, Anastasios K.; KOTSOPOULOS, Stavros A. An extended generalized Rice model for wireless communications. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2010, 59.5: 2604-2609.

- [28] SUN, Shu, et al. Investigation of prediction accuracy, sensitivity, and parameter stability of large-scale propagation path loss models for 5G wireless communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65.5: 2843-2860.
- [29] SINGH, Yuvraj. Comparison of okumura, hata and cost-231 models on the basis of path loss and signal strength. *International journal of computer applications*, 2012, 59.11.
- [30] DEME, Abraham, et al. Hata-Okumura Model Computer Analysis for Path Loss Determination at 900MHz for Maiduguri, Nigeria. *Mathematical Theory and Modeling*, 2013, 3.3: 1-9.
- [31] WORGU, Steve; AJUMO, Samuel Godwin; ODU, Njumoke N. Comparative Evaluation of the Pathloss Prediction Performance Hata-Okumura Pathloss Model for Urban, Suburban and Rural Areas. *International Journal of Systems Science and Applied Mathematics*, 2017, 2.1: 42.
- [32] JU, Shihao; RAPPAPORT, Theodore S. Millimeter-wave extended NYUSIM channel model for spatial consistency. In: *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, 2018. p. 1-6.
- [33] JÄMSÄ, Tommi, et al. METIS propagation scenarios. *European Cooperation in Science and Technology Cooperative Radio Communications for Green Smart Environments (COST IC1004)*, 2013.
- [34] NURMELA, Vuokko, et al. Deliverable D1. 4 METIS channel models. In: *Proc. Mobile Wireless Commun. Enablers Inf. Soc.(METIS)*. 2015. p. 1.
- [35] RAPPAPORT, Theodore S., et al. Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks—With a focus on propagation models. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2017, 65.12: 6213-6230.
- [36] HANEDA, Katsuyuki, et al. Radio channel sounding campaigns in EU H2020 mmMAGIC project for 5G channel modeling. In: *2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. IEEE, 2016. p. 596-597.
- [37] ZHU, Qiuming, et al. 3GPP TR 38.901 Channel Model. *Wiley 5G Ref: The Essential 5G Reference Online*, 2019, 1-35.
- [38] NITSCHKE, Thomas, et al. IEEE 802.11 ad: directional 60 GHz communication for multi-Gigabit-per-second Wi-Fi. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52.12: 132-141.
- [39] TAYLOR, John. *Introduction to error analysis, the study of uncertainties in physical measurements*. 1997.
- [40] Cabral, Paulo. "Erros e incertezas nas medições." *sítio da Internet, disponível no endereço <http://www.peb.ufrj.br/cursos/COB783/ErrosIncertezas.pdf>, último acesso em Dezembro/2011* (2004).

- [41] Azank, Felipe. "Como avaliar seu modelo de regressão." sítio da Internet, disponível no endereço <https://medium.com/turing-talks/como-avaliar-seu-modelo-de-regress%C3%A3o-c2c8d73dab96>. pdf, último acesso em Agosto/2020 .
- [42] Hughes, Ifan, and Thomas Hase. *Measurements and their uncertainties: a practical guide to modern error analysis*. OUP Oxford, 2010.
- [43] FAGIANI, Anderson, et al. Caracterização da Perda de Percurso Indoor de Redes 5G em Ondas Milimétricas. Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, SBrT 2017.
- [44] Al-Samman, A. M., Abd Rahman, T., & Azmi, M. H. (2018). Indoor corridor wideband radio propagation measurements and channel models for 5g millimeter wave wireless communications at 19 GHz, 28 GHz, and 38 GHz bands. *Wireless Communications and Mobile Computing, 2018*.
- [45] Tang, P., Zhang, J., Shafi, M., Dmochowski, P. A., & Smith, P. J. (2018, August). Millimeter wave channel measurements and modelling in an indoor hotspot scenario at 28 GHz. In *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)* (pp. 1-5). IEEE.
- [46] Ko, J., Lee, S. U., Kim, Y. S., & Park, D. J. (2016). Measurements and analyses of 28 GHz indoor channel propagation based on a synchronized channel sounder using directional antennas. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 30*(15), 2039-2054.
- [47] Xing, Y., Rappaport, T. S., & Ghosh, A. (2021). Millimeter Wave and sub-THz Indoor Radio Propagation Channel Measurements, Models, and Comparisons in an Office Environment. *arXiv preprint arXiv:2103.00385*.
- [48] Ju, S., Xing, Y., Kanhere, O., & Rappaport, T. S. (2021). Millimeter wave and sub-terahertz spatial statistical channel model for an indoor office building. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 39*(6), 1561-1575.
- [49] Rappaport, Theodore S., et al. *Wireless communications: principles and practice*. New Jersey: prentice hall PTR, 1996.
- [50] Rappaport, Theodore S., et al. *Millimeter Wave Wireless Communications*. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 2014.
- [51] Deng, S., Samimi, M. K., & Rappaport, T. S. (2015, June). 28 GHz and 73 GHz millimeter-wave indoor propagation measurements and path loss models. In *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)* (pp. 1244-1250). IEEE.
- [52] MacCartney, G. R., Rappaport, T. S., Samimi, M. K., & Sun, S. (2015). Millimeter-wave omnidirectional path loss data for small cell 5G channel modeling. *IEEE access, 3*, 1573-1580.

- [53] Zhong, Z., Li, C., Zhao, J., & Zhang, X. (2017, March). Height-dependent path loss model and large-scale characteristics analysis of 28 GHz and 38.6 GHz in urban micro scenarios. In *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)* (pp. 1818-1822). IEEE.
- [54] Park, J. J., Liang, J., Lee, J., Kwon, H. K., Kim, M. D., & Park, B. (2016, September). Millimeter-wave channel model parameters for urban microcellular environment based on 28 and 38 GHz measurements. In *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (pp. 1-5). IEEE.
- [55] Karttunen, A., Molisch, A. F., Hur, S., Park, J., & Zhang, C. J. (2017). Spatially consistent street-by-street path loss model for 28-GHz channels in micro cell urban environments. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(11), 7538-7550.