

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE E MODELAGEM EM LARGA
ESCALA PARA AS FREQUÊNCIAS 8, 9, 10 E
11 GHz EM AMBIENTES INDOOR**

IURY DA SILVA BATALHA

TD 29/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

IURY DA SILVA BATALHA

**ANÁLISE E MODELAGEM EM LARGA
ESCALA PARA AS FREQUÊNCIAS 8, 9, 10 E
11 GHz EM AMBIENTES INDOOR**

TD 29/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

IURY DA SILVA BATALHA

**ANÁLISE E MODELAGEM EM LARGA ESCALA PARA
AS FREQUÊNCIAS 8, 9, 10 E 11 GHz EM AMBIENTES
INDOOR**

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para qualificação do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações.

Orientador: Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante

Coorientador: Fabrício José Brito Barros

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

B328a Batalha, Iury da Silva
Análise e modelagem em larga escala para as
frequências 8, 9, 10 e 11 GHz em ambientes indoors / Iury da
Silva Batalha. — 2019.
84 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos
Cavalcante

Coorientador(a): Prof. Dr. Fabrício José Brito Barros
Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade
Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Modelos em
larga escala. 3. Modelos para frequência única. 4.
Modelos para múltiplas frequências. 5. Quinta geração
de redes móveis. I. Título.

CDD 621.3824

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
**ANÁLISE E MODELAGEM EM LARGA ESCALA PARA
AS FREQUÊNCIAS 8, 9, 10 E 11 GHz EM AMBIENTES
INDOOR**

AUTOR: IURY DA SILVA BATALHA

TESE SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA QUALIFICAÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante
(Orientador - PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Fabrício José Brito Barros
(Coorientador - PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Jasmine Priscyla Leite de Araújo
(Avaliador Interno - PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Bruno Souza Lyra Castro
(Avaliador Externo - UFPA/Castanhal)

Prof. Dr. Adáildo Gomes D'Assunção
(Avaliador Externo - UFRN)

Prof. Dr. José Felipe Souza de Almeida
(Avaliador Externo - UFRA)

VISTO:

Prof. Dr. Maria Emília de Lima Tostes
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida, saúde e sabedoria.

Agradeço à minha família pelo carinho e apoio dispensados durante toda a caminhada referente à minha vida acadêmica dentro da Universidade Federal do Pará.

Agradeço especialmente aos professores Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes, Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante e o Dr. Bruno Lyra Souza Castro, Dr^a. Jasmine Priscyla Leite de Araújo, Dr. Fabrício José Brito Barros pela imensa paciência, orientação, inspiração e pelo conhecimento repassado.

Agradeço a Andréa Lopes pela ajuda e companheirismo durante todo o meu trajeto dentro da universidade federal do Pará.

Agradeço pela amizade e por todas as contribuições dos meus amigos e companheiros de laboratório: Edemir Matos, Thiago Araújo, Nelson Mateus, João Victor, Allan Costa, Wirlan Lima, Hugo Cruz, Leslye Castro, Cris Gomes e Diego Kasuo.

Agradeço aos meus amigos Petterson Marques, Vincent Tadaisky e Tales Gomes pelo convívio durante toda a graduação e a amizade que perdura.

Agradeço a Jéssica Teixeira, Nathalya Barradas e Adriene Chaves pela amizade e momentos ótimos.

Agradeço ao Heytor Corrêa e Suellem Lemos pela amizade que veio da infância e perdura até os dias de hoje.

Agradeço a Universidade Federal do Pará por prestar serviços que me qualificam para o mercado e para a sociedade.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica por dar os melhores profissionais do norte junto a sua estrutura e suporte.

Agradeço Ao CNPq¹ pelo apoio financeiro em forma de bolsa.

¹<http://www.cnpq.br/>

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.
(Albert Einstein)

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Contribuições	4
1.4	Organização da Tese	4
2	Trabalhos Correlatos	5
2.0.1	Considerações iniciais	5
2.0.2	Principais trabalhos voltados para 5G.	5
2.0.3	Os Trabalhos na Faixa de 6 a 73 GHz.	6
2.0.4	Considerações Finais	8
3	Propagação de Ondas Eletromagnéticas	9
3.0.1	Considerações iniciais	9
3.1	Rádio Propagação	9
3.1.1	Modelo de propagação no Espaço Livre em Larga Escala	10
3.1.2	Propagação em Pequena Escala	11
3.1.2.1	Resposta ao impulso	12
3.1.3	Considerações Finais	13
4	Evolução da Arquitetura de Redes Móveis rumo ao 5G	14
4.1	Considerações iniciais	14
4.2	Contextualização	14
4.3	Roteiro da Evolução das Redes Móveis	15
4.4	Limitações do 4G	17
4.5	Características do 5G	18
4.6	Arquitetura da Rede 5G	19
4.6.1	Rede de <i>Core</i>	19
4.6.2	Rede de Acesso	20
4.7	Considerações finais	21
5	Abordagem e Propostas de Modelos <i>Indoor</i>	22
5.1	Considerações iniciais	22
5.2	Modelos em larga escala para frequência única	22
5.2.1	Modelo Close-In (CI) e Close-In X (CIX)	22
5.2.2	Modelo Floating Intercept (FI)	23

5.2.3	Modelo Keenan e Motley	24
5.2.4	Modelo Multi-Wall	24
5.2.5	Modelo da Recomendação ITU-R P.1238-8	25
5.2.6	Modelo de Canal para ambientes <i>indoor</i> definido pelo 3GPP	26
5.2.7	Modelo da Recomendação ITU-R M.2083	26
5.3	Modelos em Larga Escala de Múltipla Frequência	27
5.3.1	Modelo <i>Close-In Frequency</i> (CIF)	27
5.3.2	Modelo Alfa-Beta-Gama (ABG)	27
5.4	Proposta de Modelos de propagação para as frequências de 8, 9, 10 e 11 GHz	28
5.5	Considerações finais	29
6	Metodologia e Cenários	30
6.1	Considerações iniciais	30
6.2	Equipamentos de medições	30
6.3	Cenários e campanhas de medições	31
6.3.1	Corredor	32
6.3.2	Laboratório de informática	33
6.3.3	Campanhas de medições NLoS	34
6.4	Considerações finais	34
7	Análise em Larga escala para Modelos de Perda	35
7.1	Considerações Iniciais	35
7.2	Análise e resultados	35
7.2.1	Análise no corredor	36
7.2.2	Análise no laboratório	46
7.2.3	Análise <i>Single e Multi-frequency</i>	53
7.2.3.1	Análise <i>Singe Frequency</i>	53
7.2.3.2	Análise <i>Multi frequency</i>	56
7.2.4	Perda por parede	59
7.2.5	Comparação entre os dados medidos no corredor (V-V e V-H) e Laboratório (V-V e H-H)	59
7.3	Conclusões	61
	Conclusão	61
	Referências	63

Lista de ilustrações

Figura 1	Desvanecimento em pequena e larga escala.	10
Figura 2	Modelo de resposta ao impulso variante no tempo de um canal.	13
Figura 3	Evolução do crescimento da taxa de dados e número de dispositivos.	15
Figura 4	comparação dos requisitos entre o 4G e 5G.	18
Figura 5	EPC tradicional X EPC CUPS.	20
Figura 6	Arquitetura de medições para sondagem de canal.	30
Figura 7	Ambiente de medição no corredor.	31
Figura 8	Ambiente de medição no laboratório.	32
Figura 9	Esquema de medição no corredor.	33
Figura 10	Esquema de medição no laboratório.	34
Figura 11	Modelo CI, FI e 3GPP utilizando antenas direcionais para 8 GHz.	36
Figura 12	Modelo CI, FI e 3GPP utilizando antenas direcionais para 9 GHz.	37
Figura 13	Modelo CI, FI e 3GPP utilizando antenas direcionais para 10 GHz.	37
Figura 14	Modelo CI, FI e 3GPP utilizando antenas direcionais para 11 GHz.	38
Figura 15	Modelo CIX utilizando antenas direcionais para 8 GHz.	39
Figura 16	Modelo CIX utilizando antenas direcionais para 9 GHz.	39
Figura 17	Modelo CIX utilizando antenas direcionais para 10 GHz.	40
Figura 18	Modelo CIX utilizando antenas direcionais para 11 GHz.	40
Figura 19	Desvio padrão ponto-a-ponto dos dados medidos no corredor para frequências 8, 9, 10 e 11 GHz no corredor para antenas V-V.	41
Figura 20	Desvio padrão ponto-a-ponto dos dados medidos no corredor para frequências 8, 9, 10 e 11 GHz no corredor para antenas V-H.	42
Figura 21	Desvio padrão ponto-a-ponto dos dados medidos no corredor para frequências 8, 9, 10 e 11 GHz no corredor para V-V (dados em vermelho) e V-H (dados em azul).	42
Figura 22	Análise estatística dos dados medidos em V-H na frequência de 8 GHz.	43
Figura 23	Análise estatística dos dados medidos em V-H na frequência de 9 GHz.	44
Figura 24	Análise estatística dos dados medidos em V-H na frequência de 10 GHz.	44
Figura 25	Análise estatística dos dados medidos em V-H na frequência de 11 GHz.	45
Figura 26	Modelo de perda CI e sombreamento para as frequências 8, 9, 10, 11 GHz sobre os dados medidos do corredor utilizando antenas V-V.	46
Figura 27	Modelo CI utilizando antenas direcionais V-V para 8 GHz no lab.	47

Figura 28	Modelo CI utilizando antenas direcionais V-V para 9 GHz no lab. . . .	47
Figura 29	Modelo CI utilizando antenas direcionais V-V para 10 GHz no lab. . .	48
Figura 30	Modelo CI utilizando antenas direcionais V-V para 11 GHz no lab. . .	48
Figura 31	Modelo CI e FI utilizando antenas direcionais H-H para 8 GHz no laboratório.	49
Figura 32	Modelo CI e FI utilizando antenas direcionais H-H para 9 GHz no laboratório	49
Figura 33	Modelo CI e FI utilizando antenas direcionais H-H para 10 GHz no laboratório	50
Figura 34	Modelo CI e FI utilizando antenas direcionais H-H para 11 GHz no laboratório	50
Figura 35	Desvio padrão ponto-a-ponto dos dados medidos no corredor para frequên- cias 8, 9, 10 e 11 GHz no Laboratório para antenas V-V.	51
Figura 36	Desvio padrão ponto-a-ponto dos dados medidos no corredor para frequên- cias 8, 9, 10 e 11 GHz no Laboratório para antenas H-H.	52
Figura 37	Desvio padrão ponto-a-ponto dos dados medidos no corredor para frequên- cias 8, 9, 10 e 11 GHz no Laboratório para V-V (dados em vermelho) e H-H (dados em azul).	52
Figura 38	Modelo de perda CI e sombreamento para as frequências 8, 9, 10, 11 GHz sobre os dados medidos do Laboratório utilizando antenas V-V. .	53
Figura 39	Frequency dependence analysis of the single-frequency FI and CI mod- els for frequencies 8, 9, 10 and 11 GHz. (a) and (d) comparing the $\beta_{FI}/FSPL_{CI}$, Fig. 32 (b) and (e) comparing α_{FI}/PLE_{CI} and Fig. 32 (c) and (f) comparing σ_{FI}/σ_{CI} for the corridor and laboratório respec- tively.	54
Figura 40	PLE Surface plot for frequencies 8 - 11 GHz in the corridor for V-V antennas.	55
Figura 41	PLE Surface plot for frequencies 8 - 11 GHz in the laboratório for V-V antennas.	55
Figura 42	Frequency dependency for the ABG model with the CI for frequencies 8 - 11 GHz in the corridor for V-V antennas.	56
Figura 43	Frequency dependency for the ABG model with the CI for frequencies 8 - 11 GHz in the laboratório for V-V antennas.	57
Figura 44	Frequency dependence for the CIF model with the CI for the frequen- cies 8 - 11 GHz in the corridor for V-V antennas.	57
Figura 45	Frequency dependence for the CIF model with the CI for the frequen- cies 8 - 11 GHz in the laboratório for V-V antennas	58

Lista de tabelas

Tabela 1	Especificações de diferentes gerações de sistemas celulares.	17
Tabela 2	Perda de penetração por obstáculo (dB)	24
Tabela 3	Valores para o N	25
Tabela 4	Valores para L_f	25
Tabela 5	Setup da campanha de medições para 8, 9, 10 E 11 GHZ	31
Tabela 6	Parâmetros dos modelos de perda <i>single</i> e <i>multi</i> frequência	36
Tabela 7	Valores de perda de propagação por obstáculos	59

Lista de abreviaturas e siglas

3GPP Parceria Público Privada de 3ª Geração - 3rd Generation Partnership Project

ABG Alfa-Beta-Gama

AMPS Advanced Mobile Phone Service

BBU Baseband Unit

C-RAN Cloud RAN

CDMA Code Division Multiple Access

CI Close-in Reference distance

CIF Close-in Frequency

CUPS Control and User Plane Separation

D2D Dispositive-to-Dispositive

EDGE Enhanced Data Rates For GSM Evolution

EHF Extremely High Frequency

EPC Evolved Packet Core

FCC Federal Communications Commission

FCC Federal Communications Commission

FDD Frequency Duplex Division

FI Floating Intercept

FSPL Free Space Path Loss

GPRS General Packet Radio Service

GSM Global System for Mobile

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IMT International Mobile Telecommunications

IoT Internet of Things

ITU International Telecommunications Union

LoS Line-of-sight

LTE Long Term Evolution

M2M Machine-to-Machine

METIS Mobile and Wireless community Enablers for the Twenty-Twenty information Society

MIMO Multiple In and Multiple Out

MMSE Minimum Mean Square Error

mmWave Ondas milimétricas

MPC Multipath Components

NLoS Non-line-of-sight

NR New Radio

NYU New York University

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OLOS Obstruction Line-of-sight

OPLE Obstruction Path Loss Exponent

P2P Peer-to-Peer

PAP Perfil Angular de Potência

PC Plano de Controle

PDP Power Delay Profile

PGW Packet Data Network Gateway

PLE Path Loss Exponent

PLE Path Loss Exponent

PU Plano de Usuário

QoS Quality of service

RAN Radio Access Network

RRU Remote Radio Unit

Rx Antena Receptora

SGW Serving Gateway

SHF Super High Frequency

SSB Single SideBand

TDD Time Duplex Division

TDMA Time Division Multiple Access

Tx Antena transmissora

V2V Vehicular-to-Vehicular

VNA Vectorial Network Analyzer

WCDMA Wideband Code Division Multiple Access

WIFI Wireless Fidelity

WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access

XPD Polarization Loss Factor

Resumo

Dentro do contexto de estudos relacionados a radio propagação, esta tese apresenta uma proposta de modelagem em larga-escala da perda de propagação para as bandas 8, 9, 10 e 11 GHz em relação ao número de paredes, distância e polarização. Foram feitas campanhas de medições no corredor do Anexo II e em laboratório de ensino localizados na Universidade Federal do Pará. A campanha de medições foi realizada utilizando antenas cornetas direcionais co-polarizadas em V-V e H-H e com polarização cruzada V-H em condições de Linha de visada (*LoS - Line-of-sight*) e sem Linha de Visada (*NLoS - non-line-of-sight*), o transmissor foi fixado dentro do ambiente com potência de transmissão de 0 dBm com disposição de antenas em V-V e H-H e 15 dBm para V-H. Foram utilizadas antenas direcionais para transmissor e receptor com elevação de 29.3° e azimute de 29° para as frequências 8, 9, 10 e 11 GHz. Foi aplicada a técnica Mínimos Quadrados Lineares (*Minimum Mean Square Error - MMSE*) para determinar os valores dos parâmetros das equações como: PLE, XPD, HHPD e OPLE. O modelo proposto para perda de propagação apresentou resultados satisfatórios em comparação com os dados medidos apresentando um desvio padrão baixo. Também é apresentada uma análise de desvio padrão ponto-a-ponto dentro dos dois ambientes para as frequências estudadas. Para o corredor os valores de desvio padrão utilizando antenas polarizadas V-V foram de 7, 7.5, 5.6 e 5 dB e para antenas com polarização cruzada V-H foram de 5, 6.2, 2.3 e 3.5 dB para as frequências 8, 9, 10 e 11 GHz respectivamente. Para o laboratório os valores de desvio padrão para antenas V-V obteve 7, 7, 6.5 e 7.3 dB e para antenas com polarização H-H resultaram os valores de 9.3, 6.1, 6.1 e 6 dB. O fator de perda por polarização (XPD) apresentado na extensão do modelo CIX para o corredor apresentaram valores de 19.3, 28.7, 21.3 e 14.3 para as frequências de 8, 9, 10 e 11 GHz, respectivamente.

Palavras-chave: radio propagação, larga escala, LoS, NLoS, V-V, H-H, V-H, Mínimos Quadrados Lineares.

Abstract

Within the context of studies related to radiopropagation, this work presents a proposal for large-scale modeling of propagation loss for 8, 9, 10 and 11 GHz bands in relation to the number of walls, distance and polarization. Measurement campaigns were conducted in the Annex II corridor and in a teaching laboratory located at the Federal University of Pará. The measurement campaign was performed using VV and HH co-polarized directional horn antennas and VH cross polarization antennas in Line of Sight (LoS) and Line of Sight (NLoS) conditions, the transmitter was fixed within the environment with 0 dBm transmission with VV and HH antenna array and 15 dBm for VH. Directional antennas for transmitter and receiver with 29.3° elevation and 29° azimuth were used for frequencies 8, 9, 10 and 11 GHz. The Minimum Mean Square Error (MMSE) technique was applied to determine the values of the equation parameters as: PLE, XPD, HHPD, and OPLE. The proposed propagation loss model presented satisfactory results compared to the measured data presenting a low standard deviation. A point-to-point standard deviation analysis is also presented within the two environments for the studied frequencies. For the corridor the standard deviation values using polarized V-V antennas were 7, 7.5, 5.6 and 5 dB, and for cross-polarized V-H antennas were 5, 6.2, 2.3 and 3.5 dB for studies frequencies. For the laboratory the values of standard deviation for polarized V-V antennas were 7, 7, 6.5 and 7.3 dB and for polarized H-H antennas were 9.3, 6.1, 6.1 and 6 dB. The polarization loss factor (XPD) presented in the extension of the CIX model for the corridor present values of 19.3, 28.7, 21.3 and 14.3 for the frequencies of 8, 9, 10 and 11 GHz, respectively.

Keywords: radio propagation, large-scale, LoS, NLoS, V-V, H-H, V-H, MMSE.

1 Introdução

A alta demanda para as futuras aplicações nos sistemas 5G necessitam de maior capacidade e as bandas utilizadas em frequências abaixo de 6 GHz estão saturadas. Logo, as bandas acima de 6 GHz podem ser exploradas no 5G para oferecer largura de banda necessária para as futuras aplicações da próxima evolução de comunicação móvel (1).

Os sistemas de comunicação sem fio representam uma tecnologia que vive em constante evolução, principalmente em pontos como tráfego de dados e multiusuários. Com a nova geração de comunicação móvel (5G) diversas pesquisas estão em desenvolvimento para atender as recomendações exigidas. Uma das vertentes de estudo é voltada a sondagem de canal para as faixas de frequência que iniciam em 6 GHz e vão até 28 GHz e ondas milimétricas (30 a 300 GHz) (2) - (3). As bandas SHF (*Super High Frequency*) que contemplam a faixa de 3 a 30 GHz e EHF (*Extremely High Frequency*) que contemplam a faixa de 30 a 300 GHz, são denominadas por alguns autores como banda de ondas milimétricas por apresentar características de propagação semelhantes (4) e (5).

Para os estudo das altas frequências voltados ao 5G, alguns órgãos desenvolveram pesquisas voltadas as bandas acima de 6 GHz, como a METIS (*Mobile and Wireless community Enablers fo the Twenty-Twenty information Society*), a Parceria Público Privada de 3ª Geração - 3GPP e a Comissão Federal de Comunicações - FCC. Onde apresentam relatórios indicando as frequências prováveis para o 5G que variam de 0.8 GHz a 93 GHz, descrevem estudos de sondagem e modelagem de canal apontando a faixa de 10 GHz como frequência promissora para estudos em ambientes *indoor* (3), (6) e (7). Outros relatórios também foram divulgados relacionando estudos de sondagem de canal que englobam modelos de perda de propagação em larga-escala (*large-scale path loss*) para ondas milimétricas (*mmWave*) (6), (8). Outros grupos importantes como NYU (*New York University*) e pesquisadores europeus e asiáticos apresentam estudos focados em bandas de 10 GHz a 25 GHz e 40 GHz a 73 GHz para ambientes *indoor* e *outdoor*. Para esta tese as frequências analisadas estão dentro do radar para possíveis aplicações no 5G ou além, motivando a necessidade de estudos para as bandas candidatas.

Para compreender o comportamento da perda de propagação para as bandas prioritárias para o 5G, são utilizados modelos de propagação, pois através deles pode-se planejar uma rede sem fio, otimizar o posicionamento de antenas transmissoras e realizar a parte mais importante de um projeto para sistemas de telecomunicações do futuro (9). Modelagem do canal de rádio é uma das partes mais difíceis no *design* de sistemas de telecomunicações, e é tipicamente desenvolvido sobre dados estatísticos baseados em

campanhas de medições específicos para entender o sistema de comunicação pretendido e alocação de espectro.

Para determinar os parâmetros escalares dos modelos foi aplicado o método de Mínimos Quadrados Lineares (MMSE), que utiliza regressão linear para minimizar o desvio padrão entre os dados coletados e a aproximação. Alguns modelos como Okumura-Hata (10), COST 231 *path loss model* (11) e outros (12) - (13) - (14) utilizaram desta técnica para determinar os coeficientes dos modelos matemáticos. Nesta tese é utilizada a mesma abordagem de otimização dos coeficientes para os modelos. Na literatura são utilizadas outras formas de otimização dos coeficientes como redes neurais artificiais e otimização por algoritmos bio-inspirados.

Os modelos de propagação podem atender ambientes *indoors* e *outdoors*, bem como *indoor-outdoor* ou *outdoor-indoor*. Ambientes *indoor* e *outdoor* influenciam nas ondas propagadas dentro destes meios, sofrendo influência dos multicaminhos ou multipercursos (*multipath*) através dos mecanismos de propagação.

Para esta tese, os modelos de propagação foram aplicados em ambientes *indoor* devido aos materiais de construção utilizados, ao número de pessoas que circulam no interior, aos diferentes arranjos dos dispositivos móveis e a interferência nos sistemas, dentre outros fatores. Fisicamente, ambientes internos confinam as ondas e têm mais componentes reflexivos que levam a múltiplos percursos. Corredores são considerados guias de ondas dielétricos com dimensões transversais que são muito maiores que o comprimento de onda e, portanto, vários mecanismos de propagação estão envolvidos neste processo, além de tipos de obstáculos, efeitos de espalhamento, difração e sombreamento. (15). Em contrapartida, o laboratório ou escritório possuem menor comprimento transversal e maior largura em relação ao corredor, levando a um comportamento diferente e tendo menos influência dos *multipaths* comparado com o que é observado no corredor.

Nesta tese são empregados os modelos de perda de trajetória para frequência única: *Close-in reference distance* (CI) e *Floating intercept* (FI) e modelos para múltipla frequência: Alfa-Beta-Gama (ABG) e *Close-in dependência em frequência* (CIF). Os modelos levam em consideração a atenuação devido ao *multipath* e o efeito de propagação em corredores e salas de aula, bem como a polarização das antenas que tem atraído muita atenção na literatura. Discuti-se características de propagação muito importantes em modelos típicos de perda de propagação em ambientes internos como: efeitos de despolarização, perda de penetração através de diferentes tipos de paredes (OLOS), análise de desvio padrão na média e ponto-a-ponto e comportamento da variável aleatória. Foram realizadas campanhas de medição, particularmente nas frequências de 8, 9, 10 e 11 GHz aplicando modelagem em frequência única: *Close-in* (CI) e *Floating-intercept* (FI) e estudos em múltiplas frequências através dos modelos Alfa-Beta-Gama (ABG) e CIF. Os parâmetros do modelos foram determinados através de regressão linear dos dados experi-

mentais, a fim de minimizar o desvio padrão dos dados medidos em relação a aproximação dos modelos.

As contribuições desta tese podem ser definidas por: (i) modelagem em larga escala para frequências de 8, 9, 10 e 11 GHz usando antenas em co-polarização (*co-polarization*) e polarização cruzada (*cross-polarization*); (ii) estudo da dependência de frequência entre frequências centrais 8, 9, 10 e 11 GHz, (iii) análise do desvio padrão ponto a ponto para polarizações de antenas e ambientes, (iv) perda por tipo de obstrução (OLOS) utilizando antenas em co-polarização nas frequências estudadas e (v) análise estatística através do comportamento das variáveis aleatórias (desvio padrão e média).

1.1 Motivação

Com a nova geração de comunicação móvel (5G), diversos desafios surgem a fim de melhorar a comunicação para o usuário final. Dentre esses desafios, a alta vazão de dados, a baixa latência e o uso eficiente de redes heterogêneas podem ser solucionados com o uso de bandas acima de 6 GHz. Alguns grupos de pesquisa como METIS e NYU realizam pesquisas nas bandas SHF e EHF para modelagem de canal em pequena e larga-escala, com antenas em co-polarização e em polarização cruzada. Dentro deste contexto, esta tese visa modelagens de canal em larga escala utilizando o modelo CI, FI, CI-HH, FI-HH, ABG, CIF e CI-OLOS para ambientes *indoor* nas bandas de 8, 9, 10 e 11 GHz em condições de LoS e NLoS com antenas *horns* direcionais em polarizações V-V, H-H e V-H.

1.2 Objetivos

Esta tese propõe análise e modelagem em larga-escala para uma e múltiplas frequências em 8, 9, 10 e 11 GHz para ambientes *indoor*, utilizando antenas direcionais com polarização V-V, H-H e V-H em LoS e NLoS.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Definir parâmetros do modelo como *path loss exponent* (PLE) e o sombreamento apresentada pela variável aleatória Gaussiana;
- Extensões ao modelo CI como: XPD e OPLE;
- Estudo de dependência de frequência para a banda de 8 a 11 GHz utilizando os modelos CIF e ABG;
- Análise estatística sobre os dados medidos.

1.3 Contribuições

Dentre as contribuições desta tese, pode-se destacar:

- Modelagem em larga escala para 8, 9, 10 e 11 GHz em ambientes *indoor*;
- Propostas de extensões para o modelo CI que caracterizam perda por polarização e perda por parede;
- Análise multifrequência para 8 a 11 GHz;
- Análise estatística para 8 a 11 GHz.

1.4 Organização da Tese

Esta tese está organizada em oito capítulos, sua configuração será abordada a seguir:

- No capítulo 2, apresentará um estudo sobre o estado da arte;
- No capítulo 3, fará uma abordagem sobre propagação;
- No capítulo 4, abordará sobre a evolução das redes móveis;
- No capítulo 5, apresenta os modelos e as propostas de modelagem *indoor*;
- No capítulo 6, falará sobre metodologia e Cenários;
- No capítulo 7, apontará todos os resultados e análises para as modelagens e levantamento estatístico;
- No capítulo 8, terá a conclusão e trabalhos futuros;

2 Trabalhos Correlatos

2.0.1 Considerações iniciais

Nesta seção serão abordados trabalhos referentes a pesquisa e o atual Estado da arte para estudos de modelagem de canal para faixas acima de 6 GHz.

2.0.2 Principais trabalhos voltados para 5G.

Podemos citar como um dos pioneiros nas pesquisas sobre 5G presentes na literatura o grande trabalho em (2), onde o autor apresenta a motivação para as pesquisas e estudos de novos sistemas celulares de *mmWave*, e metodologia que viria a ser amplamente utilizada até os dias atuais, com medições reais com antenas direcionadas em ambientes *outdoor*. As medições foram feitas em um ambiente urbano ao redor da Universidade do Texas, em Austin para 38 GHz e na Universidade de Nova York (NYU) em 28 GHz. Foram coletados valores de *PLE*, propagação de atraso de ângulo de chegada (AOA) e ângulo de partida (AOD), RMSE e características de reflexão e penetração para o projeto de futuros sistemas celulares em *mmWave*.

No ano seguinte, (16) publicou o que será o 5G, e apresentou que a nova geração deverá ser uma mudança de paradigma que irá incluir frequências portadoras muito altas com largura de banda massiva, estações bases e uma densidade de serviço muito alta e inúmeras antenas. E será, ao contrário das últimas 4 gerações, altamente integradora: vinculando qualquer nova interface e espectro 5G ao ar juntamente com *LTE (Long Term Evolution)* ou 4G e *WIFI (Wireless Fidelity)*, para assim fornecer cobertura universal de alta taxa de transferência e uma perfeita experiência ao usuário final. O trabalho discorre os tópicos principais do 5G, e identifica os principais problemas e desafios que serão encontrados ao longo das pesquisas e atividades preliminares abordando outros trabalhos na literatura atual. O artigo destaca que há um grande caminho pela frente para as novas redes 5G, porém muitos desafios já foram vencidos como as camadas de protocolos e sua implementação, bem como regulamentação, políticas e negócios.

Em 2015, o METIS lançou um relatório acerca de modelagem de canal, cenários de usuário final, casos e requisitos para os cenários de propagação. Este foi um dos últimos relatórios do projeto METIS e sua grande abordagem é o desenvolvimento de modelos de canal baseados em medições e análises complementadas por simulações, os modelos propostos consistem em um modelo *map-based*, um modelo estocástico e um modelo híbrido derivados de ambos. Afim de fornecer uma estrutura de modelagem de canal flexível

e escalável, e delimitando as bandas promissoras para o 5G tanto em ambientes *indoor* quando *outdoor*. A faixa de 10 GHz, aparece como sendo a banda de alta prioridade, bem como as bandas de 28 - 29 GHz, 32 - 33 GHz, 43 GHz, 46 -50 GHz, 56 - 76 GHz e de 81 - 86 GHz. (3)

2.0.3 Os Trabalhos na Faixa de 6 a 73 GHz.

Diversas medições de canal foram realizadas nas bandas mmWave, como bandas de 6, 10, 11, 15, 18, 19, 26, 28, 32 e 38 GHz em (17), as características de propagação de *mmWave* foram investigadas em um ambiente de corredor interno para o cenário em LoS. As medições foram feitas com antena omnidirecional no transmissor e uma antena direcional no receptor, onde esta era configurada com polarização vertical e horizontal. Propõe o modelo de Perda de caminho que considera a atenuação com a frequência (FA), que é utilizado em (18) e, também introduz um fator de atenuação dependente da frequência. Estima o XPD e PLE de forma geral e menos complexa para o CIX e ABGX. Os valores de *PLE* variam de 0,1 a 1,4 dB para todas as frequências e foram determinados através de MMSE.

Em (19) é apresentado um valor ótimo para o *PLE* em ambiente interno na faixa de 10 GHz. As medições foram realizadas com antenas omnidirecionais em um ambiente interno e os resultados foram comparados ao modelo ITU-R P.1238-9. A principal motivação do trabalho foi a ausência de valores de *PLE* para esta faixa de frequência. O valor de *PLE* quando aplicado no modelo proposto em (20) mostrou um comportamento superior comparado ao modelo ITU-R P.1238. A técnica de otimização utilizada foi MMSE.

Dentre os trabalhos baseados em medidas para frequências acima de 6 GHz, podemos citar (21), que apresenta modelos de medição de difração, análise e força de sinal em torno de objetos, como cantos, pilares e objetos irregulares, a 10, 20 e 26 GHz. As medidas de difração foram realizadas em ambientes fechados e exteriores usando uma sonda de canal de onda contínua (CW) com três pares de antenas de direcionais do tipo corneta idênticas no transmissor e no receptor.

Em (22), é apresentada características de canais de rádio na frequências de 11,2 e 14,6 GHz, com largura de banda de 1 GHz em ambientes caracterizados como corredor, laboratório, escritórios e uma sala de conferência dentro de um edifício em Pequim, China. Foram investigadas as características de desvanecimento de grande e pequena escala com base em medidas realistas. As características de propagação e correlação de atraso também são discutidas.

Em (23) é realizado medições e modelos em larga-escala em um corredor para as frequências de 14 e 22 GHz em LoS e NLoS. É proposto um modelo em larga-escala do tipo *dual-slope* baseado em medidas para caracterizar o canal, sua validação é comprovada

através do modelo CI e seus parâmetros são definidos por MMSE. Outra abordagem é um modelo baseado em medições que utiliza guia de onda, por ser feito no interior de um corredor.

Em (18) foram realizadas medições corredor nas faixas de 19, 28 e 38 GHz com antenas direcionais em LoS e NLoS. Valores de PLE variando de 0,6 a 1,3 dB. Os modelos CI, FI, Perda de caminho de atenuação com a frequência (FA), ABG e o modelo CI com ponderação de frequência (CIF) foram estudados para o ambiente e as propriedades estatísticas de Perfil de Potência e Retardo (**Power Delay Profile**), RMS e dispersão de ângulo de azimute são obtidas e comparadas para as bandas estudadas. Os valores de *PLE* obtidos para todos os modelos são menores que o definido para o espaço livre ($PLE=2$) e o intervalo de atraso RMS é baixo para o cenário LoS. Os resultados indicaram que a propagação de canal para 5G usando antena direcional alta deve ser usada na técnica de *beamforming* para receber o sinal e coletar todos os componentes de multipercurso de diferentes ângulos em um local móvel específico.

já (24), realizou um sistema de medições de canal em 28 GHz em 3 diferentes cenários, incluindo escritório, corredor e um hall. Usando antenas direcionais de 26 dBi e um VNA (*Vectorial Network Analyzer*) para medir o canal a uma distância máxima de 30 metros. Analisando três tipos de características de propagação: perda de propagação, RSM do Delay Spread e Perfil Angular de Potência (PAP's). Os resultados mostram que ambientes internos podem melhorar a potência do sinal recebido no caso de LoS. No entanto, na condição de NLoS a perda de penetração causada por parede e porta pode trazer atenuação considerável, o que implica que as células menores terão um papel importante no aumento das probabilidades de links em LoS para os futuros sistemas de comunicação. Componentes *multipaths* podem ser detectados em várias direções, embora usando antenas de alta direção.

Para estudos na faixa de 28 a 60 GHz, (5) publicou medidas experimentais e modelos de canais de propagação empíricos para as bandas de 28, 38, 60 e 73 GHz com antenas direcionais orientáveis. A partir destas, apresentou modelos de perda de caminho direcionais e omnidirecionais, modelos de canais temporais e espaciais e probabilidades de interrupção. Os resultados servem de base para pesquisadores na análise e simulação de desempenho das redes sem fio *mmWave* que dependerão de sistemas de antenas do tipo MIMO (*Multiple-In Multiple-Out*). Esta foi a primeira contribuição na literatura para combinação de banda larga em *mmWave* em medições de propagação ao ar livre, para estações de acesso, *backhaul*, *Peer-to-peer* (P2P) e cenários veiculares (V2V) nas faixas de 28, 38, 60 e 73 GHz. Como em (5), o presente trabalho utiliza antenas direcionais no *setup* de medição, e também utiliza os modelos CI e FI para a modelagem.

Ondas milimétricas estão sendo abordadas no atual estado da arte, em (25) apresenta diversas medidas em larga escala utilizando antenas diretivas com alto ganho para

as frequências de 28 GHz e 73 GHz, é abordado também um modelo que simula uma antena omnidirecional, este foi usado antenas direcionais com alto ganho e rotacionando 360° no Tx e Rx. As medições foram realizadas em escritórios em LoS e NLoS, utilizando co-polarização V-V e polarização cruzada V-H. Para modelos de larga escala, foram utilizados diversos modelos como: CI, CIX, CIF, CIFX, FI, ABG e ABGX, onde o PLE foi definido através de MMSE. Variável aleatória do modelo possui media zero e desvio padrão sobre os dados medidos em dB. Os resultados abordados pelos autores, mostram que os modelos têm grande acurácia quando comparado aos dados medidos.

A faixa de 60 GHz tem sido uma das mais estudadas do tipo mmWave, e é utilizada atualmente nos dispositivos *WLAN Wireless HD and Wireless Gigabit Alliance (WiGig)* não licenciados (26) (27), que oferecem taxas de dados de múltiplos gigabits por segundo para comunicações internas de curto alcance. A maioria das medições foi conduzida para aplicações internas devido aos primeiros casos de uso pretendido (WLAN) e alta absorção de oxigênio centrada em torno de 60 GHz (2). Porém, com uma mudança de regra da FCC em 2013 que expandiu a taxa de energia irradiada efetiva de 40 para 82 dBm (26) nos dispositivos de LAN na faixa de 60 GHz, a comunicação outdoor de 60 GHz para aplicativos de *backhaul* não licenciados atraiu interesses e foram iniciados estudos nessa faixa para ambientes outdoor.

Tendo em vista que o presente trabalho trata a cerca de medições e modelagem em ambientes do tipo *indoor*, os trabalhos em ambientes outdoor mostram apenas como as pesquisas nova geração de tecnologia em ambientes outdoor foram desenvolvidas como forma de apresentação e embasamento teórico.

Este trabalho apresenta campanha de medições, modelagem de canal usando modelos de perda de propagação e levantamento estatístico das características do canal para 8, 9, 10 e 11 GHz para ambientes *indoor*, em situações de LoS e NLoS, utilizando antenas cornetas em co- e cross-polarização e perda por obstáculos (paredes). São usados modelos de propagação em larga-escala para caracterizar o canal, é utilizado MMSE para determinar o PLE, fator *cros-polarization discrimination* (XPD) e os fatores de perda por obstáculos ou tipo de parede.

2.0.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram abordados os principais e mais recentes trabalhos na literatura acerca de modelagem de canal em ambientes *indoor* para as frequências abordadas nesta tese e para frequências que serão utilizadas na nova Geração de comunicação - 5G.

3 Propagação de Ondas Eletromagnéticas

3.0.1 Considerações iniciais

Neste capítulo será abordada a propagação de ondas eletromagnéticas e formas de modelagem. Essas modelagens são importantes pois servem como base para novos sistemas de telecomunicações do futuro, como aproximação da perda de percurso em diferentes ambientes e auxilia a otimização das estações bases. Este capítulo será baseado no livro (26) e (28).

3.1 Rádio Propagação

A comunicação entre transmissor e receptor utilizando o meio sem fio é bastante difundido dentro das principais tecnologias de acesso. O caminho de transmissão entre o transmissor e o receptor varia de uma simples situação de visada direta quanto com obstruções como construções, montanhas e folhagens. Os canais sem fio são altamente aleatórios e de difícil análise, até mesmo a velocidade do receptor influencia no nível do sinal recebido.

Os fenômenos de propagação das ondas eletromagnéticas são diversos, mas podem ser generalizados através de três fenômenos: reflexão, difração e espalhamento. A maioria dos sistemas celulares estão dentro de cidades, não havendo visada direta na maioria das vezes entre o transmissor e receptor, a presença de grandes construções causa severas perdas por difrações. As reflexões em diversos objetos fazem trajetos diferentes com tamanhos distintos, a interação entre essas ondas causa desvanecimento de múltipla reflexão específico a um local, e a intensidade das ondas diminui à medida que a distância aumenta entre o transmissor e receptor.

Modelos de propagação focam em prever, na média, a intensidade do sinal recebido com a distância entre o transmissor e receptores, assim como a variabilidade do sinal referente ao ambiente onde foram medidos, essa abordagem é definida como larga escala. Modelos de propagação que caracterizam as rápidas flutuações do sinal recebido em distâncias curtas ou pequena duração de tempo são chamadas de modelos de desvanecimento em pequena escala. A Figura 1 ilustra o desvanecimento rápido em vermelho e o desvanecimento lento em azul.

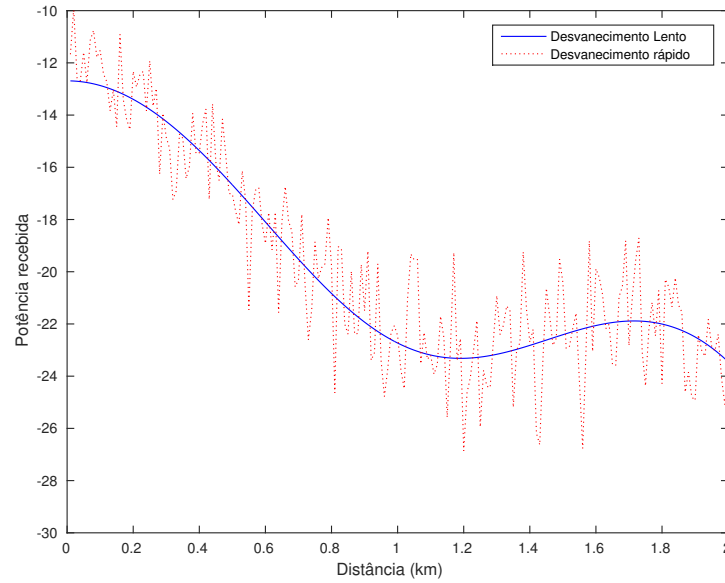


Figura 1 – Desvanecimento em pequena e larga escala.

Fonte: O autor

3.1.1 Modelo de propagação no Espaço Livre em Larga Escala

O modelo de propagação no espaço livre é usado para prever a potência recebida do sinal entre o transmissor e o receptor sem obstrução (LoS). Como a maioria dos modelos em larga escala, ele prediz a potência recebida em função da distância entre o transmissor e receptor. Para determinar a potência recebida é utilizado a equação de Friis definida pela Equação 3.1.

$$Pr(d)[W] = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (3.1)$$

Onde $Pr(d)$ é a potência recebida estimada em função da distância entre o transmissor e receptor, P_t é a potência de transmissão, G_t ganho da antena de transmissão, G_r ganho da antena de recepção, d é a distância entre o transmissor e receptor, L fator de perda do sistema não relacionado a propagação ($L \geq 1$) o valor indicado deste parâmetro é 1, e λ é o comprimento de onda em metros. Os ganhos das antenas de transmissão e recepção é definido por meio da abertura da antena.

O modelo de perda é definido em dB entre a diferença da potência efetivamente transmitida e a potência recebida podendo ser considerado ou não os ganhos das antenas. A potência efetivamente irradiada e o modelo de perda de propagação com os ganhos em dB são definidos por Equação 3.2 e Equação 3.3 respectivamente.

$$EIRP[W] = P_t G_t \quad (3.2)$$

$$Pr(d)[dB] = 10\log\frac{P_t}{P_r} = -10\log\left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}\right] \quad (3.3)$$

Quando desconsideramos os ganhos das antenas, e assumindo ganho unitário temos a Equação 3.4

$$Pr(d)[dB] = 10\log\frac{P_t}{P_r} = -10\log\left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}\right] \quad (3.4)$$

O modelo de Friis é valido apenas a distâncias superior ao campo distante referente a antena transmissora. A região de Fraunhofer R de uma antena transmissora é definido por uma região além da zona de Fresnel (28). Onde R é definida pela Equação 3.5, D é a dimensão física da antena e λ é comprimento de onda.

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.5)$$

O modelo de Friis não utiliza $d = 0$, por esta razão os modelos em larga escala usam o CI como um ponto referente de potência recebida para a distância referencia d_0 . A potência recebida pode ser calculada para qualquer $d > d_0$, para $P_r(d_0)$ é utilizado o campo distante como referência para definir o d_0 , logo $d_0 \geq d_f$. A distância referencia (d_0) é definida com o menor valor de medição ná prática. $P_r(d_0)$ é definido pela Equação 3.6 através da Equação 3.1.

$$Pr(d) = P_r(d_0)\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \quad d \geq d_0 \geq d_f \quad (3.6)$$

3.1.2 Propagação em Pequena Escala

Desvanecimento em pequena-escala é usado para descrever rápidas flutuações de amplitude, fase, ou atraso do *multipath* do sinal de rádio sobre um pequeno intervalo de tempo (nano segundos - ns). O desvanecimento é causado por interferência entre duas ou mais versões do sinal transmitido que chegou com atraso no receptor. Essas ondas de *multipath*, combinadas no receptor resultam em um sinal com uma variação na amplitude e fase.

Os três mais importantes efeitos em pequena escala são:

- Rápidas mudanças do sinal em um intervalo de tempo pequeno (ns);
- Dispersão no tempo causada por *multipath*;
- Aleatoriedade na frequência devido as variações de Doppler para diferentes *multipaths*

Construções em áreas urbanas causam desvanecimento por conta da altura das antenas que estão abaixo das estruturas da cidade, logo não há um único caminho de visada entre estação base e receptores. Mesmo quando existe visada direta, os *multipaths* são causados devido as diversas reflexões nas estruturas ao redor. As ondas de rádios recebidas vêm de diferentes direções com diferentes *delays*. O sinal recebido para qualquer ponto consiste em um largo número aleatório de amplitudes, fases e ângulos de chegada. Essas componentes de *multipath* combinadas em uma antena de recepção, causam no sinal recebido distorção ou desvanecimento. Existem alguns fatores que influenciam no desvanecimento em pequena escala, eles são:

- Multipath: a presença de objetos causa reflexão e difusores no canal resultando em um canal aleatório que dissipa a energia do sinal em amplitude, fase e tempo;
- Velocidade do receptor: o movimento relativo entre a estação base e o dispositivo móvel resulta na aleatoriedade em modulação e frequência devido a diferentes desvios Doppler em cada um dos componentes do *multipath*;
- Velocidade de objetos ao redor: se objetos no canal de rádio estiverem em movimento, eles induzem um desvio Doppler variável no tempo em componentes de *multipath*;
- Transmissão do sinal em banda larga: se a largura de banda do sinal de rádio transmitido for maior que a largura de banda do canal *multipath*, o sinal recebido será distorcido, mas a intensidade do sinal recebido não sofrerá grande mudança em uma área local, ou seja, o desvanecimento do sinal de pequena escala não será significativo.

3.1.2.1 Resposta ao impulso

A variação em pequena escala do sinal pode ser diretamente relacionada com a resposta ao impulso do canal. A resposta ao impulso para canais em banda larga contém todas as informações necessárias para simular ou analisar qualquer tipo de rádio transmissão para um determinado canal. Isso decorre do fato de que um canal de rádio móvel pode ser modelado como um filtro linear com uma resposta impulsiva variável no tempo, como vista na Figura 2, em que a variação de tempo é decorrente ao movimento do receptor no espaço. A natureza de filtragem do canal é causada pela soma das amplitudes e atrasos das múltiplas ondas que chegam em qualquer instante de tempo. A Equação 3.7 apresenta a resposta ao impulso assumindo que seja invariante no tempo.

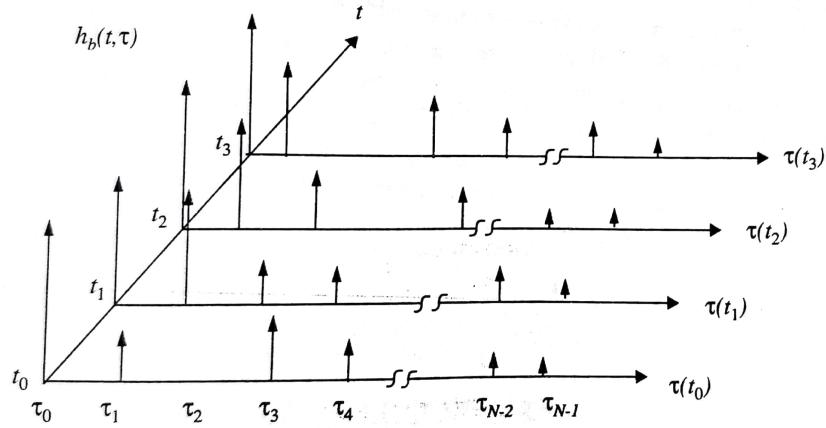


Figura 2 – Modelo de resposta ao impulso variante no tempo de um canal.

$$h_b(\tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i e^{(j\theta_i)\delta(\tau-\tau_i)} \quad (3.7)$$

3.1.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou as formas de modelagem de canal em pequena e larga escala, apresentando detalhes sobre cada uma das formas de resposta do canal. Modelagem de canal é a parte crucial em um sistema de telecomunicação, pois apresentará todo o comportamento do sinal no ambiente escolhido.

4 Evolução da Arquitetura de Redes Móveis rumo ao 5G

4.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresentará um resumo sobre a evolução das redes móveis até o 5G e fará uma abordagem das redes 5G e suas características como: maior taxa de transmissão (superior a 10 Gbit/s), menor latência (abaixo de 1 ms), alta confiabilidade, maior densidade de conectividade e uma maior mobilidade sobre as tecnologias anteriores.

4.2 Contextualização

As comunicações móveis no processo de transformação de um sistema que, nos primórdios, transmitia para milhões de usuários apenas voz e evoluiu para um sistema que pode suportar trilhões de dispositivos transmitindo dados e voz. A necessidade de uma maior conectividade por meio de redes sem fio é impulsionada pelo aumento no número de serviços móveis multimídia e tem levado a um aumento exponencial de demanda de tráfego de dados (29). As previsões da Ericsson (30) apontam para um aumento do tráfego de dados móveis em torno de 43% por ano, alcançando 107 exabites (EB) por mês no fim de 2023. A Figura 3 apresenta aumento de dispositivos e do tráfego esperado em 2023.

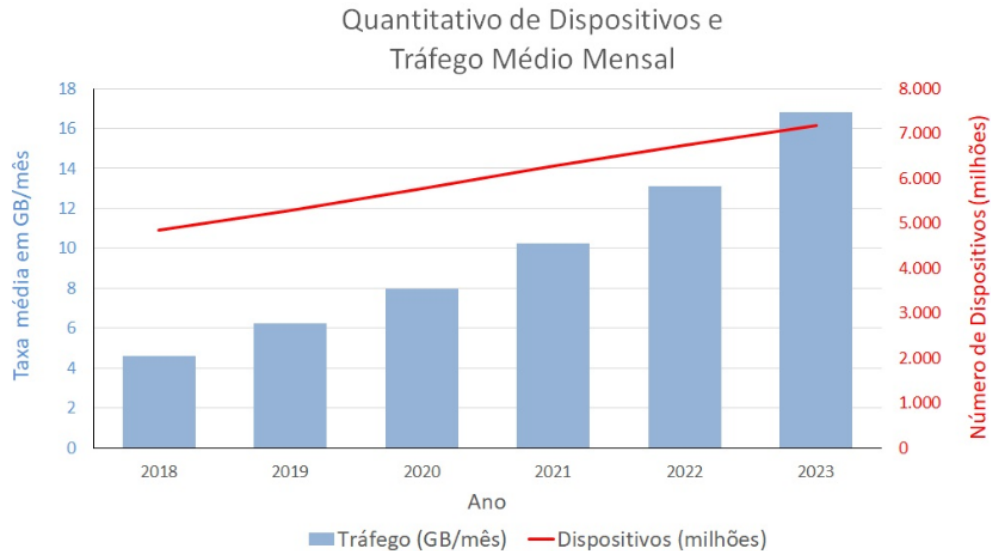
Novas aplicações, como *Internet of Things* (IoT), realidade aumentada, realidade virtual, comunicação Dispositivos-Dispositivos (D2D), *e-healthcare*, comunicação Máquina-Máquina (M2M) e principalmente o *stream* de vídeo impulsionarão a crescente utilização dos recursos da rede móvel (31).

O crescimento do uso dessas novas aplicações, também impulsiona as novas exigências para as redes móveis, tais como latência menor do que 1 ms, taxa média por usuário de 10 Gbit/s, confiabilidade para comunicações críticas, alta densidade de dispositivos (100 dispositivos/km²) (32).

As redes de quarta geração (4G), também conhecida como *Long Term Evolution* (LTE), não conseguem atingir esses requisitos devido às limitações da tecnologia padronizada e ao tipo de arquitetura adotada para o núcleo de rede e interface a aérea (33).

Para suprir essa demanda, uma mudança de paradigma deve ser adotada de modo que a rede móvel seja redesenhada para atender os requisitos, contornando as limitações intrínsecas das redes 4G (34). A rede 5G, projetada para atender os requisitos do IMT-

2020 definidos pela especificação M.2083 do ITU-R, utiliza uma nova arquitetura de rede, *core* e sistema de rádio que fornece banda larga de alta capacidade, latência ultra baixa, QoS e conectividade massiva entre os usuários, objetos e sensores.



Fonte: (30)

Figura 3 – Evolução do crescimento da taxa de dados e número de dispositivos.

4.3 Roteiro da Evolução das Redes Móveis

Para entender a evolução das comunicações móveis e o futuro da Rede 5G, é exibido o roteiro de evolução das ações até as comunicações 5G (35). Antes de 1G (<1983): Todas as comunicações sem fio eram centradas na voz e usavam sistemas analógicos com modulação de banda única (SSB).

- 1G (1983–): todas as comunicações sem fio eram centradas na voz. Em 1966, a Bell Labs tomou a decisão de adotar sistemas analógicos para um sistema móvel de alta capacidade, porque naquela época os sistemas de rádio digital eram muito caros de fabricar. Um sistema analógico com rádios FM foi escolhido. Em 1983, o sistema celular dos EUA foi nomeado AMPS (Advanced Mobile Phone Service). O AMPS foi chamado 1G na época.
- 2G (1990–): durante esse período, todas as comunicações sem fio eram centradas na voz. O GSM europeu e a América do Norte IS-54 eram sistemas digitais usando a multiplexação TDMA. Desde que a At&T foi alienada em 1980, nenhum instituto de pesquisa como a Bell Labs conseguiu desenvolver um excelente sistema 2G, como fez em 1997. Assim, poderíamos dizer que passar de 1G para 2G significa migrar do sistema analógico para o sistema digital.

- 2.5G (1995–): todas as comunicações sem fio são principalmente para voz de alta capacidade com serviço de dados limitado. O sistema CDMA (acesso múltiplo por divisão de código) usando largura de banda de 1,25 MHz foi adotado nos Estados Unidos. Ao mesmo tempo, os países europeus aprimoraram os sistemas GSM para GPRS e EDGE.
- 3G (1999–): nesta geração, a plataforma de comunicações sem fio possui capacidade de voz e dados. 3G é o primeiro sistema padrão internacional lançado da ITU, em contraste com os sistemas da geração anterior. O 3G explora a tecnologia WCDMA (acesso múltiplo por divisão de código de banda larga) usando largura de banda de 5 MHz. Opera nos modos duplex por divisão de frequência (FDD) e duplex por divisão de tempo (TDD). Assim, poderíamos dizer que, ao migrar de sistemas 2G para 3G, evoluímos de sistemas centrados em voz para sistemas centrados em dados.
- 4G (2013): 4G é uma taxa de dados de alta velocidade mais um sistema de voz. Existem dois sistemas 4G. Os Estados Unidos desenvolveram o sistema WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) usando OFDM (Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal), evoluindo a partir do WiFi. O outro é o sistema LTE que foi desenvolvido após o WiMAX. A tecnologia do LTE e a do WiMAX são muito semelhantes. A largura de banda dos dois sistemas é de 20 MHz. As principais operadoras de celular são favoráveis ao LTE e a maioria dos países do mundo já começou a emitir licenças para 4G usando os atuais sistemas LTE desenvolvidos. O custo do licenciamento através de leilão é muito alto. Assim, poderíamos dizer que migrar de 3G para 4G significa uma mudança de baixas taxas de dados da Internet para altas taxas de dados de vídeo móvel.
- 5G (2021–): 5G ainda deve ser definido oficialmente pelos organismos de padronização. Será um sistema de dados de super alta capacidade e ultra alta velocidade, com novos requisitos de projeto adaptados aos sistemas gerados por energia e despesas operacionais reduzidas para os operadores. Nesse contexto, o 5G prevê não apenas uma tecnologia inventada, mas um ecossistema tecnológico de redes sem fio trabalhando em sinergia para fornecer um meio de comunicação contínuo para o usuário final. Assim, podemos dizer que mudar de 4G para 5G significa uma mudança no paradigma do design de um sistema de disciplina única para um sistema de disciplina múltipla.

A Tabela 1 resume o ano de lançamento e os requisitos do IMT para pico e as taxas médias de dados para diferentes gerações do sistema celular. Embora os requisitos do IMT para 5G ainda não tenham sido definidos, o consenso comum dos pesquisadores e da indústria é que, em princípio, ele proporcione uma experiência de Internet móvel semelhante a fibra com taxas de pico de até 10 Gbps em condições estáticas / com baixa

mobilidade e 1 Gbps para Cobertura geral de usuários altamente móveis/de borda celular (com velocidades > 300 km / h).

Tabela 1 – Especificações de diferentes gerações de sistemas celulares.

Geração	Ano de Lançamento	Requisito IMT para taxa de dados	
		Usuários Móveis	Usuários estacionários
1G	1981	-	-
2G	1992	-	-
3G	2001	384 Kbps	>2 Mbps
4G	2011	100 Mbps	1 Gbps
5G	2021	1 Gbps	10 Gbps

4.4 Limitações do 4G

Assim como as gerações anteriores, a rede 4G incorporou as características e funcionalidades do 3G, aumentando a capacidade e taxa por meio da utilização de uma melhor interface de rádio e melhorias no *core* da rede, chamado de EPC (*Evolved Packet Core*). A maior parte do ganho de velocidade e capacidade era obtida por meio de melhorias na eficiência do uso do espectro (como em técnicas de modulação e esquemas de codificação) (36). Melhorias incrementais na modulação e no esquema de codificação não seriam suficientes para atender os requisitos do 5G, já que estão próximo ao limite, portanto, outros métodos devem ser explorados (37).

Para ampliar a capacidade total do canal é necessário aumentar a cobertura (adicionando novas células), o número de subcanais (via MIMO massivo), largura de banda (faixa de frequência adicional) e melhorar relação sinal-ruído. De acordo com (38) as técnicas que podem ser utilizadas para aumentar a capacidade, destacam-se:

- Largura de banda - Espectro não utilizado, transmissão não-ortogonal, comunicação *full-duplex*;
- Potência - Mais antenas por meio do uso de MIMO massivo e conformação de feixe;
- Relação sinal-ruído - Cancelamento de interferência, modulação de alta ordem.

A Figura 4 compara os requisitos de desempenho entre as redes 4G e 5G.



Fonte: (34)

Figura 4 – comparação dos requisitos entre o 4G e 5G.

4.5 Características do 5G

As redes 5G diferem das gerações anteriores pois a taxa de transmissão não é o único motivo que impulsiona o desenvolvimento de novas tecnologias. O 3GPP formou um grupo de estudo para investigar casos de uso para novos serviços e tecnologias, identificando funcionalidades e características que as redes 5G precisariam atender. O estudo apresentou três categorias com os atributos de desempenho que cada caso necessita. As três categorias são:

- Banda larga móvel aperfeiçoada: Alta taxa de transmissão para uma grande área de cobertura;
- Comunicações de baixa latência e confiáveis: Serviços sensíveis a latência, como controle de veículos, cirurgia remota entre outras;
- Comunicação massivas tipo máquina: Serviços utilizando dispositivos de baixo custo, baixo consumo de energia e alto número de dispositivos por área (IoT).

De acordo com pesquisas e colaborações da indústria são apontadas os principais requisitos necessários para sua implantação (39). Dentre eles são:

- Taxa de 1 a 10 Gbps;
- Latência de 1 ms;

- Largura de banda por unidade de área, suportando um número 1000 vezes maior de dispositivos;
- Alto número de dispositivos conectados (IoT);
- Disponibilidade de 99,999%;
- Cobertura total para 100% de conectividade;
- Redução do consumo de energia de aproximadamente 90%;
- Baterias de alta duração.

Para atender a esses requisitos visando o 5G, melhorias na arquitetura devem ser realizadas, e serão apresentadas na subseção a seguir.

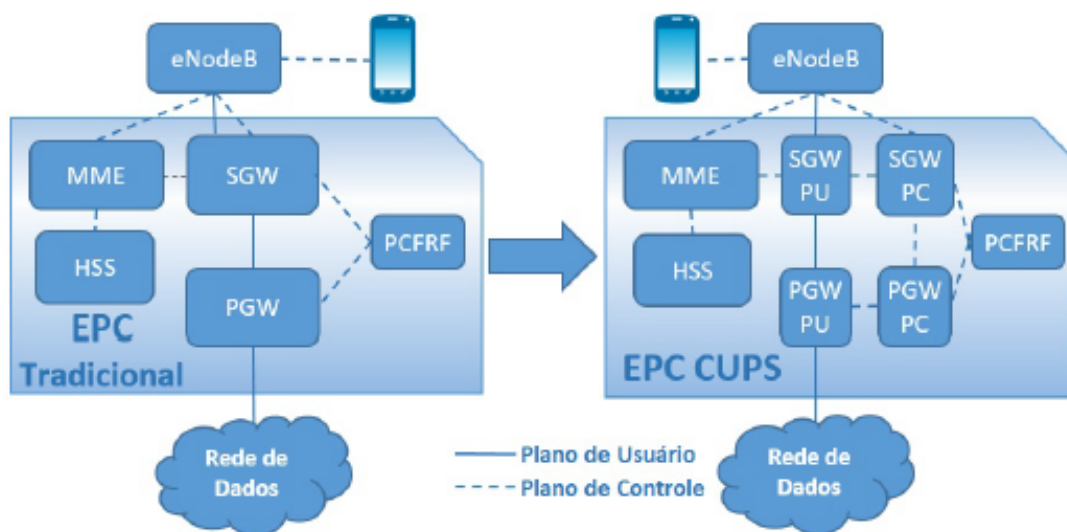
4.6 Arquitetura da Rede 5G

Para atender aos requisitos mencionados anteriormente, a rede 5G não deve apenas melhorar as tecnologias legadas, mas também possuir um arquitetura flexível e escalável para se adaptar aos diversos cenários do futuro. Ela deve coexistir com as redes LTE e Wi-Fi por um longo período. A coordenação entre os requisitos de tráfego e mobilidade entre essas redes deverão ser administradas de forma que a taxa de transmissão e continuidade de mobilidade sejam atendidas.

Para a rede flexível, é necessário considerar a separação entre o plano do usuário e controle e a redefinição dos limites entre o *core* e a rede de acesso . Devido aos requisitos da rede, algumas funções do *core* da rede devem estar extremidade da rede, assim como funções tipicamente da rede de acesso estejam mais centralizadas (40). Os componentes da rede de *Core* e Acesso 5G serão descritos a seguir.

4.6.1 Rede de *Core*

Para ter a facilidade de dimensionar, implementar e adaptar a rede, o 3GPP por meio de (41) introduziu a estratégia da utilização de uma arquitetura plana com a divisão entre o plano de controle (PC) e o plano de usuário (PU) já na rede de *core* do 4G, chamada de EPC. Essa independência fornece um suporte mais eficiente ao aumento de tráfego, pois permite uma ampliação nos elementos do PU sem a necessidade de ampliar elementos do PC. Essa separação também permite uma evolução independente dos planos de forma que as implementações de novas tecnologias possam ser atualizadas e substituídas. O *Control and User Plane Separation* (CUPS) forma a arquitetura básica da evolução do EPC para o *core* 5G. A Figura 5 ilustra essa transição na rede 4G, com a separação entre os planos no SGW (Serving Gateway) e PGW (Packet Data Network Gateway).



Fonte: (34)

Figura 5 – EPC tradicional X EPC CUPS.

Na Figura 5 é apresentada a arquitetura de *core* 5G. Por fazer parte de (42) e (43), que é uma evolução do (41), essa arquitetura possui similaridades com o EPC. Ela possui uma divisão completa entre o plano de controle e o plano de usuário.

Dentre os pontos de evolução da arquitetura 4G para as redes 5G pode-se citar o alto custo de implantação e dimensionamento do EPC devido à utilização de *hardware* dedicado e proprietário, alocação ineficiente de recursos devido as configurações de redes manuais e estáticas. Para resolver este problema é necessário ter uma mudança na arquitetura, como: virtualização da rede, redes definidas por software e fatiamento da rede.

4.6.2 Rede de Acesso

Para atender os diversos cenários de serviço previstos na rede 5G, é necessário que a rede de acesso se adapte para diversas características de canal e atenda uma grande gama de serviços. Uma nova interface de rádio e arquitetura foi desenvolvida para atender as tecnologias que estão disponíveis quando a implantação do 5G for iniciada (44).

- Novo rádio: o 3GPP Release 15 (42) estabelece a nova interface de rádio do 5G, chamada 5G NR (*New radio*), trazendo características novas na arquitetura, modulação, codificação, espectro e estrutura do quadro. O 5G NR utilizará uma nova faixa de frequência, incluindo ondas milimétricas, banda C e abaixo de 3 GHz. Utilizar espectros acima de 10 GHz permite a obtenção de altas taxas de dados já que oferece uma banda cerca de 10 vezes maior que a banda atual disponível (45).

- MIMO massivo: Esta técnica de transmissão estende o MIMO já utilizado, permitindo centenas de antenas no transmissor e receptor. O MIMO massivo melhora tanto a diversidade quanto a eficiência espectral, possibilitando a utilização de técnicas que mitigam a interferência entre células com o uso do *beamforming* fazendo o direcionamento dos feixes.
- *Cloud RAN*: em arquiteturas de redes móveis tradicionais, a estação radio base realiza o processamento da banda base por meio de uma BBU (*Baseband Unit*) e de rádio frequência através da RRU (*Remote Radio Unit*). A C-RAN (*Cloud RAN*) separa a BBU da estação rádio base, simplificando a gestão de rede e permitindo um *pool* de BBUs para otimização de recursos.

4.7 Considerações finais

Neste capítulo foi abordada a evolução das redes móveis, bem como as características das redes da quarta geração - 4G e as necessidades de evolução nas camadas de rede para a implantação da quinta geração - 5G.

5 Abordagem e Propostas de Modelos *In-door*

5.1 Considerações iniciais

Este capítulo fará uma abordagem sobre alguns modelos de propagação para única e múltiplas frequências com o intuito de compreender a dependência de frequência e como o sinal se comporta na média. Também serão apresentados alguns modelos presentes na literatura que possuem parâmetros semelhantes aos propostos nesta tese.

5.2 Modelos em larga escala para frequência única

Modelos empíricos são de fácil aplicação, e são capazes de prever sem gastar muitos recursos com processamento computacional, vale ressaltar que esses modelos matemáticos apenas são aplicados a fenômenos de propagação. A maioria deste modelos considera a perda no espaço livre somando perdas que estejam no percurso como paredes e andares. Com o intuito de contextualizar serão feitas abordagens a modelos que utilizam paredes como parte da perda, este capítulo tem como base os trabalhos (17) - (25).

5.2.1 Modelo Close-In (CI) e Close-In X (CIX)

O modelo de perda de caminho *Close-In Free Space* (CI) visto na Equação 5.1 dado em dB é parametrizado por um único parâmetro, conhecido como *Path Loss Expoente* (PLE) ou n . O modelo CI usa base física para determinar o parâmetro de perda inicial dependente do comprimento de onda (λ) e da distância referencia $d_0 = 1m$ definido como *Free Space Path Loss* (FSPL) visto na Equação 5.2. Os parâmetros do modelo de perda são definidos por meio do MMSE, minimizando o erro entre os dados medidos e o simulado. Para os modelos ajustados nesta tese, foi usada a distância referência de 1 m. O modelo CI pode ser usado para estimar a perda de trajetória em medições com antenas co e cross-polarizadas (46)(5).

$$PL^{CI}(f, d)[dB] = FSPL(f, d_0) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}^{CI} \quad (5.1)$$

$$FSPL(f, d_0)[dB] = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (5.2)$$

A perda inicial é definida através do $FSPL$ que depende da distância de referência d_0 e o comprimento de onda λ . A variável aleatória Gaussiana (X_σ^{CI}) de 5.1 possui média zero e desvio padrão em dB e o n é o PLE.

O modelo CI possui algumas extensões, dentre elas o fator de perda por polarização cruzada, chamado *Cross Polarization Discrimination* (XPD), que possui característica similar ao fator de atenuação de pisos ou andares mostrado em (47) e (26), (25). O uso de antenas despolarizadas leva a mudança tanto no *slope* quanto ao *shift* da curva, embora o XPD esteja relacionado apenas ao *shift* do modelo CI apresentando um erro relacionado ao *slope*.

Para a extensão proposta do modelo CI voltado a antenas despolarizadas, foi determinado via MMSE tanto o valor de XPD quanto de PLE , haja vista a relação dos fenômenos de propagação em relação aos dados medidos. O modelo CIX proposto é apresentado na Equação 5.3.

$$PL^{CIX}(f, d)[dB] = FSPL(f, d_0) + 10n_{v-h}\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma^{CIX} + XPD[dB] \quad (5.3)$$

Onde o XPD é o fator de perda por despolarização voltado ao *shift* e o n_{v-h} é o PLE voltado ao *slope* da curva.

Alguns autores indicam o uso do PLE obtido através de medições com antenas em co-polarização (25)(5), porém, foi observado através de modelagem que o valor de PLE obtido com antenas co-polarizadas não poderia ser utilizado pois não mostrava de forma satisfatória o comportamento do sinal. Assim, foi necessário determinar um valor de PLE para antenas em cross-polarização.

5.2.2 Modelo Floating Intercept (FI)

O modelo FI ou Alfa-Beta é usado nos padrões WINNER II e 3GPP (48) (6). Este modelo requer dois parâmetros e não considera uma âncora fisicamente baseada na potência transmitida, e tem uma forma similar a Equação 5.4:

$$PL^{FI}(d) = \alpha + 10\beta\log_{10}(d) + X_\sigma^{FI} \quad (5.4)$$

Onde α é a interceptação flutuante em dB similar ao FSPL e β é a inclinação da linha, parâmetro similar ao PLE. O sombreamento gaussiano com média zero é representado pela variável aleatória X_σ^{FI} em dB e que descreve as flutuações do sinal em larga escala sobre a perda média de propagação com a distância. Similar aos modelos CI e CIX, o melhor ajuste é feito através da solução para α e β para minimizar o desvio padrão σ . Essa minimização é feita através de MMSE.

Os valores de α e β são muito similares ao $FSPL$ e PLE do modelo CI. Isso implica que o modelo FI, que é utilizado principalmente no padrão 3GPP para as faixas de frequências abaixo de 6 GHz, pode ser usado com um desempenho adequado em bandas mmWave para sistemas 5G (49).

5.2.3 Modelo Keenan e Motley

O modelo Keenan e Motley é baseado do COST-231 e é considerado um dos mais abrangentes, pois prevê a perda tanto por paredes como por andares. Trabalha na faixa de 1.8 GHz até 5.2 GHz, o modelo é do tipo *site-specific* onde há necessidade de especificar características do cenário estudado (47), podendo ser visto na Equação 5.5.

$$L = L_0 + 10n \log_{10}(d) + \sum_{i=1}^I K_{f,i} L_{f,i} + \sum_{j=1}^J k_{w,j} L_{w,j} \quad (5.5)$$

O L_0 representa a perda de propagação a um metro da antena irradiante (dB), d é distância percorrida pelo sinal (m), n é o coeficiente de propagação, $L_{f,i}$ é a perda de propagação do sinal através do piso (dB), $K_{f,i}$ é o número de pisos com a mesma característica, $L_{w,j}$ é a perda de propagação do sinal através da parede j (dB), $K_{w,j}$ é o número de paredes com a mesma característica, I é o número de pisos atravessados pelo sinal e J é o número de paredes atravessadas pelo sinal. Os valores da perda de penetração em obstáculos são vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Perda de penetração por obstáculo (dB)

Obstáculo	1.8 Ghz	2.4 Ghz	5.2 Ghz
Concreto espesso (sem janelas)	13	17	36
Vidraça	2	13	15
Parede com janela (valor exato depende da razão entre a área de janelas e de concreto)	2 a 13	13 a 17	15 a 36

5.2.4 Modelo Multi-Wall

O modelo Multi-Wall baseia-se do modelo COST-231 Keenan e Motley. Diferenciando apenas da atenuação por andar, considerando que é uma perda não linear, Equação 5.6. Este modelo se encaixa como do tipo *site-specific* já que há a necessidade de especificar características do cenário estudado (50).

$$L = L_0 + 10n \log_{10}(d) + L_f \left[\frac{L_f + 2}{L_f + 1} - b \right] K_f + \sum_{j=1}^J k_{w,i} L_{w,i} \quad (5.6)$$

Onde o L_0 é perda de propagação a um metro da antena irradiante (dB), d é a distância percorrida pelo sinal (m), n é o coeficiente de propagação com a distância, L_f é a perda de propagação do sinal através do piso (dB), K_f é o número de pisos com a mesma característica, b é o fator de correção da atenuação dos pisos, $L_{w,i}$ é a perda de propagação do sinal através da parede j (dB), $K_{w,i}$ é o número de paredes com a mesma característica e J é o número de paredes atravessadas pelo sinal.

5.2.5 Modelo da Recomendação ITU-R P.1238-8

É um modelo *site-general* onde não há a necessidade de muita informação sobre o ambiente, sendo apenas necessário identificar o tipo de ambiente. Nesse modelo a atenuação entre o transmissor e receptor é representado por um fator na equação, e atenuação devido a obstáculos como paredes e colunas está incluso no fator de atenuação com a distância (n), o modelo atinge a faixa de 900 MHz até 100 GHz e é representado pela Equação 5.7 (51).

$$L = 20\log_{10}(f) + N\log_{10}(d) + L_f(K_f) - 28 \quad (5.7)$$

Onde f é frequência de operação (MHz), n é o coeficiente de atenuação com a distância ($N = 10 * n$), d é a distância percorrida em metros, K_f é o número de pisos (andares) atravessado e o L_f é coeficiente de atenuação por piso atravessado (dB).

As Tabelas 3 e 4 apresentam o valores de N e L_f , respectivamente.

Tabela 3 – Valores para o N

Frequência	Residência	Escritório	Comercial
900 MHz	-	33	20
1.2-1.3 GHz	-	32	22
1.8-2.0 GHz	28	30	22
4 GHz	-	28	22
5.2 GHz	-	31	-
60 GHz	-	22	17

Tabela 4 – Valores para L_f

Frequência	Residência	Escritório	Comercial
900 MHz	-	9 (1 andar) 19 (2 andares) 24 (3 andares)	-
1.2-2.0 GHz	$4n$	$15 + 4(n - 1)$	$6 + 3(n - 1)$
5.2 GHz	-	16 (1 andar)	-

5.2.6 Modelo de Canal para ambientes *indoor* definido pelo 3GPP

O modelo desenvolvido pela 3GPP, que são um conjunto de organizações com a proposta de definir um sistema global de 3G, trabalha para a predição de sinais na faixa de frequência entre 0.5 a 100 GHz. O novo relatório técnico lançado servirá como base para a modelagem de canal em ambientes *indoors* e *outdoors* da tecnologia 5G (41).

Para a modelagem de canal em 5G o modelo do 3GPP para ambientes indoors é um dos modelos bases, e é utilizado para a modelagem de outras empresas e companhias que visam a modelagem do canal 5G como o METIS, WiWEBA, IMT, COST2100, IEEE 802.11, NYU WIRELESS entre outros.

O modelo 3GPP para ambientes indoors utilizado para a modelagem 5G é descrito na Equação 5.8:

$$PL_{3GPP} = 32.4 + 17.3\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) \quad (5.8)$$

A frequência central f_c normalizada por 1 GHz, onde todos os valores relacionados à distância são normalizados em 1m, a menos que seja indicado o contrário, o N ou PLE é o coeficiente de perda com a distância que é padronizado com valor de 1.7, d_{3D} representa a distância entre Tx e Rx que varia de 1 a 100m.

5.2.7 Modelo da Recomendação ITU-R M.2083

A Recomendação ITU-R M.2083 (IMT Vision - Estrutura e objetivos gerais do desenvolvimento futuro do IMT para 2020 e além) identifica as capacidades que tornariam o IMT-2020 mais eficiente, rápido, flexível e confiável ao fornecer serviços diversos nos cenários de uso pretendidos. Os sistemas IMT-2020 são sistemas móveis que incluem as novas capacidades da IMT que vão além das da *IMT-Advanced* (52), que são as recomendações da União Internacional de Telecomunicações para a tecnologia 5G que trabalham na faixa de frequência de 6 a 100 GHz a uma distância de Tx e Rx de 1 a 150 m.

O modelo ITM-2020 para ambientes *indoors* utilizado para a modelagem 5G é descrito na Equação 5.9:

$$PL_{ITM} = 32.4 + 17.3\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) \quad (5.9)$$

A frequência central f_c normalizada por 1GHz, onde todos os valores relacionados à distância são normalizados em 1m, a menos que seja indicado o contrário, o N ou PLE é o coeficiente de perda com a distância que é padronizado com valor de 1.7, d_{3D} representa a distância entre Tx e Rx que varia de 1 a 100m.

Os sistemas IMT-2020 suportam aplicações de baixa a alta mobilidade e taxas de dados muito melhoradas de acordo com as demandas de usuários e serviços em vários ambientes de usuários. O IMT-2020 também possui recursos para permitir conexões massivas para uma ampla gama de serviços e garantir comunicações ultra confiáveis e de baixa latência para futuros serviços implantados, mesmo em ambientes críticos. As capacidades dos sistemas IMT-2020 estão sendo aprimoradas continuamente de acordo com as tendências do usuário e do setor e de acordo com os desenvolvimentos tecnológicos.

5.3 Modelos em Larga Escala de Múltipla Frequência

Modelos de múltipla frequência são utilizados para modelar vários sinais em diferentes frequências, com comprimento de onda próximo ou longe entre os sinais. Esses modelos utilizam um parâmetro a mais em seu equacionamento, responsável por regressão para as n -frequências, dizemos que tais modelos tem dependência na distância e frequência simultaneamente. Os modelos utilizados nesta tese foram o CIF e o ABG, o primeiro tendo referência física para a perda inicial devido ao $FSPL$ e é uma extensão do modelo CI, e o ABG é baseado do modelo FI ou AG.

5.3.1 Modelo *Close-In Frequency* (CIF)

O modelo CIF é uma extensão do modelo CI e tem sua formulação simples formada por dois parâmetros (f_0 e b). O modelo de perda de trajetória com dependência de frequência (CIF) é um modelo com base física por meio da perda inicial $FSPL$ com ponto de ancoragem em 1 metro (5)(53). A equação do CIF é expressa na Equação 5.10.

$$PL^{CIF} = FSPL + 10n(1 + b(f - f_0)/f_0))\log_{10}(d) \quad (5.10)$$

Onde n denota a perda de trajetória com dependência da distância, β é um parâmetro de ajuste intuitivo que representa o *slope* linear (inclinação) da perda de percurso em relação a frequência, f_0 é uma frequência de referência fixa que serve como ponto de equilíbrio ou centro da dependência de frequência linear do PLE e é baseada na média ponderada de todas as frequências representadas pelo modelo $f_0 = \sum_{k=1}^K f_k N_k / \sum_{k=1}^K N_k$, onde N_K são os números de medidas para cada frequência e f_k é o multiplicador da frequência correspondente e X_σ^{CIF} é a variável aleatória Gaussiana com média zero (em dB) que descreve as flutuações sobre a média de perda de propagação com a distância.

5.3.2 Modelo Alfa-Beta-Gama (ABG)

Um modelo de três parâmetros de múltiplas frequências conhecido como modelo alfa-beta-gama (ABG) inclui um termo dependente da frequência e dependente da dis-

tância para descrever a perda de caminho em várias frequências (5), (46), (54) e (53). A equação do CIF é expressa na Equação 5.11.

$$PL^{ABG} = 10\alpha \log_{10}(d) + \beta + 10\gamma \log_{10}(f) + X_{\sigma}^{ABG} \quad (5.11)$$

Onde α e γ são parâmetros de perda de percurso dependente da distancia e frequência respectivamente, β é um parâmetro de otimização sem significado físico, f é a frequência em GHz e X_{σ}^{ABG} é a variável aleatória Gaussiana com média zero e desvio padrão σ que representa o sombreamento em larga escala das flutuações sobre a média da perda de percurso com a distância. O modelo multi frequência ABG é uma extensão do modelo FI, os parâmetros α , β e γ são determinados simultaneamente por meio do MMSE. O parâmetro α é similar ao PLE do CI, Assim como o β é similar ao FSPL.

5.4 Proposta de Modelos de propagação para as frequências de 8, 9, 10 e 11 GHz

Esta tese tem como objetivo apresentar modelagens em larga escala para as frequências de 8 GHz à 11 GHz, utilizando os modelos CI, FI, CIX, CI-HH, CIF e ABG.

Como visto na Equação 5.1, o modelo CIX utiliza um fator de atenuação ótimo (XPD) e o n_{v-v} (PLE_{CI}) como em (25), no entanto o n_{v-v} não tem melhor representação dos dados com antenas cross-polarizadas V-H além de apresentar valores distintos ao encontrado para antenas co-polarizados V-V. Assim, para o CIX será usado o PLE respectivo para esses tipos de polarização cruzada, definido por n_{v-h} . O modelo visto na Equação 5.12 descreve as variações em larga escala da potência do sinal com a distância entre o Tx e Rx utilizando antenas cross-polarizadas V-H.

$$PL^{CIX}(f, d_0)[dB] = FSPL(f, d_{04}) + 10n_{v-H} \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}^{CIX} + XPD[dB] \quad (5.12)$$

Outra contribuição desta tese é a modelagem utilizando medições com polarização H-H, propondo uma extensão para o modelo CI. Para este caso é calculado um valor de PLE para a polarização H-H similar ao XPD e definido por MMSE. O modelo é visto na Equação 5.13.

$$PL^{CI_{HH}}(f, d_0)[dB] = FSPL(f, d_{04}) + 10n_{H-H} \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}^{CI_{HH}} \quad (5.13)$$

Onde o n_{H-H} representa o fator de atenuação com a distância (PLE) co-polarizado horizontalmente. E $X_{\sigma}^{CI_{HH}}$ é uma variável aleatória Gaussiana com média zero e desvio padrão em dB.

Para a perda por tipos de paredes, foi definido um parâmetro referente aos tipos de paredes $OPLE_i$ e outro para o número de paredes np_i . Esta extensão foi desenvolvida a partir do modelo CI. A extensão do modelo para obstrução é vista na Equação 5.14.

$$PL^{OLoS}(f, d_0)[dB] = FSPL(f, d_0) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}^{CIx} + \sum_{i=1}^i OPLE_i(np_i) \quad (5.14)$$

Onde $OPLE$ é o expoente de perda por obstrução (*Obstruction Path Loss Exponent*) e np corresponde a quantidade de obstáculos do mesmo tipo. Esse parâmetro é baseado no modelo COST-231 Motley-Keenan (47). Ressalta-se que as modelagens feitas para perda por paredes, as antenas estavam em co-polarização vertical, assim o PLE utilizado foi o n_{vv} .

Para a modelagem multi frequência, foram utilizados os modelos CIF e ABG utilizando todas as frequências e estudando a dependência de frequência dentro da banda estudada. Essa análise possui relevância devido a facilidade de aproximação simultaneamente de todas as frequência no qual foi modelada.

5.5 Considerações finais

Uma breve abordagem de alguns modelos de propagação *indoor* mais utilizados na literatura, e apresentou os modelos propostos para as frequências de 8 GHz até 11 GHz.

6 Metodologia e Cenários

6.1 Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados os equipamentos utilizados, os cenários das campanhas de medições e a metodologia para o desenvolvimento da tese.

6.2 Equipamentos de medições

Para as campanhas de medições foram usados no transmissor (Tx) um gerador de sinal HEWLETT PACKARD 83752A que gera sinais de 01 GHz a 20 GHz, e para o receptor (Rx) o *Signal Analyzer* ANRITSU MS2692A com um range de frequência 50 Hz a 26.5 GHz. As antenas utilizadas no experimento são direcionais do tipo *horn* com ganho de 15 dBi, elevação de 29.3° e azimute de 29° para as frequências de 8 até 11 GHz. Para as medições com antenas em co-polarizações foram utilizados 0 dBm de potência de transmissão e para as medições com antenas em cross-polarização potência de transmissão de 15 dBm.

A Figura 6 mostra o esquema de medição com os equipamentos e a Tabela 5 apresenta as especificações do sistema de medições.

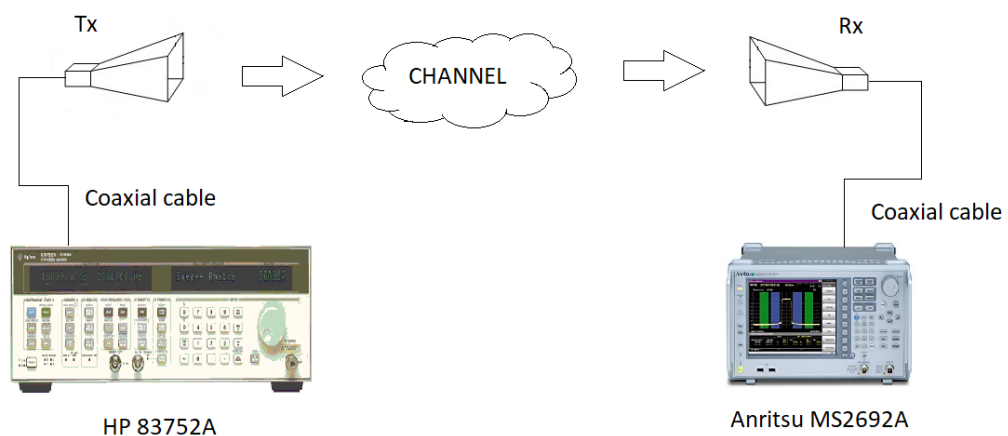


Figura 6 – Arquitetura de medições para sondagem de canal.

Tabela 5 – Setup da campanha de medições para 8, 9, 10 E 11 GHz

Parâmetros	Configurações
Frequências	8, 9, 10 e 11 GHz
Transmissão de Sinal	Onda Contínua
Antenas Tx/Rx	<i>Horn</i>
Potência de transmissão	VV/HH - 0 dB VH - 15 dB
Ganhos Tx/Rx	15 dBi
Elevação Tx/Rx	29,3°
Azimute Tx/Rx	29°
Altura Tx/Rx	1,5 m
Polarização Tx	V
Polarização Rx	V/H

6.3 Cenários e campanhas de medições

As campanhas de medições foram realizadas dentro da Universidade Federal do Pará (UFPA), no prédio em anexo aos laboratórios de engenharia elétrica, em um corredor e em um dos laboratório de informática. Os ambientes confinam o sinal levando a diversos fenômenos físicos, influenciando assim no sinal recebido. O corredor tem paredes de alvenaria, piso de concreto com lajotas, portas de madeira, grades de ferro e extintor de incêndio, Figura 7. O laboratório tem uma parede de alvenaria com janelas de vidro e grades, uma parede de alvenaria completamente fechada, uma parede de madeira com uma janela de vidro e porta de madeira e outra parede de madeira completamente fechada, Figura 8. Para todas as medições as antenas de transmissão (Tx) e recepção (Rx) estavam a 1.5 m de altura referente ao chão.



Figura 7 – Ambiente de medição no corredor.



Figura 8 – Ambiente de medição no laboratório.

6.3.1 Corredor

A primeira campanha de medição foi feita no corredor, Figura 9, onde o transmissor (Tx) ficou fixo com uma das antenas *horn* em co-polarização vertical a dois metros da parede final e no centro do corredor em relação à largura, os pontos de recepção com a antena receptora (Rx) *horn* em polarização vertical ficaram posicionados no centro do corredor em relação à largura. Foram coletadas 100.010 amostras de potência para cada metro. Foram medidos 15 pontos para 8 e 9 GHz, 14 pontos para 10 GHz e 10 pontos para 11 GHz para a co-polarização (V-V).

A segunda campanha de medição foi realizada usando a mesma metodologia que foi aplicado na primeira campanha, no entanto as antenas estavam em cross-polarização (V-H), a potência de transmissão (P_t) estava setado em 15 dB. A quantidade de amostras coletados por pontos foram as mesmas da primeira campanha. Para polarização cruzada foram medidos 15 pontos para 8 GHz, 9 pontos para 9 GHz e 8 pontos para 10 e 11 GHz.

As campanhas de medições no corredor, V-V e V-H respectivamente, foram usadas apenas um transmissor (Tx) com elevação e azimute em 0° , o todas as posições do Rx estavam com elevação e azimute em 0° .

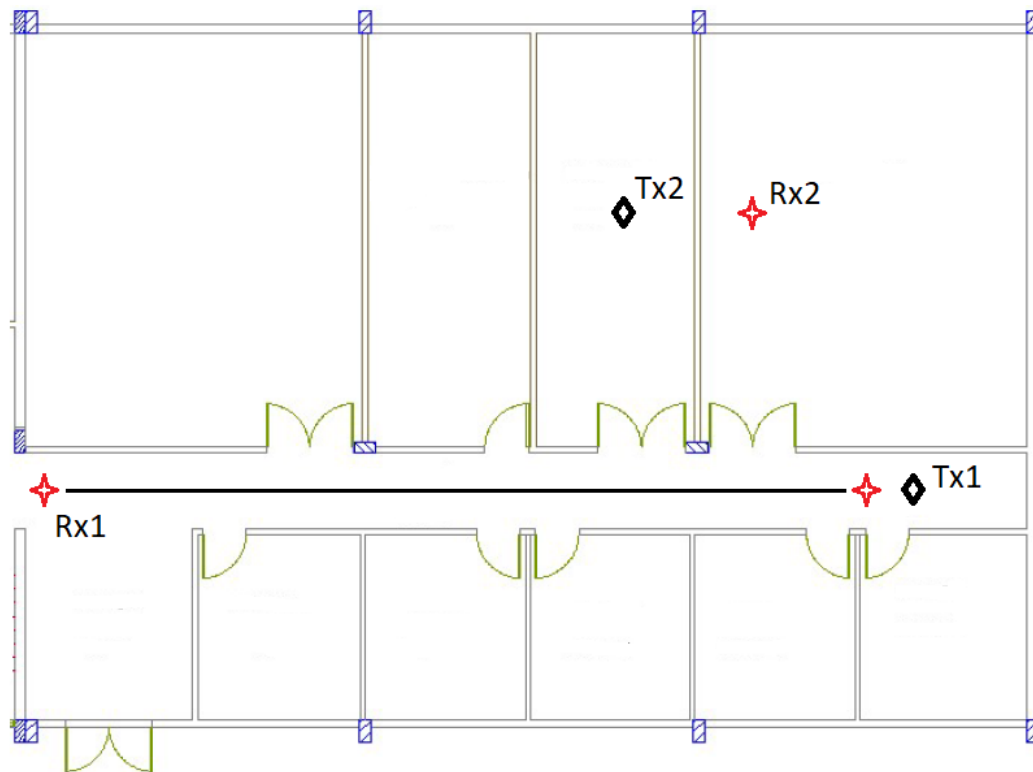


Figura 9 – Esquema de medição no corredor.

6.3.2 Laboratório de informática

A terceira e a quarta campanha foram realizadas no laboratório, visto na Figura 10, para todas as frequências foi usada a média das radiais para as polarizações V-V e H-H. O transmissor (Tx) foi fixado no centro do laboratório e o receptor foi movido ao passo de 1 metro até 12 metros. Foram coletadas 100.010 amostras de potência para cada metro. Para todas as frequências foram coletados 12 pontos, para as polarizações V-V e H-H.

As campanhas de medições no laboratório, em V-V e H-H, tiveram 3 Tx posicionados, no centro e nos cantos da sala, com azimute e elevação a 0° , os receptores Rx foram posicionados de forma idêntica para as três radiais, também com elevação e azimute a 0° .

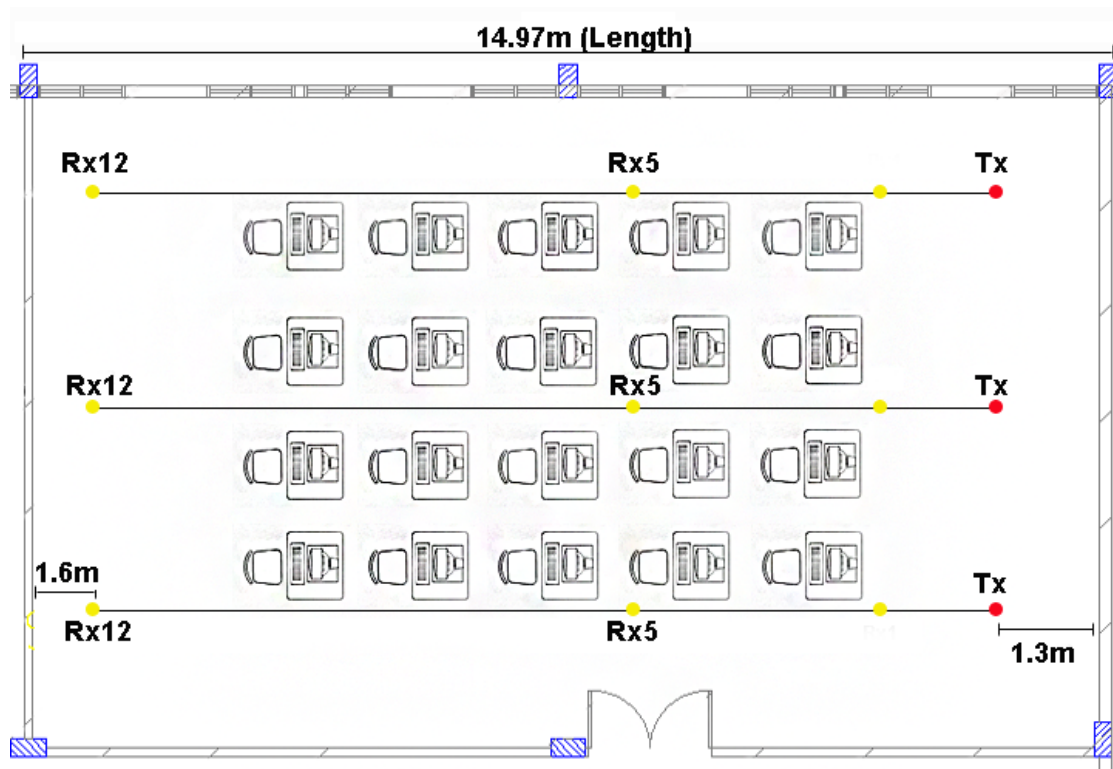


Figura 10 – Esquema de medição no laboratório.

6.3.3 Campanhas de medições NLoS

A quinta campanha consistiu em coletar dados ao atravessar paredes ou obstáculos, sem visada direta e com obstrução total. Essa campanha foi realizada no corredor e no laboratório, pois o corredor possuía paredes de alvenaria e o laboratório paredes de madeira e vidro. Para esta situação, foram usadas antenas *horns* direcionais co-polarizadas (V-V) e potência de transmissão de 0 dB.

A refração sofrida pode gerar perdas de propagação, essas perdas são distintas de acordo com o comprimento de onda e com o material atravessado, isto é, a onda percorre o ar, refrata no obstáculo e refrata novamente ao voltar para o ar. No experimento, foram usados três materiais: vidro, madeira e alvenaria. A antena transmissora (Tx) e receptora (Rx) ficaram a 1 metro de distância do obstáculo, como mostra a Figura 9 (Tx2 e Rx2). As medições para NLOS foram realizadas nos dois ambientes, e as antenas Tx e Rx estavam a 1,5 m acima do chão com elevação e azimute 0° .

6.4 Considerações finais

Neste capítulo foi abordado o ambiente de medição, estratégias para medições, tratamento de dados e equipamentos utilizados para coleta de dados.

7 Análise em Larga escala para Modelos de Perda

7.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os resultados referente aos modelos propostos. Será apresentado também algumas métricas estatísticas, valores de PLE, modelos com sombreamento representado por variáveis aleatórias e valores de perda por parede.

7.2 Análise e resultados

Foram realizadas campanhas de medições em 8, 9, 10 e 11 GHz afim de usar modelos de *path loss* em ambientes *indoor*. É feito a análise e a aproximação da perda do sinal em situações LOS e NLOS utilizando o modelo CI e o CIX no qual adiciona o parâmetro de perda por antenas cross-polarizados. Foram analisados dois ambientes diferentes para quatro frequências, 8, 9, 10, e 11 GHz. No primeiro caso é feito a análise em polarização V-V e polarização cruzada V-H, e no segundo caso em co-polarização V-V e H-H.

Para o primeiro ambiente (corredor), foram medidos 15 pontos para 8 e 9 GHz, 14 pontos para 10 GHz e 10 pontos para 11 GHz em co-polarização (V-V). Para polarização cruzada, 15 pontos para 9 GHz, 9 pontos para 9 GHz e 8 pontos para 10 e 11 GHz. Para o segundo ambiente (laboratório), para todas as frequências foram coletados 12 pontos, para as polarizações V-V e H-H. Onde cada Tx estava relacionado por radial com doze (12) Rx, para a análise dos modelos e comportamento dos dados medidos, foi utilizado a radial central (média), pois apresenta o comportamento médio das três radiais.

É aplicado o modelo CI e suas extensões que adicionam um parâmetro de perda por polarização cruzada XPD , por polarização combinada H-H e perda por obstáculos $OPLE$. Utilizando o MMSE foi possível determinar os parametros PLE , PLE_{hh} , o $OPLE$, XPD e o sombreamento. Além de apresentar abordagem multi frequência com polarização V-V em linha de visada direta, com os modelos CIF e ABG. A performance dos modelos e valores de PLE e desvio padrão (σ) encontra-se na Tabela 6 e os valores de perda por obstáculos (OPLE) encontra-se na Tabela 7.

Tabela 6 – Parâmetros dos modelos de perda *single* e *multi* frequência

Ambiente	Freq.	FSPL/ β				PLE/ γ						α/β		σ (dB)			XPD (dB)		
		CI	FI	CIF	ABG	CI	FI	CI	CIX	CIF	ABG	CIF	ABG		FI	CIF		ABG	
Corredor	8 GHz	50.62	50.68	50.62		2.04	2.0	-	0.65						1.89	1.8	2.22	2	19.3
	9 GHz	51.61	53.59	51.61	49.11	2.16	1.9	-	1.59	2.07	1.8	-0.95	0.47		2.58	2.5	3.57	3.55	28.7
	10 GHz	52.44	55.94	52.44		1.93	1.55	-	0.08						2.41	2.0	2.4	2.2	21.3
	11 GHz	53.35	55.62	53.35		1.73	1.44	-	0.52						2.19	1.9	2.18	2.29	14.3
Laboratório	8 GHz	50.62	50.68	50.62		2.15	2.13	2.56	-						1.18	1.1	1.17	1.17	-
	9 GHz	51.61	53.59	51.61	29.3	2.17	2.09	1.79	-	2.18	2.1	0.1	2.39		1.51	1.5	1.51	1.49	-
	10 GHz	52.44	55.94	52.44		2.07	1.98	1.81	-						0.81	0.7	1.02	0.85	-
	11 GHz	53.35	55.62	53.35		2.28	2.19	1.73	-						1.36	1.3	1.34	1.37	-

7.2.1 Análise no corredor

As Figs. 11, 12, 13 e 14 mostram a análise dos dados medidos no corredor comparando-os com os modelo CI, FI e 3GPP para as frequências em análise em condições LOS com antenas direcionais co-polarizadas (V-V) em escala logarítmica. A inclinação da curva representada pelo PLE mostra até que ponto o sinal é atenuado com a distância.

Para comparar a acurácia dos modelos propostos, CI e FI, foi feita uma comparação com o modelo 3GPP, calculando os desvios padrão em relação aos dados medidos. Os valores de desvio padrão no modelo CI foram: 1,89, 2,58, 2,41 e 2,19; para o modelo FI os valores foram: 1,88, 2,51, 2,03 e 1,99; para o modelo 3GPP os valores de desvio foram: 2,10, 2,59, 2,12 e 2,19 referente as frequências 8, 9, 10 e 11 GHz, respectivamente. Este resultado mostra que os modelos CI e FI apresentam uma boa aproximação aos dados medidos e maior eficiência em relação ao modelo 3GPP.

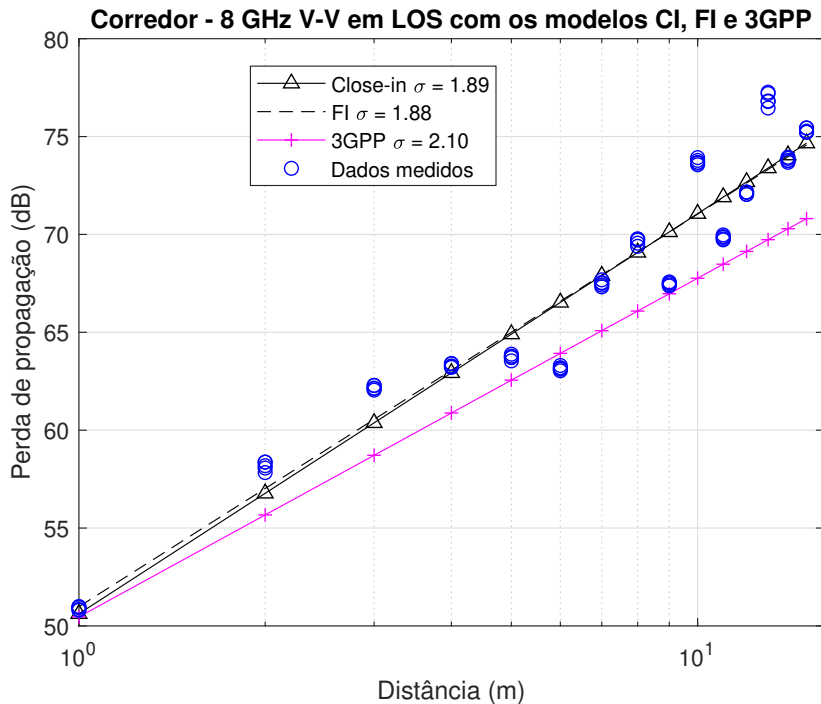


Figura 11 – Modelo CI, FI e 3GPP utilizando antenas direcionais para 8 GHz.

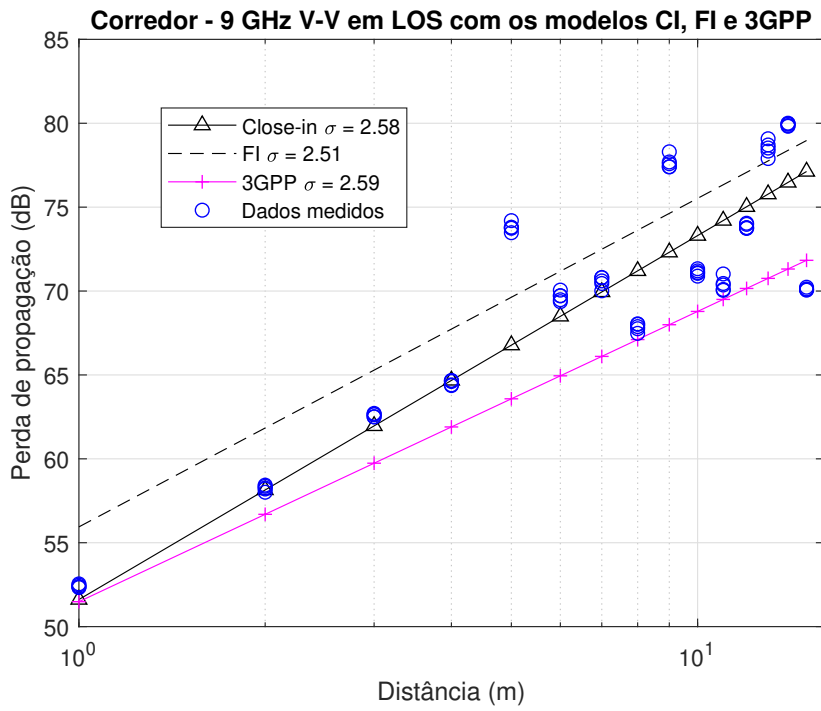


Figura 12 – Modelo CI, FI e 3GPP utilizando antenas direcionais para 9 GHz.

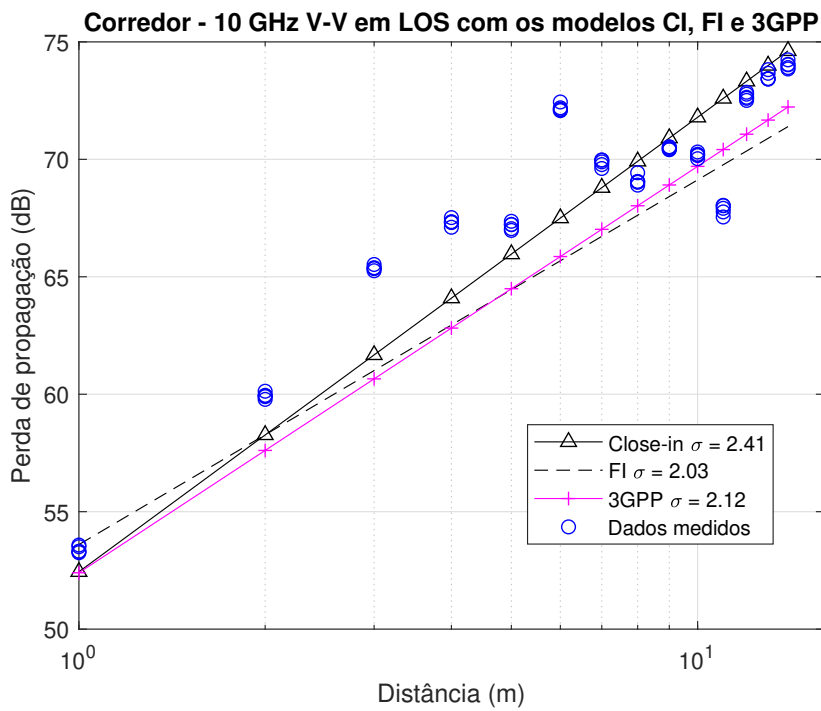


Figura 13 – Modelo CI, FI e 3GPP utilizando antenas direcionais para 10 GHz.

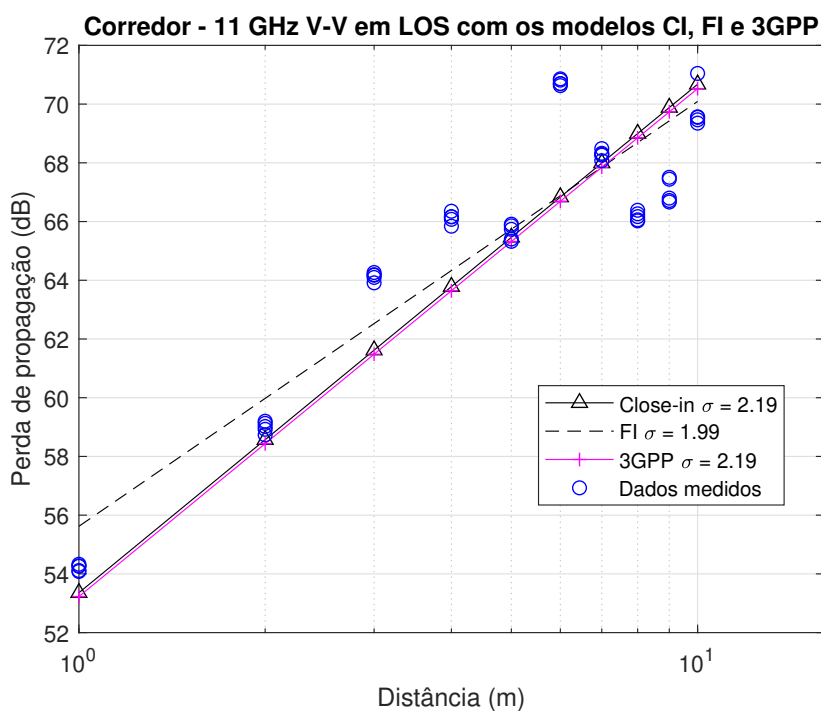


Figura 14 – Modelo CI, FI e 3GPP utilizando antenas direcionais para 11 GHz.

O modelo 3GPP apresenta valor de PLE igual a 1,73 para uma larga faixa de frequência (0,5 - 100 GHz) e considera apenas ambiente do tipo escritório (41). Os modelos propostos apresentam uma faixa de PLE para as quatro frequências estudadas variando de 1,73 - 2,16 para o corredor considerando que o ambiente influencia os mecanismos de propagação e conseqüentemente na potência recebida.

Como mostrado na Tabela 5 e nas Figs. 11, 12, 13 e 14 o PLE tem uma influência direta no desvio padrão dos dados médios medidos, bem como na atenuação do sinal com a distância. As Figuras 11 e 12, mostram valores mais altos de PLE e desvio padrão em relação às Figuras 13, 14.

Afim de comparar os resultados obtidos, usou-se o trabalho (23) no qual realiza modelagem em larga escala utilizando CW nas frequências 14 e 22 GHz, os valores de PLE determinados, referente à altura do Tx e Rx próximas a utilizada neste trabalho, resultou em 1,7 e 1,6 para 14 GHz e 22 GHz respectivamente.

As campanhas de medições utilizando antenas com polarização cruzada V-H no corredor, apresentaram grande perda no sinal recebido. As Figs. 15, 16, 17 e 18 ilustram as análises dos dados medidos no corredor com o modelo CIX para as frequências 8, 9, 10, 11 GHz, em condições LOS. De acordo com a Tabela 5 e as curvas vista nas Figs. 15, 16, 17 e 18 os valores de PLE são menores em relação as medições co-polarizadas V-V para o mesmo ambiente.

As Figs. 16, 17 e 18 apresentam uma perda inicial menor sobre o comportamento

médio dos dados medidos em relação a Fig. 15, esses comportamentos dos dados acontecem devido aos mecanismos de propagação como por exemplo as reflexões. Este evento é particular ao ambiente onde foram realizadas as medições (corredor), pois existem diversos refletores descrito no capítulo 6.

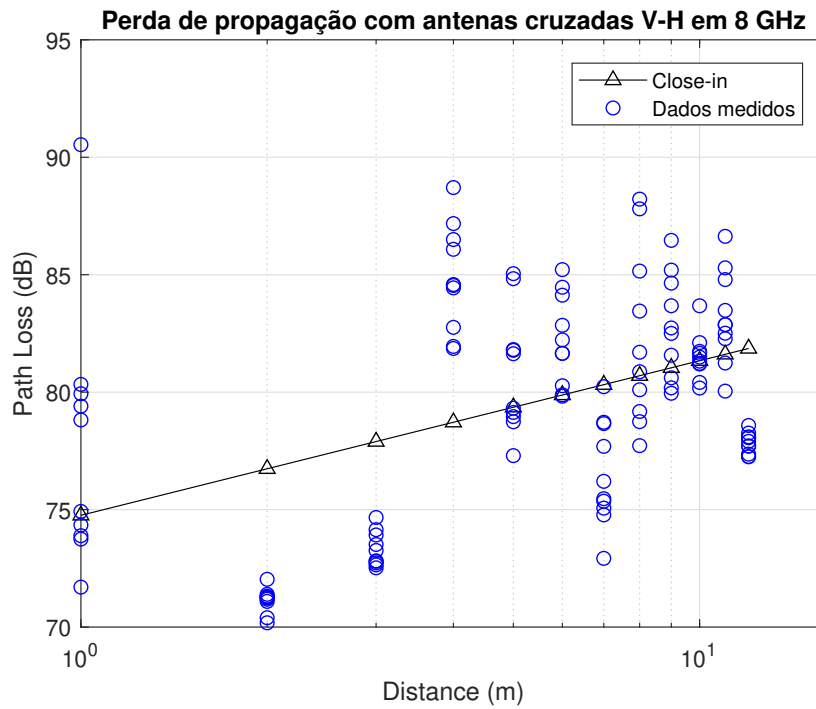


Figura 15 – Modelo CIX utilizando antenas direcionais para 8 GHz.

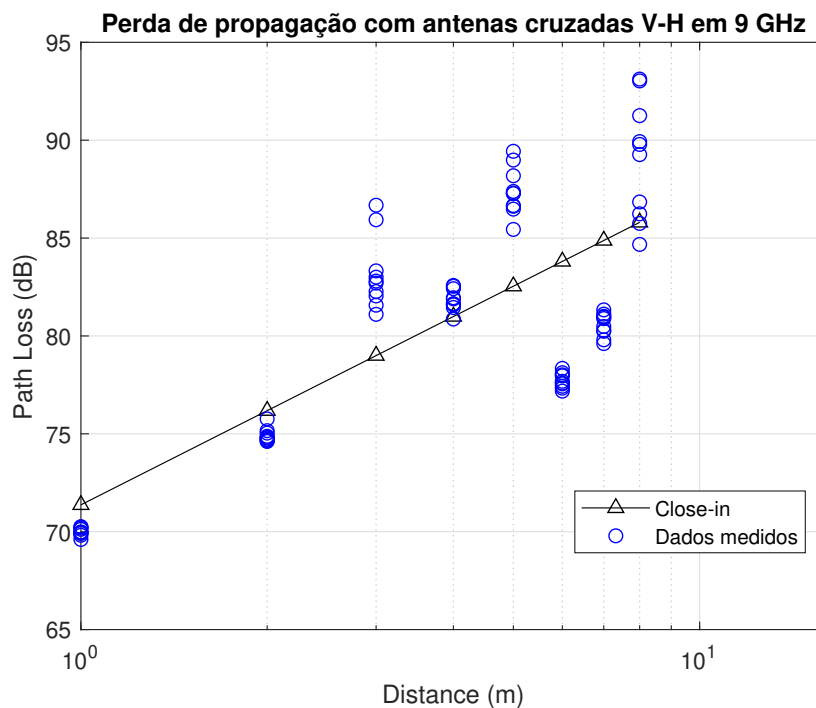


Figura 16 – Modelo CIX utilizando antenas direcionais para 9 GHz.

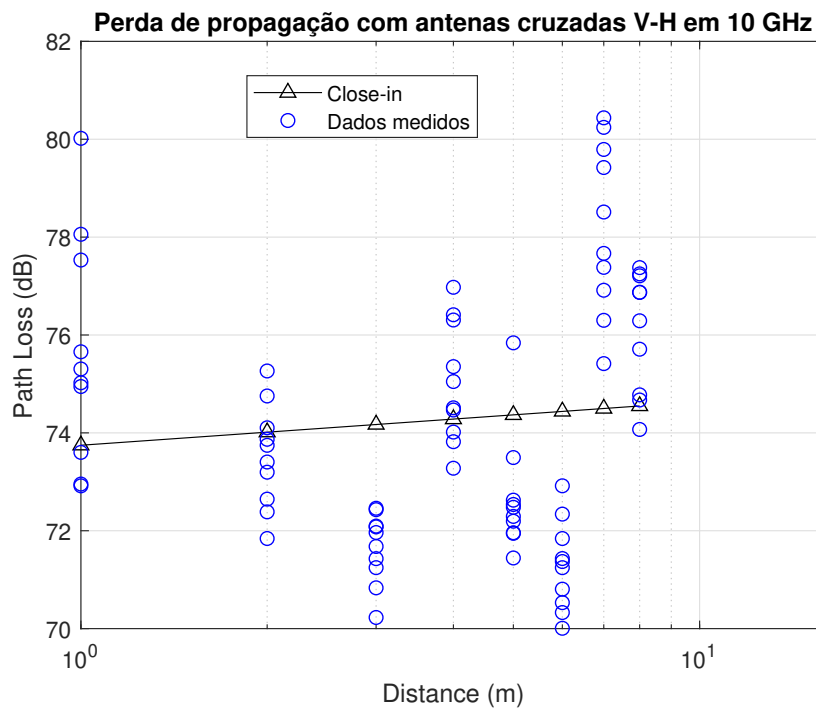


Figura 17 – Modelo CIX utilizando antenas direcionais para 10 GHz.

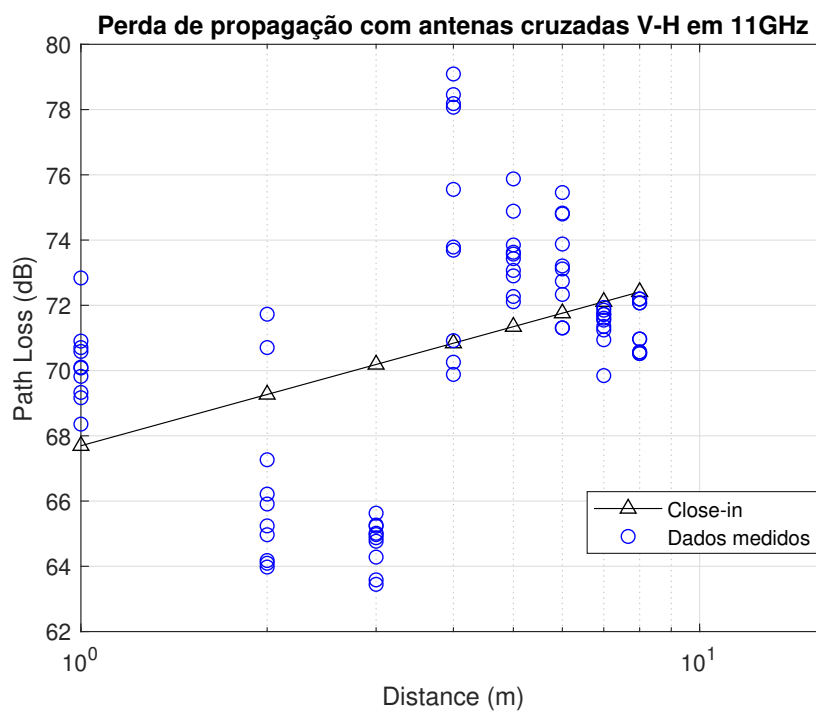


Figura 18 – Modelo CIX utilizando antenas direcionais para 11 GHz.

Os resultados obtidos através dos dados medidos, visto na Tabela 5, são semelhantes aos parâmetros de artigos encontrados na literatura. O artigo (25) faz modelagem de *single-frequency* e *multi-frequency* em grande escala para as frequências de frequência de 28 GHz e 73 GHz dentro de um escritório. Os resultados para a análise *single-frequency*

para o parâmetro PLE foram de 1,7 e 1,6 para 28 GHz e 73 GHz respectivamente. Analisando o parâmetro XPD levando em consideração que as antenas cruzadas obtiveram valores de 24,7 e 31,4 para 28 GHz e 73 GHz respectivamente.

Analisando os resultados apresentados no trabalho (25) em comparação a outros visto em trabalhos correlatos, verificou-se que os valores dos parâmetros apresentados nesta tese são próximos aos encontrados na literatura, mesmo para casos que a grande diferença no comprimento de onda entre as frequências estudadas, como o caso de 10 GHz e 73 GHz que apresentou valores de PLE muito próximos.

Uma abordagem importante em relação aos dados medidos é realizar um levantamento estatístico através do desvio padrão. Esta análise mostra até que ponto o sinal varia ponto-a-ponto e na média. O desvio padrão ponto-a-ponto foi calculado sobre os dados medidos com o objetivo de determinar a variação do sinal para cada metro percorrido entre o Tx e o Rx para os diferentes ambientes e polarizações V-V, H-H e V-H. Já o desvio padrão na média está associado ao comportamento total do sinal com a distância assim como *PLE*.

A Figura 19 mostra o comportamento do desvio padrão ponto-a-ponto em LOS para o corredor nas frequências de 8, 9, 10 e 11 GHz em V-V. Deve-se notar que há baixa variabilidade nos valores do desvio padrão observados no eixo Y, 0 a 0,7 dB, está relacionada com a polarização. Em outras palavras, há uma pequena variação nos valores de potência recebida pois a maior contribuição está no raio direto.

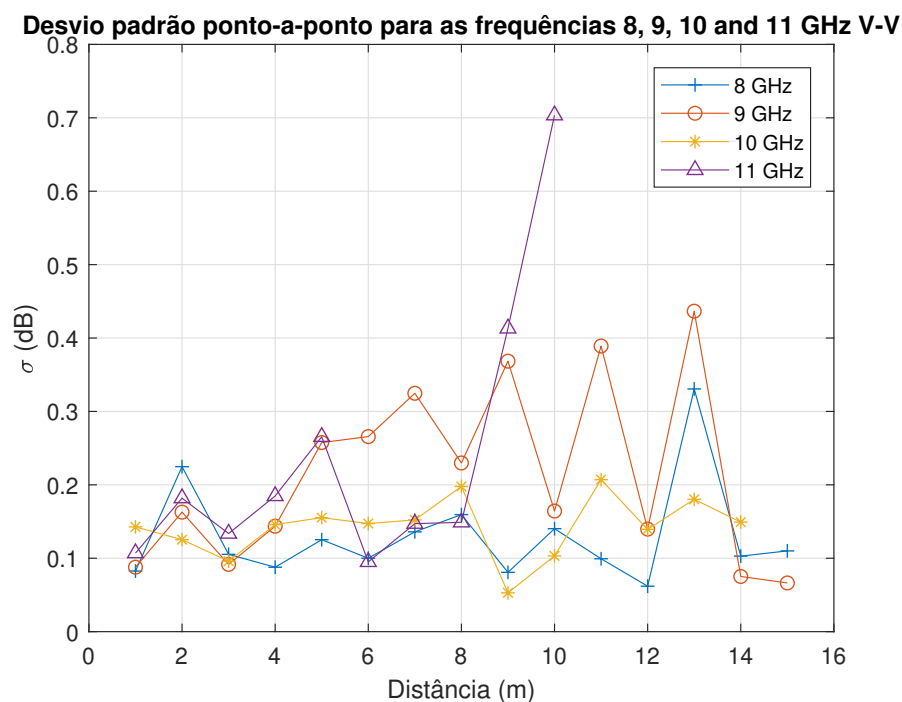


Figura 19 – Desvio padrão ponto-a-ponto dos dados medidos no corredor para frequências 8, 9, 10 e 11 GHz no corredor para antenas V-V.

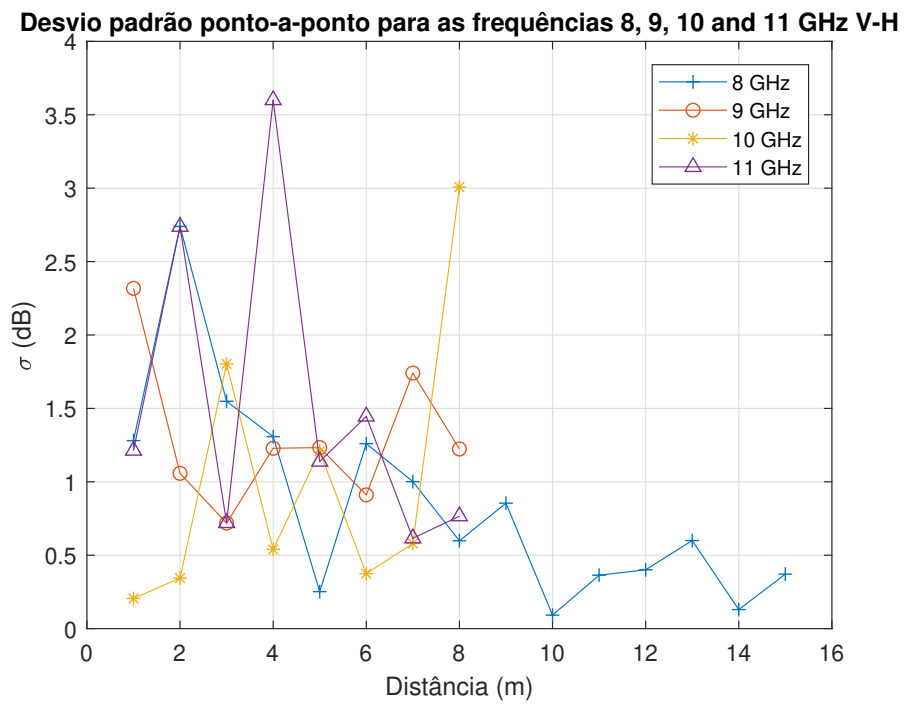


Figura 20 – Desvio padrão ponto-a-ponto dos dados medidos no corredor para frequências 8, 9, 10 e 11 GHz no corredor para antenas V-H.

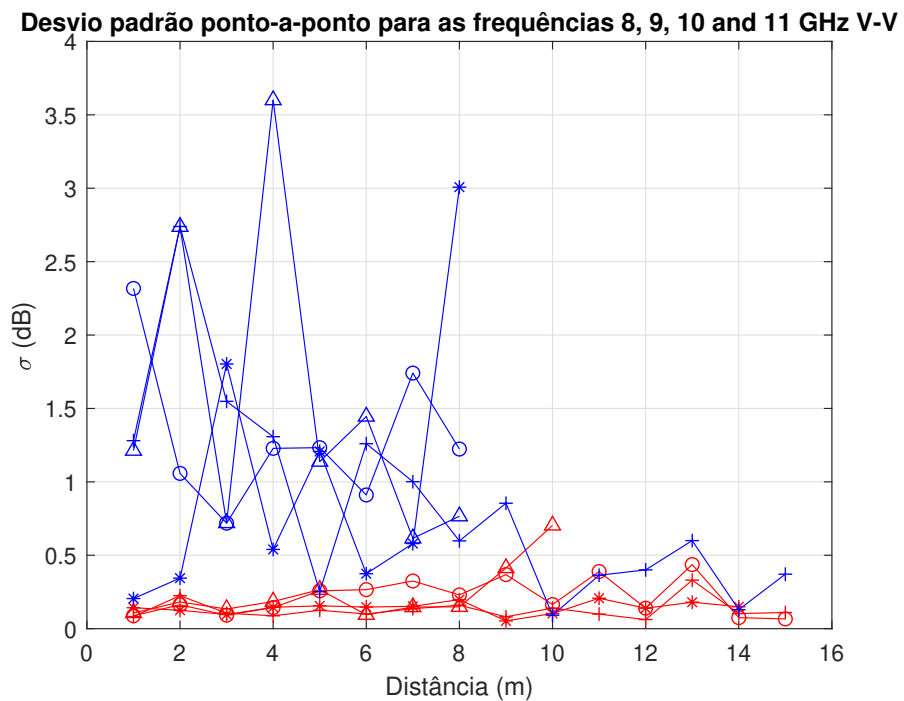


Figura 21 – Desvio padrão ponto-a-ponto dos dados medidos no corredor para frequências 8, 9, 10 e 11 GHz no corredor para V-V (dados em vermelho) e V-H (dados em azul).

A mesma metodologia foi utilizada para antenas com polarização cruzada (V-H). A Figura 20 mostra as variações no desvio padrão para cada ponto medido (podendo ser visto

no eixo Y), variando de 0 a 3,5 dB. Existe maior variabilidade dos dados medidos quando as antenas estão com polarização cruzada (V-H), devido a ortogonalidade dos vetores dos campos nas polarizações vertical e horizontal. A Figura 21 mostra a diferença no desvio padrão ponto-a-ponto entre antenas polarizadas (vermelho) e cruzadas (azul), exibindo o desvio padrão ponto-a-ponto para as polarizações e para as frequências simultaneamente.

Quando o desvio padrão médio, Tabela 5, e o desvio ponto-a-ponto são avaliados, observa-se que o desvio padrão médio é maior para a polarização V-V em relação ao V-H, enquanto o desvio padrão ponto-a-ponto para polarização V-V obteve valores menores que os do V-H (Figura 21). O desvio padrão médio está associado ao PLE, enquanto que o desvio padrão ponto-a-ponto está relacionado à polarização das antenas.

Para melhor compreender a variabilidade do sinal para a polarização cruzada (V-H), utilizou do artifício estatístico apresentado através de BOXPLOT, onde podemos verificar informações como desvio padrão por ponto, média, máximo e mínimo, percentile e *outliers*. Tais análises são encontradas nas Figs. 22, 23, 24 e 25.

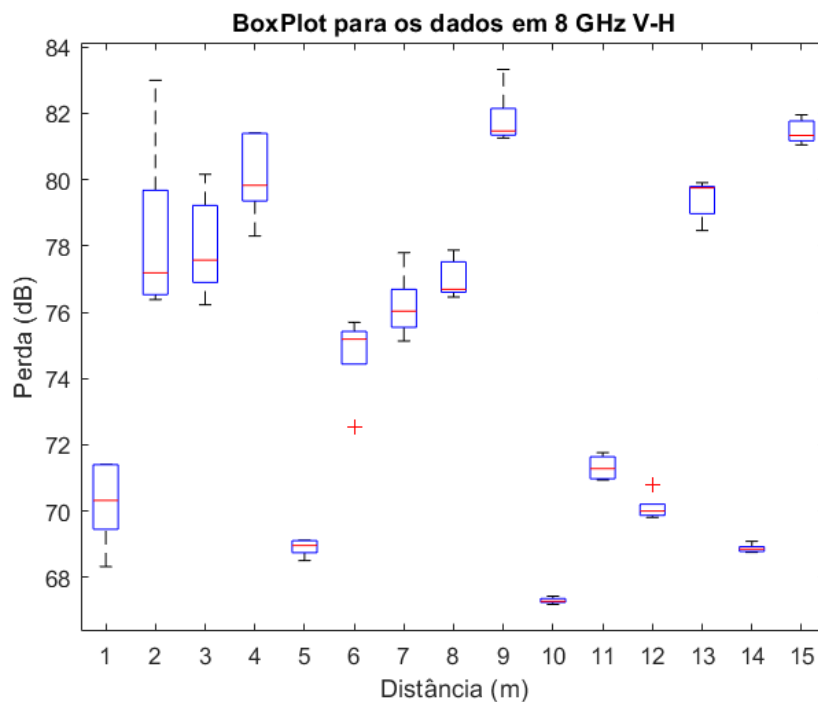


Figura 22 – Análise estatística dos dados medidos em V-H na frequência de 8 GHz.

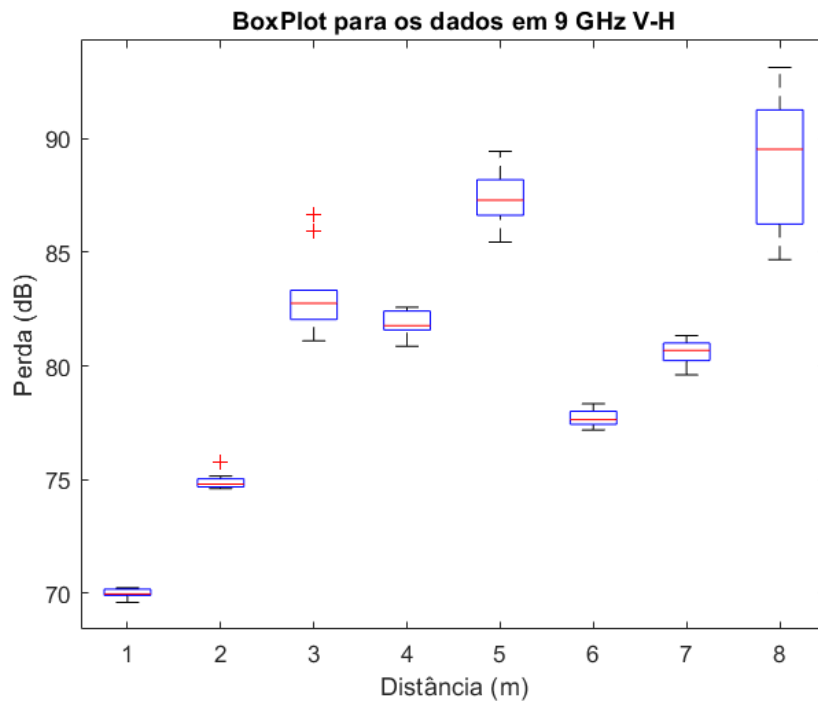


Figura 23 – Análise estatística dos dados medidos em V-H na frequência de 9 GHz.

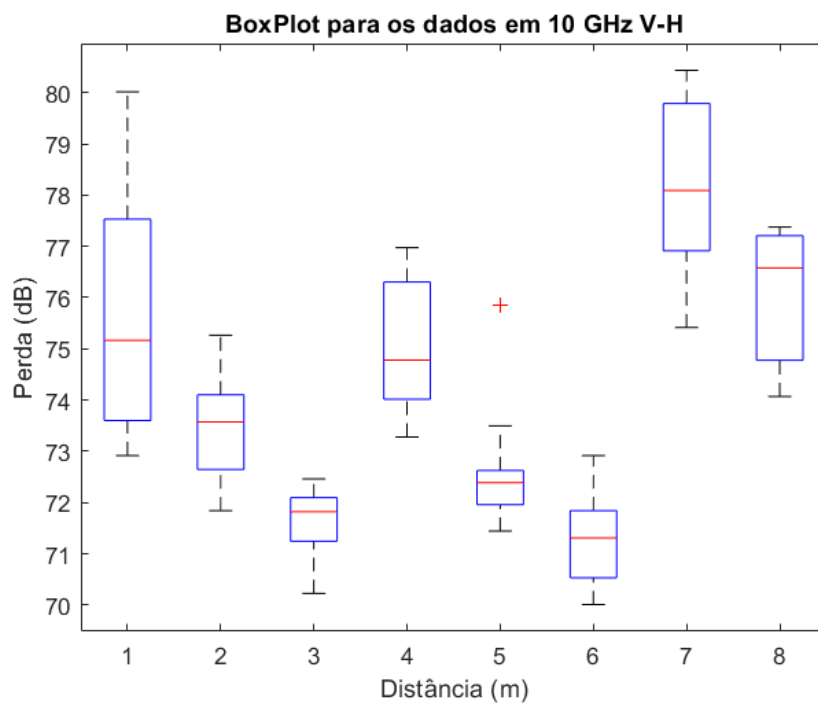


Figura 24 – Análise estatística dos dados medidos em V-H na frequência de 10 GHz.

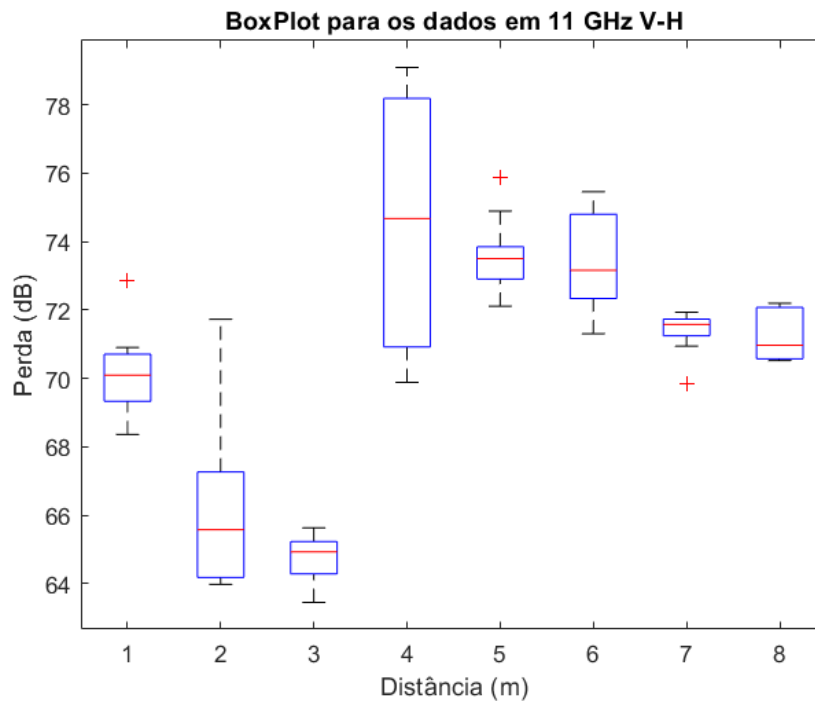


Figura 25 – Análise estatística dos dados medidos em V-H na frequência de 11 GHz.

Observa-se que os dados apresentados complementam a análise do desvio padrão ponto-a-ponto e o desvio padrão médio, além de mostrar os *outliers*, e valores médios para cada ponto.

A análise sobre a variabilidade do canal em larga escala é definido pelo efeito de somreamento e representada por uma variável aleatória Gaussiana definida no modelo CI (5.1). A Figura 26 apresenta o efeito de somreamento para antenas direcionais copolarizadas (V-V) no corredor para as frequências 8, 9, 10 e 11 GHz. É possível notar que o modelo CI tem uma boa aproximação sobre os dados medidos, além de verificar a variabilidade do sinal entre o Tx e Rx.

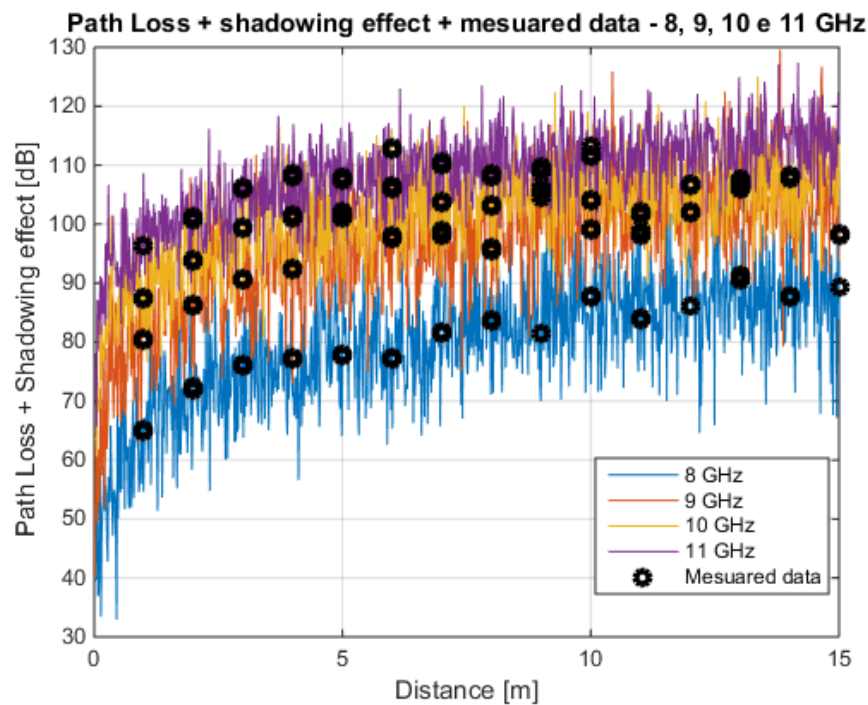


Figura 26 – Modelo de perda CI e sombreamento para as frequências 8, 9, 10, 11 GHz sobre os dados medidos do corredor utilizando antenas V-V.

7.2.2 Análise no laboratório

As Figs. 27, 28, 29 e 30 mostram a análise dos dados medidos no laboratório e do comportamento dos modelos para as frequências 8, 9, 10 e 11 GHz em condições LOS copolarizados V-V. De acordo com a Tabela 6 e as Figs. 27, 28, 29 e 30 mostram o valor e a inclinação do PLE para o modelo CI, além de verificar o desvio padrão dos dados medidos. De forma análoga ao estudo no corredor é feita uma comparação entre os modelos CI, FI e 3GPP em relação aos dados medidos, analisando os valores determinados PLE do CI e FI em relação ao valor do PLE definido pelo 3GPP.

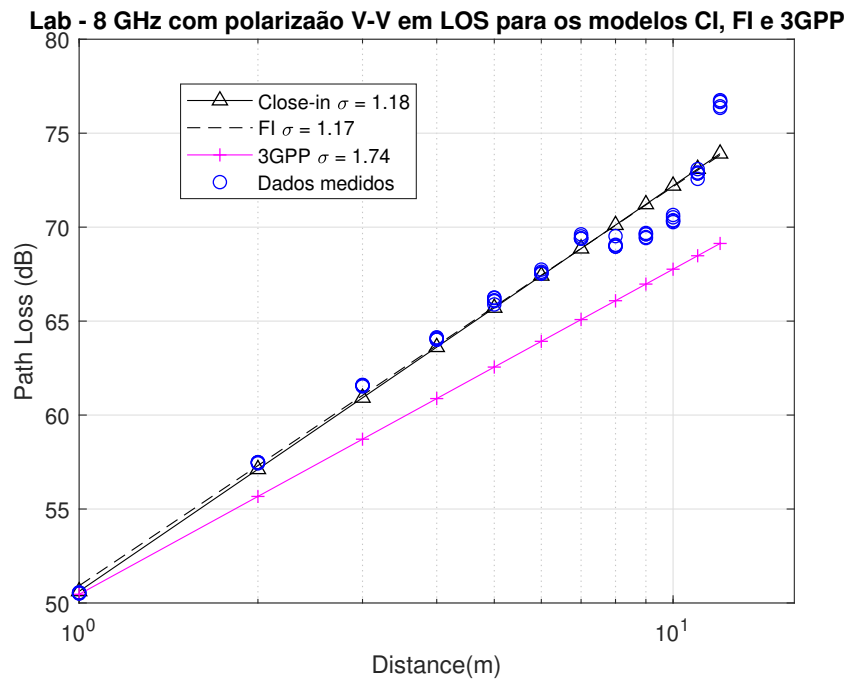


Figura 27 – Modelo CI utilizando antenas direcionais V-V para 8 GHz no lab.

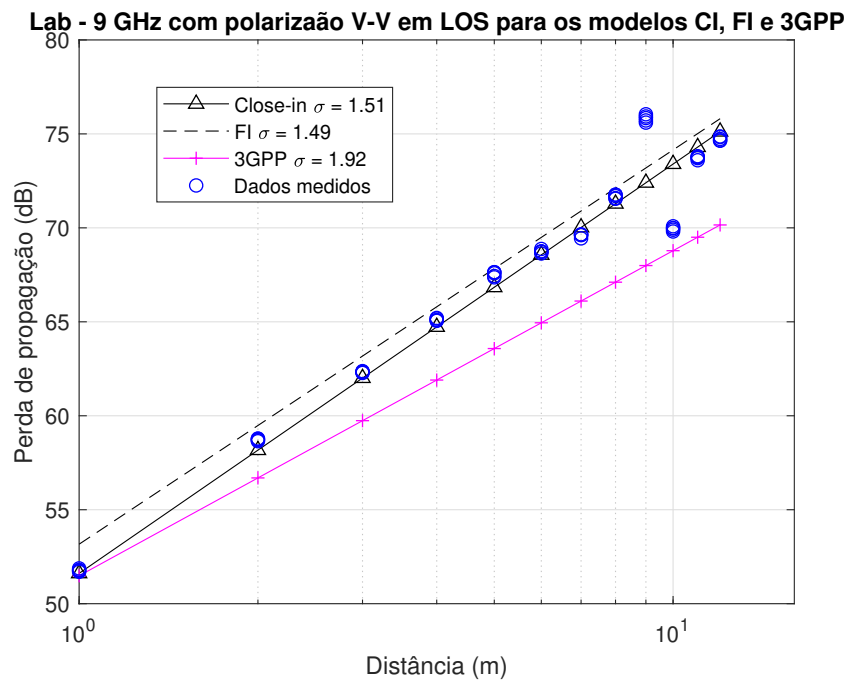


Figura 28 – Modelo CI utilizando antenas direcionais V-V para 9 GHz no lab.

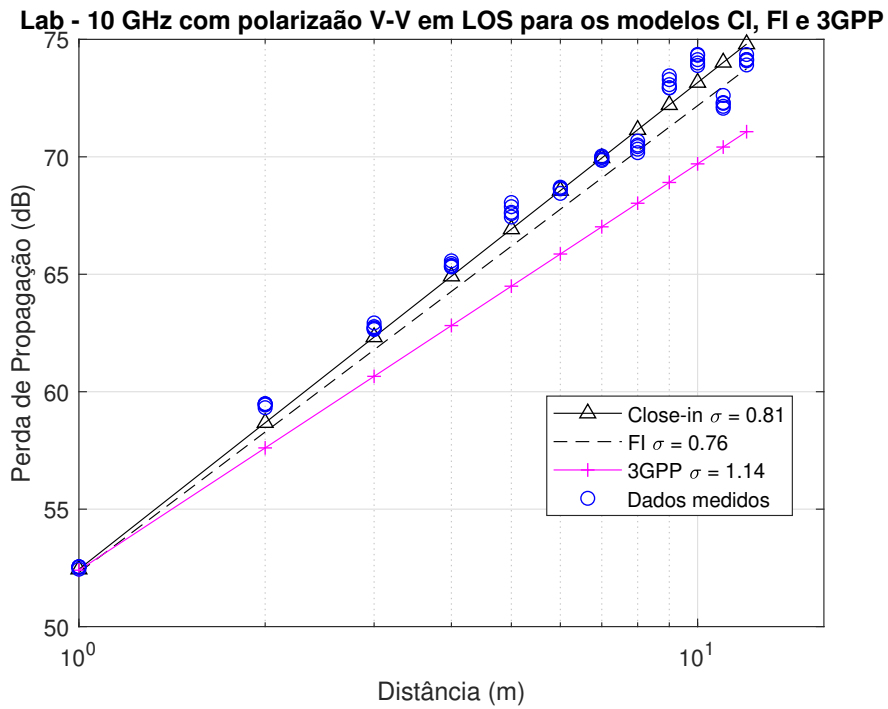


Figura 29 – Modelo CI utilizando antenas direcionais V-V para 10 GHz no lab.

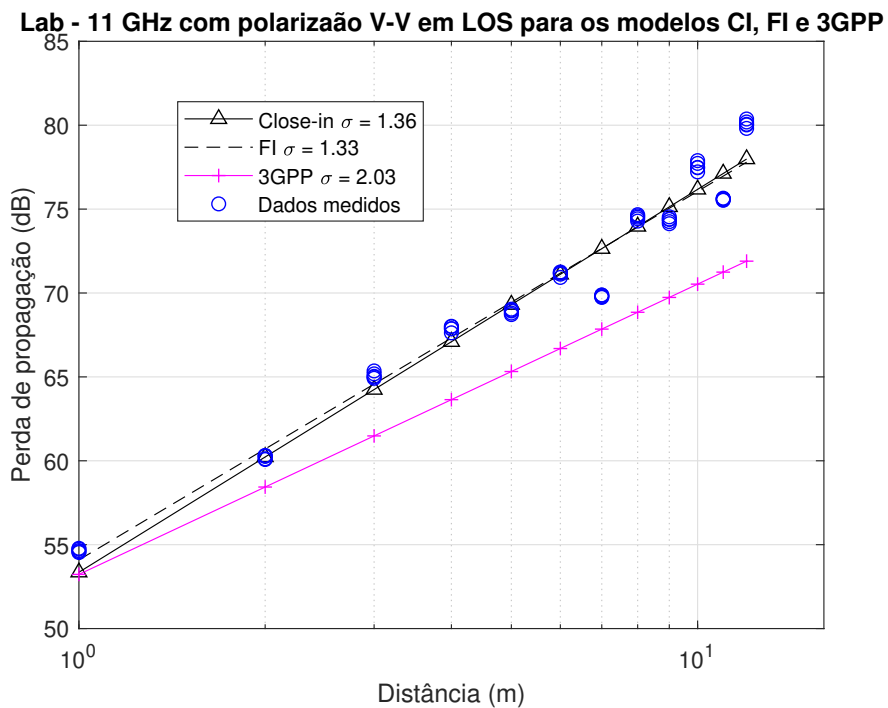


Figura 30 – Modelo CI utilizando antenas direcionais V-V para 11 GHz no lab.

As Figs. 31, 32, 33, e 34 apresentam o comportamento dos dados medidos e da extensão do modelo CI para co-polarização H-H. Comparando os valores de PLE para V-V e H-H, visto na Tabela 5, observa-se maiores valores de PLE em H-H para as frequências 9 e 11 GHz. O comportamento dos dados medidos para as frequências 8 e 9 GHz para

antenas V-V e H-H são bem próximos, mostrando a viabilidade em usar qualquer uma das duas polarizações de antenas para este ambiente. Nas frequências 10 e 11 GHz os valores de perda possuem comportamento distintos, para a polarização H-H tiveram um acréscimo de aproximadamente de 5 dB na perda de propagação em relação a V-V.

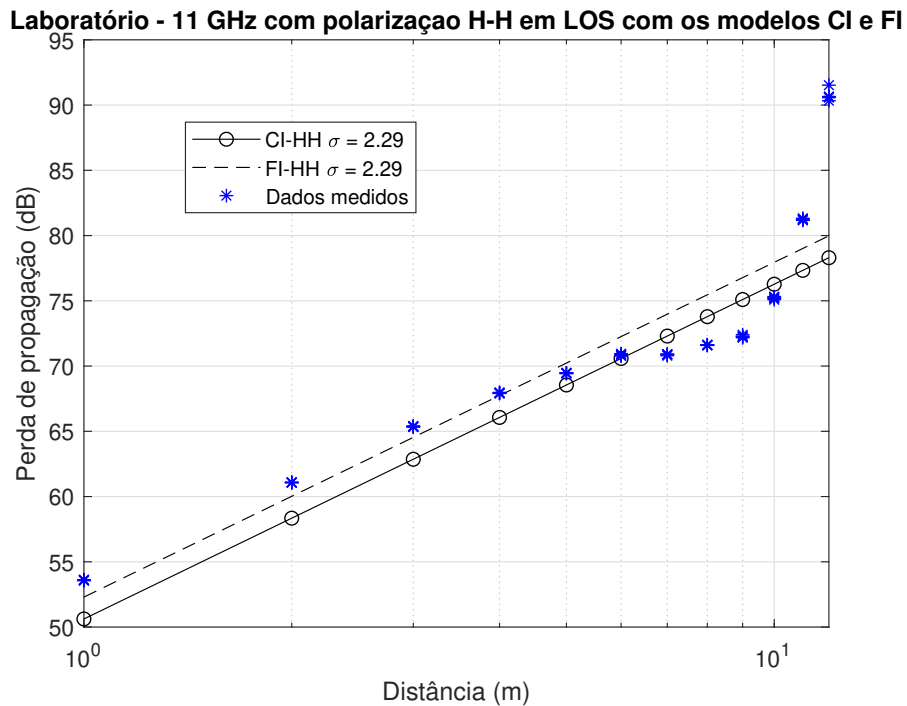


Figura 31 – Modelo CI e FI utilizando antenas direcionais H-H para 8 GHz no laboratório.

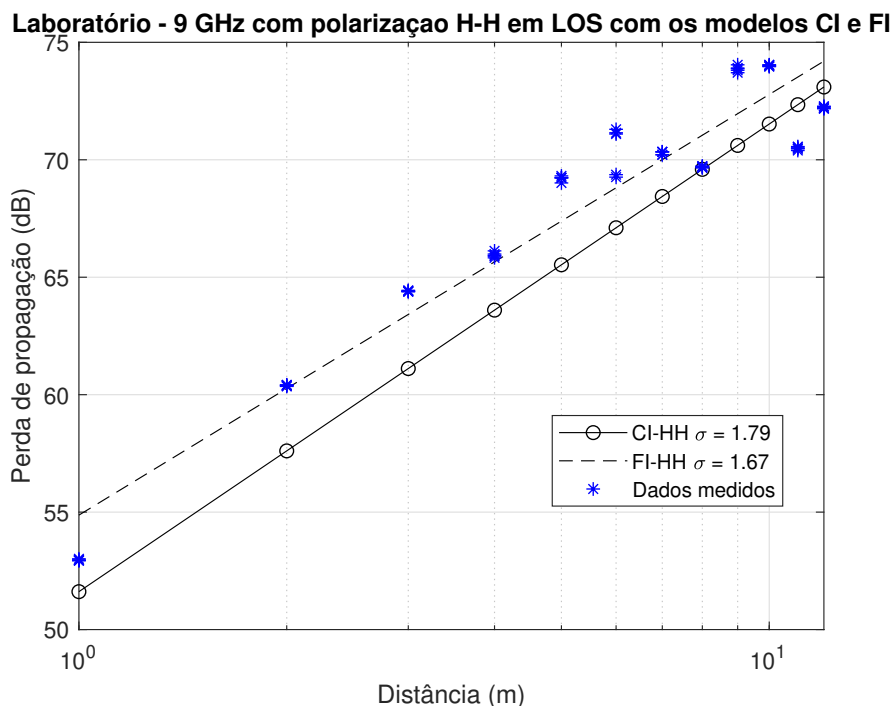


Figura 32 – Modelo CI e FI utilizando antenas direcionais H-H para 9 GHz no laboratório

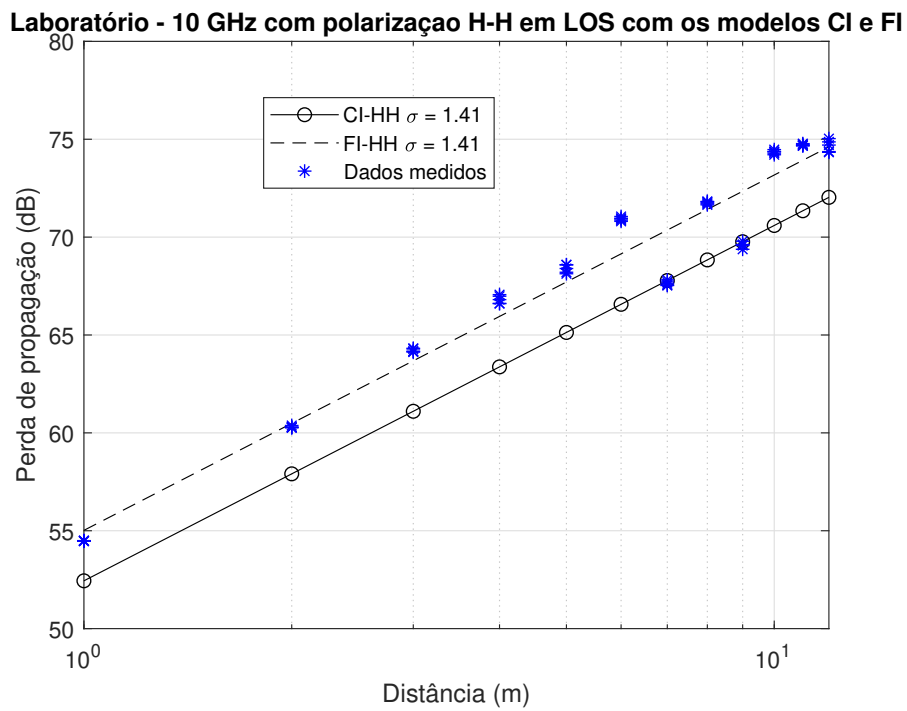


Figura 33 – Modelo CI e FI utilizando antenas direcionais H-H para 10 GHz no laboratório

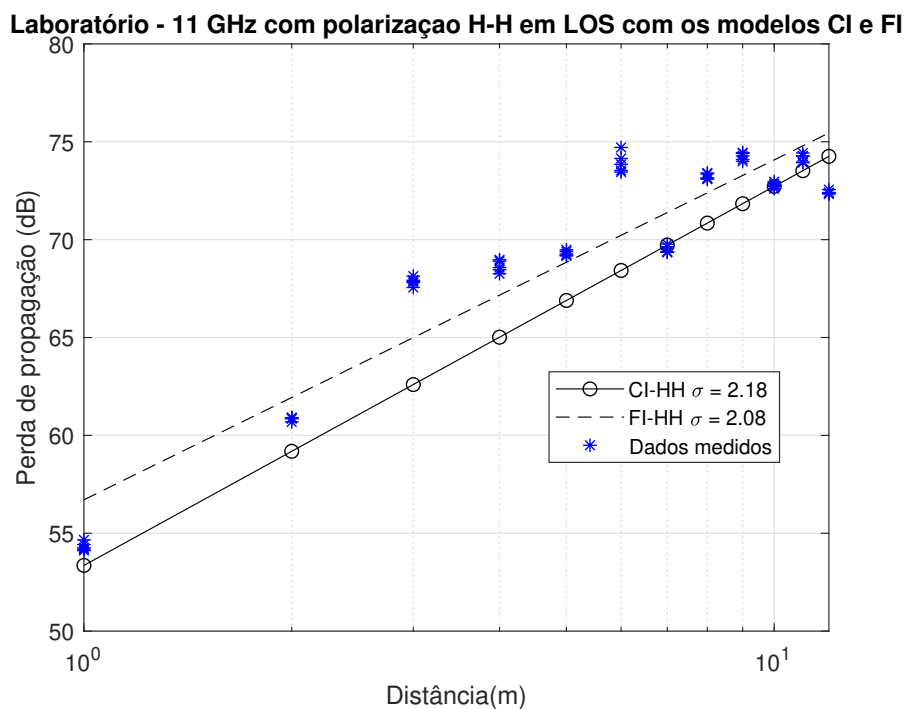


Figura 34 – Modelo CI e FI utilizando antenas direcionais H-H para 11 GHz no laboratório

A abordagem utilizando o desvio padrão ponto-a-ponto, visto na Fig. 35, apresenta o desvio padrão para as frequências 8, 9, 10 e 11 GHz, onde é possível notar uma baixa variação nos valores de desvio padrão observados no eixo Y variando de 0 – 0,26 dB, isto

é, há pouca variabilidade nos valores de potência recebido por ponto utilizando antenas *horns* direcionais co-polarizadas V-V no laboratório

A mesma abordagem é feita com antenas em c-polarização H-H para as frequências analisadas no laboratório. A Figura 36 apresenta a variação do desvio padrão para cada ponto medido visto no eixo Y, variando de 0 a 1.1 dB, mostrando maior oscilação dos dados medidos quando utilizado antenas co-polarizadas H-H entre o Tx e Rx. Para melhor apresentar a diferença de desvio padrão entre co- (V-V) e (H-H), a Figura 37 mostra o desvio padrão ponto-a-ponto analisando simultaneamente as polarizações e frequências.

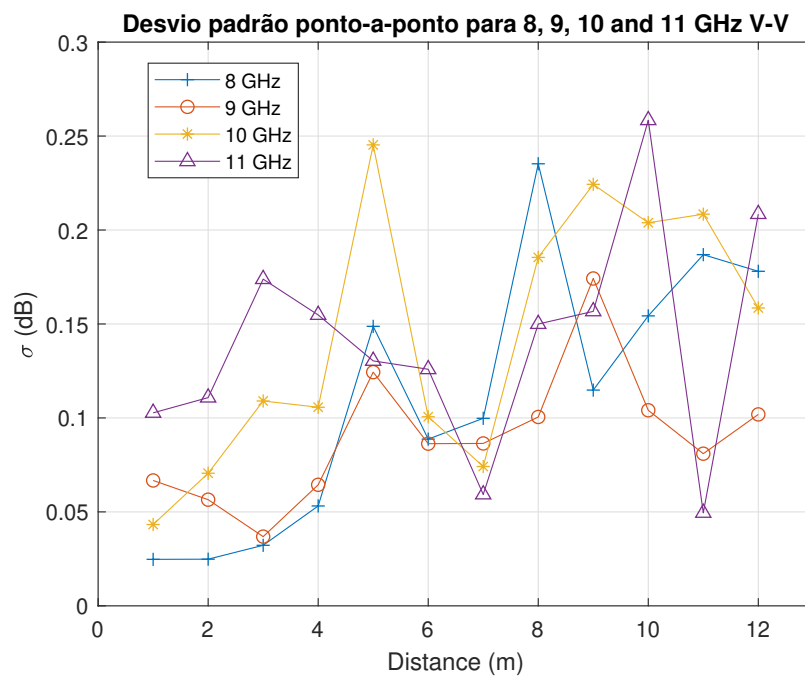


Figura 35 – Desvio padrão ponto-a-ponto dos dados medidos no corredor para frequências 8, 9, 10 e 11 GHz no Laboratório para antenas V-V.

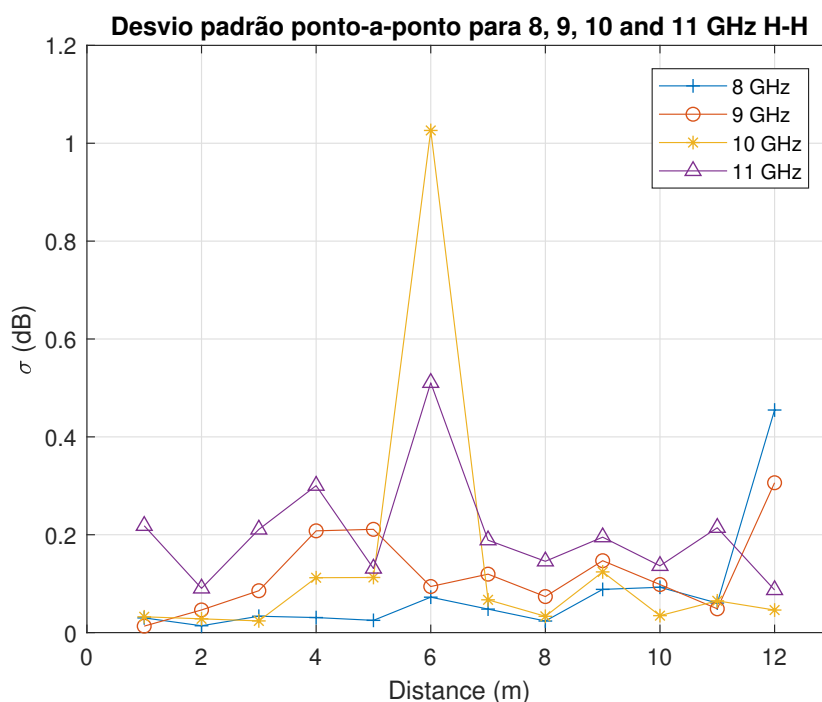


Figura 36 – Desvio padrão ponto-a-ponto dos dados medidos no corredor para frequências 8, 9, 10 e 11 GHz no Laboratório para antenas H-H.

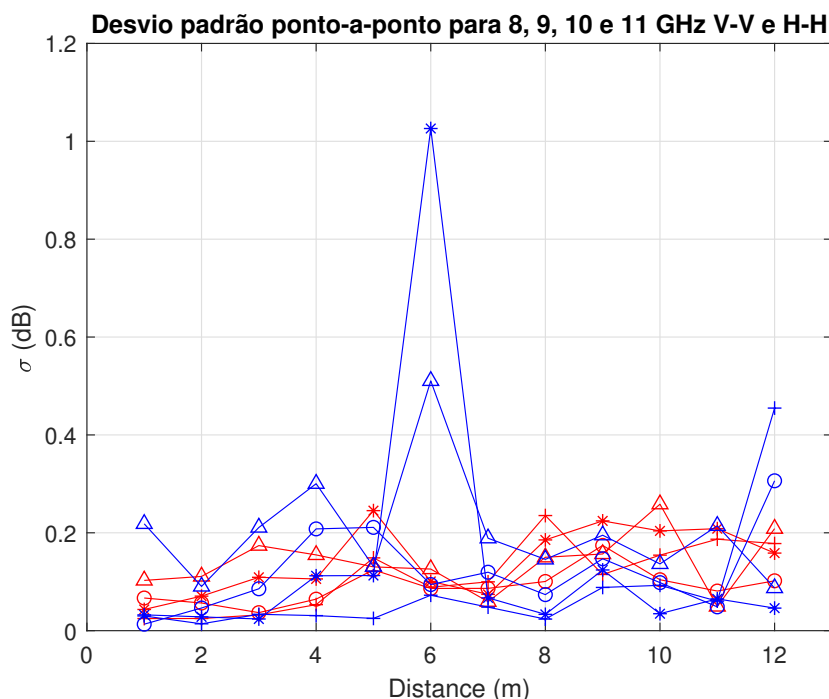


Figura 37 – Desvio padrão ponto-a-ponto dos dados medidos no corredor para frequências 8, 9, 10 e 11 GHz no Laboratório para V-V (dados em vermelho) e H-H (dados em azul).

A variável aleatória Gaussiana representada pelo efeito de sombreamento foi definida para o modelo CI Equação 5.1 e a é apresentada na Figura 38. Onde mostra o efeito

de sombreamento para antenas direcionais co-polarizadas (V-V) no laboratório para as frequências analisadas. É possível notar que o modelo CI Equação 5.1 tem uma boa aproximação sobre os dados medidos, além de verificar a variabilidade do sinal simulado entre o Tx e Rx.

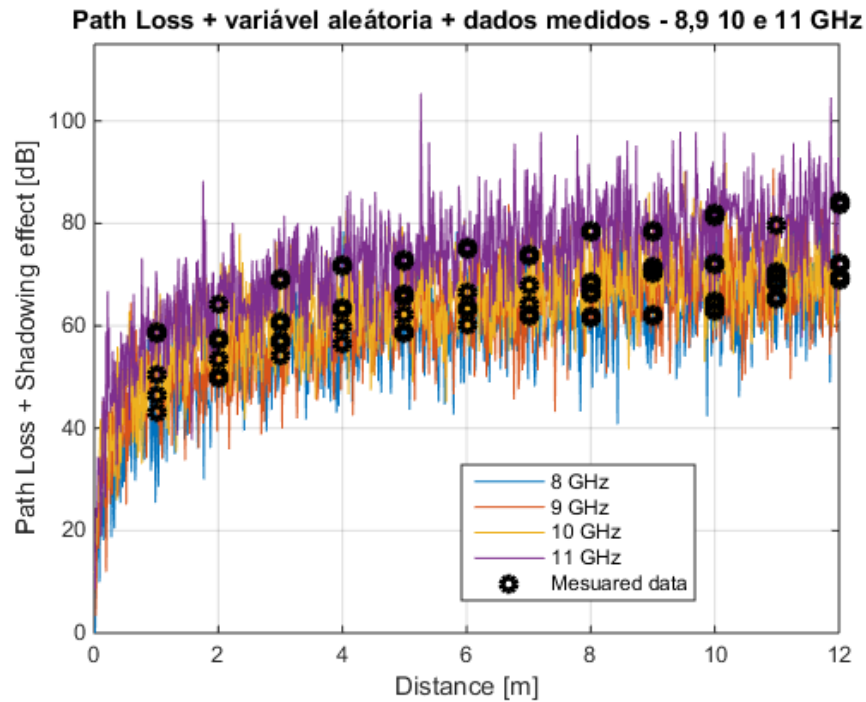


Figura 38 – Modelo de perda CI e sombreamento para as frequências 8, 9, 10, 11 GHz sobre os dados medidos do Laboratório utilizando antenas V-V.

7.2.3 Análise *Single* e *Multi-frequency*

7.2.3.1 Análise Single Frequency

Foram utilizados para caracterizar a atenuação do sinal para as frequências analisadas os modelos *single* e *multi frequency* em função da frequência e distância para ambientes internos.

Primeiro, comparamos os resultados para a análise única referente aos modelos CI e FI nos dois ambientes. A Figura 39 é dividida em sub-figuras agrupadas de acordo com os parâmetros analisados, as sub-figuras (A) e (D) apresentam a comparação entre os parâmetros para perda inicial $\beta_{FI}/FSPL_{CI}$, em (B) e (E) compara os parâmetros para inclinação/*slope* α_{FI}/PLE_{CI} e na sub-figura (C) e (F) compara o desvio padrão entre os modelos σ_{FI}/σ_{CI} para o corredor e laboratório respectivamente.

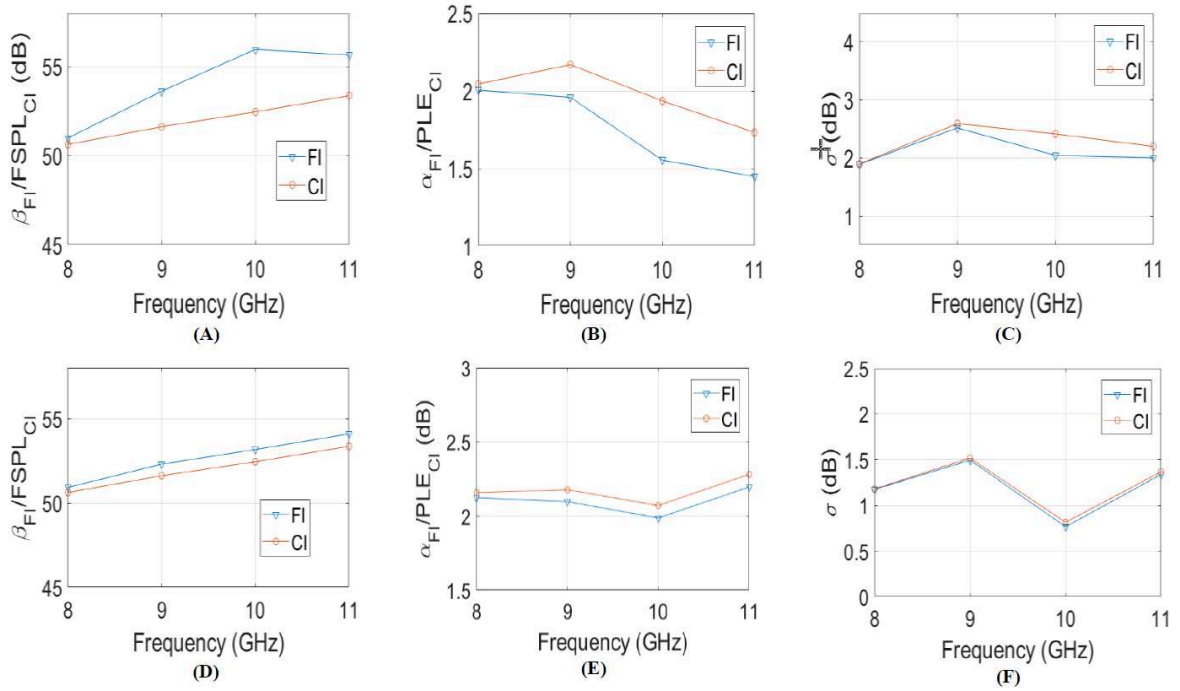


Figura 39 – Frequency dependence analysis of the single-frequency FI and CI models for frequencies 8, 9, 10 and 11 GHz. (a) and (d) comparing the $\beta_{FI}/FSPL_{CI}$, Fig. 32 (b) and (e) comparing α_{FI}/PLE_{CI} and Fig. 32 (c) and (f) comparing σ_{FI}/σ_{CI} for the corridor and laboratório respectively.

Os parâmetros da perda inicial, ($\beta_{FI}/FSPL_{CI}$) para o corredor e laboratório obtiveram valores no range de 50 a 54 dB para todas as frequências. Para o parâmetro α_{FI}/PLE_{CI} obtiveram valores de 1,73 e até 2,28 para as frequências. Vale ressaltar que os valores estão próximos do PLE teórico = 2. Para o desvio padrão, os valores determinados ficaram entre 0,81 a 2,59. A variabilidade do parâmetro de perda com a distância PLE para a Fig. 35 (F), mostram um range entre 0,7 a 1,49 e para Fig. 35 (C) variando entre 1,9 até 2,59.

As Figs. 40 e 41 apresentam os dados medidos com os modelos de CI para cada frequência com os valores de PLE, (vistos na Tabela 5), para o corredor e laboratório, respectivamente.

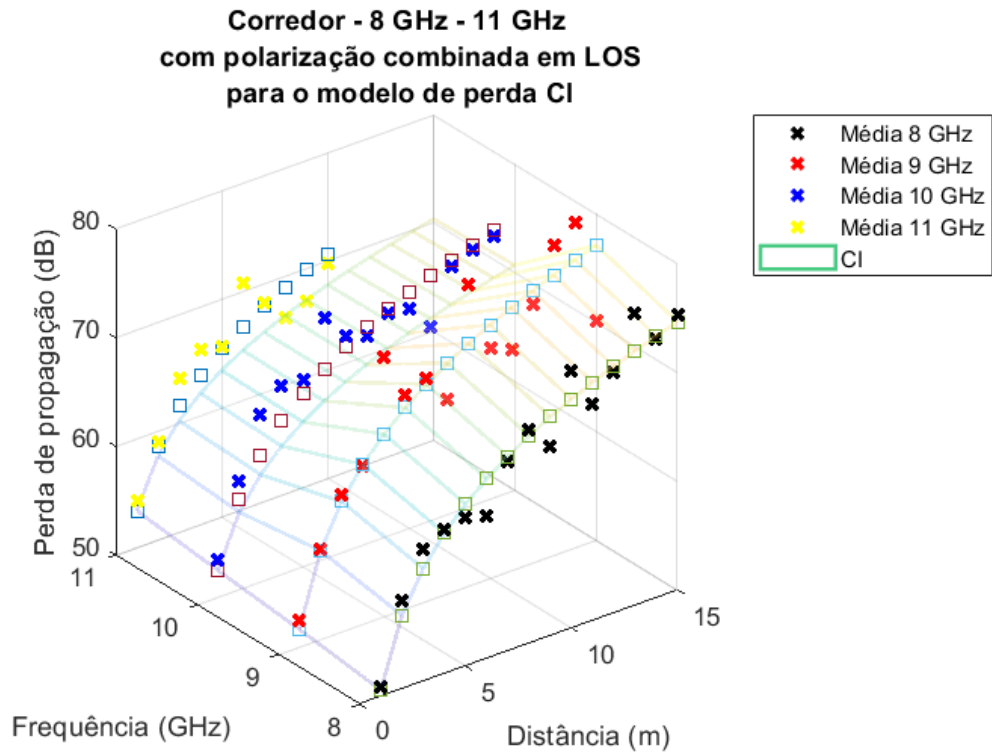


Figura 40 – PLE Surface plot for frequencies 8 - 11 GHz in the corridor for V-V antennas.

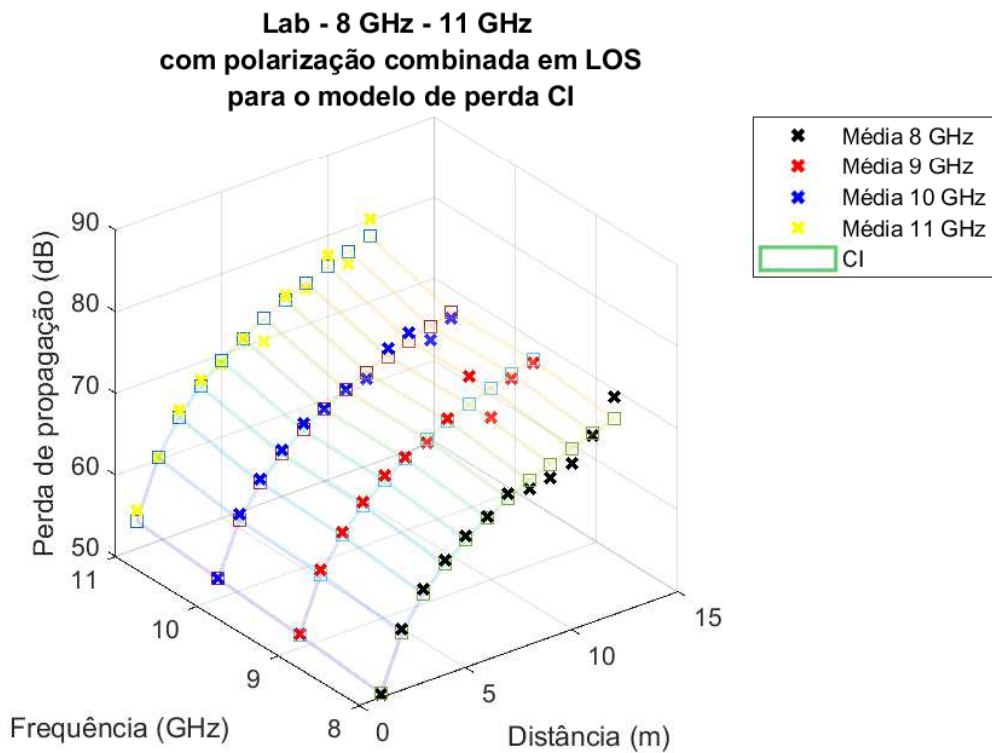


Figura 41 – PLE Surface plot for frequencies 8 - 11 GHz in the laboratório for V-V antennas.

A variância de parâmetro PLE para o modelo de CI demonstra a inclinação da curva para cada frequência e a dependência deste parâmetro para as frequências e ambientes. Isso mostra que o maior valor de PLE para o corredor está dentro da frequência de 9 GHz, enquanto que para o laboratório o maior valor de PLE é para 11 GHz.

7.2.3.2 Análise Multi frequency

Foi feita uma comparação dos resultados dos modelos de frequência única com os modelos de perda multifrequência CIF e ABG que fornecem as características do canal através da banda de frequência analisada.

Os gráficos da superfície de perda de trajetória e os parâmetros para os modelos CIF e ABG para os dois ambientes são mostrados nas Figs. 42, 43, 44 e 45 e Tabela 5, respectivamente.

Os gráficos referentes a análise multi frequency juntamente com a Tabela 5, mostram que os modelos CIF e ABG têm parâmetros muito semelhantes para PLE e σ em toda a banda de frequência. Os parâmetros PLE/α dos modelos CIF e ABG estão dentro do intervalo de 1,8 até 2,18 em todas as frequências, o que concorda com o valor de PLE teórico para o espaço livre igual a 2.

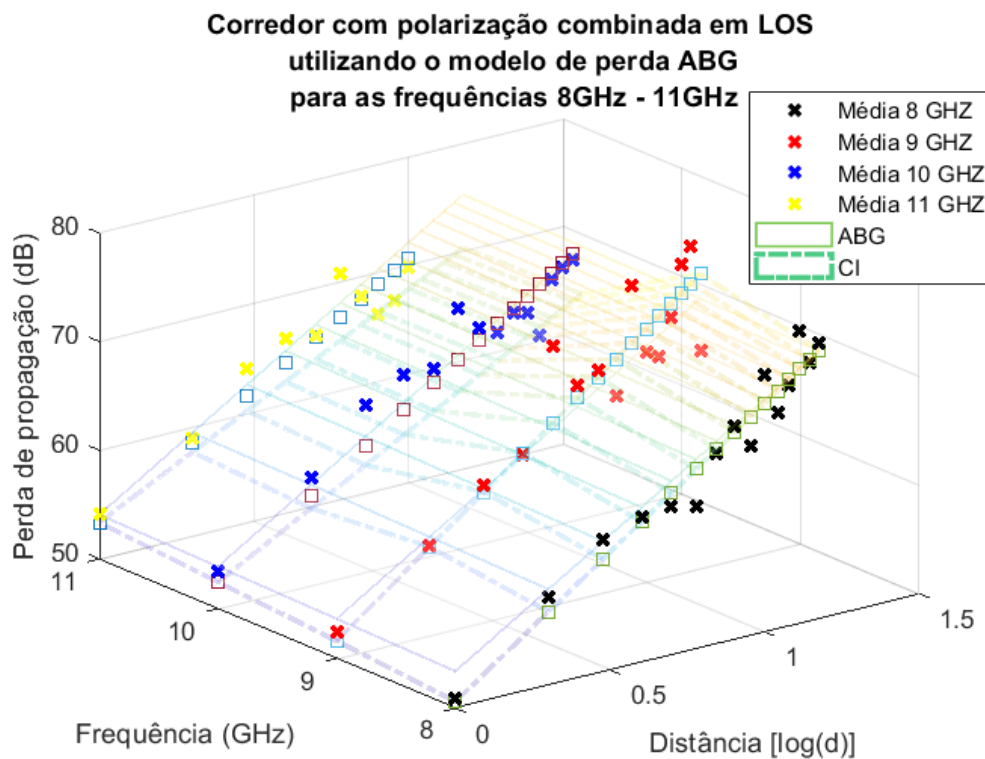


Figura 42 – Frequency dependency for the ABG model with the CI for frequencies 8 - 11 GHz in the corridor for V-V antennas.

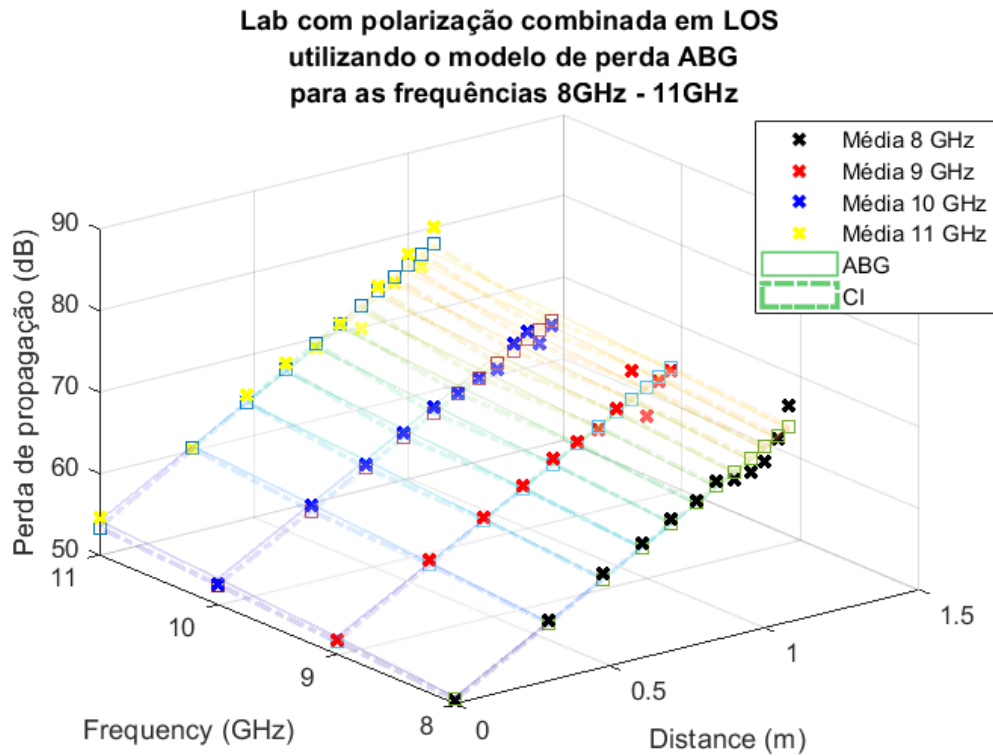


Figura 43 – Frequency dependency for the ABG model with the CI for frequencies 8 - 11 GHz in the laboratório for V-V antennas.

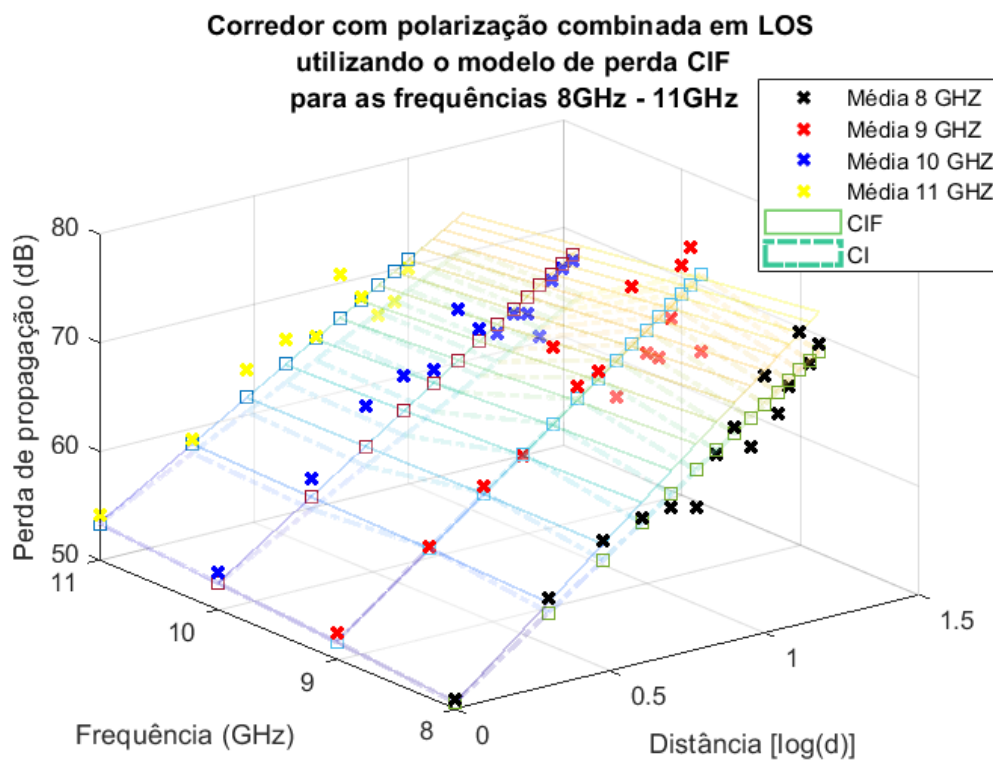


Figura 44 – Frequency dependence for the CIF model with the CI for the frequencies 8 - 11 GHz in the corredor for V-V antennas.

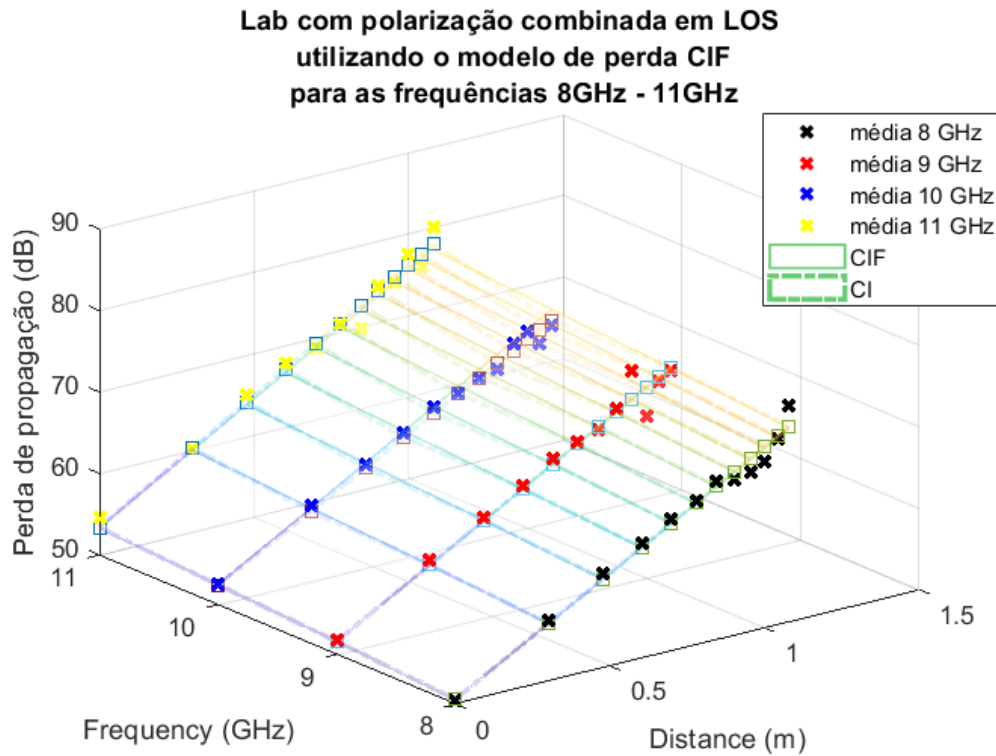


Figura 45 – Frequency dependence for the CIF model with the CI for the frequencies 8 - 11 GHz in the laboratório for V-V antennas

Os valores determinados batem com alguns trabalhos na literatura, como em (25) que apresenta tais valores para os parâmetros $\alpha = 0.9$, $\beta = 43.6e$ e $\gamma = 1.8$ para as frequências de 28 GHz e 73 GHz, para esta tese os mesmos parâmetros calculados resultaram nos valores de: $\alpha = 1,8$ e $2,1$, $\beta = 49,11$ e $29,3$, $\gamma = 0,47$ e $2,39$ para o corredor e laboratório, respectivamente. Estes resultados indicam que, com frequências próximas, os valores dos parâmetros estão próximos dos apresentados na literatura.

Quanto ao fator de dependência de frequência b para o CIF são comparados em relação ao ambiente, os valores determinados são maiores nas medições no laboratório (0,1) em relação ao corredor (-0,35); o parâmetro f_0 encontrado foi 9,35 para o corredor e 9,5 para o laboratório. Por outro lado, o γ para o corredor tinha um valor de 0,47 enquanto o laboratório tinha um valor de 2,39.

Para os resultados, o modelo CIF tem mais confiabilidade estatisticamente sobre a dependência de frequência em relação ao ABG devido ao ponto de ancoragem física (FSPL) com valor de $d_0 = 1m$. Verificou-se que os valores de PLE para os modelos multifrequências apresentaram maior estabilidade que a frequência única, por outro lado, o desvio padrão para os modelos multifrequências foi maior que o de frequência única, o que levou a uma menor precisão dos modelos com múltiplas frequências.

7.2.4 Perda por parede

A perda por parede é importante pois há mudança de meio entre o Tx e Rx, essa mudança implica diretamente na intensidade e propagação do sinal. Dentro de ambientes *indoors* existem diversos obstáculos, parciais ou totais, nesta tese é abordada a obstrução total considerando paredes ou portas. As medições para desta tese foram utilizados alguns materiais como: madeira, alvenaria, vidro e MDF e as antenas foram polarizadas verticalmente.

A abordagem usada para definir a perda por parede consistem em medir a potência recebida para a mesma distância (3 metros) com e sem obstrução (55), definida pela equação 7.1.

$$OPL E_i [dB] = L_{mean}^{LoS} [3m] - L_{mean}^{NLoS} [3m] \quad (7.1)$$

Onde L_{mean}^{LoS} perda medida sem parede e L_{mean}^{NLoS} perda com obstrução e $OPL E_i$ é a perda por tipo de parede. Os resultados para a perda por tipo de parede para cada banda são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Valores de perda de propagação por obstáculos

<i>Frequência</i>	<i>Alvenaria</i>	<i>Madeira</i>	<i>Vidro</i>
8 GHz	6 dB	-	-
9 GHz	8 dB		-
10 GHz	10 dB	1 dB	-
11 GHz	13 dB	1 dB	-

7.2.5 Comparação entre os dados medidos no corredor (V-V e V-H) e Laboratório (V-V e H-H)

O comportamento dos dados medidos para os dois ambientes mostra o quão a influência do ambiente na perda de propagação assim como a polarização das antenas. Os principais parâmetros de modelos usados para definir uma melhor aproximação são: PLE, XPD e OPLE. Desvio padrão na média e desvio padrão ponto a ponto também são importantes para analisar a perda de propagação em todo seu percurso e a cada metro percorrido, respectivamente.

Analisando a Tabela 6 verificamos que os valores de PLE para o corredor são menores em comparação aos do laboratório com co-polarizadas V-V, isso revela que no corredor a atenuação é mais lenta em relação ao laboratório, por conta das características do corredor, onde seu comprimento menor leva mais reflexões que podem ser construtivas e destrutivas. Para 8, 9 e 10 GHz em co-polarizadas V-V nos dois ambientes os valores

de PLE ficaram próximos, Tabela 6. Para 11 GHz os valores de PLE para o corredor são menores em relação ao laboratório.

As polarizações H-H e V-H possuem bastante diferença entre si, a principal diferença é vista no PLE, onde para H-H possui valores bem maiores em relação ao V-H. Outra diferença é no desvio padrão, quando avaliamos o desvio padrão médio a polarização V-H tem valores menores em comparação ao H-H, no entanto, se avaliar o desvio padrão ponto-a-ponto a polarização H-H tem valores menores em relação a V-H.

Quando avaliamos a polarização V-V com as H-H e V-H, nota-se que o comportamento do H-H é mais próximo e possui menor desvio padrão entre si. Já a polarização cruzada V-H demonstrou ser a que apresenta maior perda desde o ponto mais próximo (1 m) até o final do percurso, além de apresentar bastante variabilidade ponto a ponto, sendo a mais instável entre as medidas.

A variável aleatória, foi analisado apenas para o modelo CI nos dois ambientes, as Figs. 26 e 38 apresentam a variação da variável aleatória (X_σ) do modelo CI junto aos dados medidos. Na Fig. 26 é possível notar que o espaçamento entre as frequências é maior em relação a Fig. 38, onde a oscilação os valores no corredor (fig. 14) são menores em relação ao laboratório(fig. 22), este fator é importante, pois mostra a variação dos modelos com os ambientes.

7.3 Conclusões

O objetivo desta tese é apresentar modelagem de canal utilizando o modelo CI e suas extensões, modelo FI e os modelos de multi frequência CIF e ABG para caracterizar canais das futuras redes sem fio. Estes modelos apresentam boas aproximações em condições LOS e NLOS utilizando antenas horns direcionais em co- e cross-polarização em corredor e em um laboratório.

Valores de PLE no corredor e laboratório utilizando co-polarização V-V são próximos aos vistos na literatura (23) e (25), entretanto, PLE para cross-polarização V-H apresenta valores menores em relação ao co-polarizado para os mesmos ambientes.

Outro ponto importante é análise do desvio padrão na média e desvio padrão ponto-a-ponto. O desvio padrão na média para 8 e 9 GHz apresentam valores maiores em comparação com 10 e 11 GHz, isto se dá por valores de PLE visto na Tabela 6. Para desvio padrão ponto-a-ponto no corredor, observa-se que utilizando antenas co-polarizadas V-V a variação permaneceu baixa variando de 0 a 0.7 dB (Fig. 19), para a polarização cruzada V-H o desvio padrão teve maior variabilidade indo de 0 a 3.5 dB, fig. 16.

Para as medições realizadas no laboratório com antenas direcionais V-V e H-H foram feitas modelagens com os modelos CI e suas extensões, FI, CIF e ABG, apresentando valores de PLE distintos para cada frequência e polarização. Para 8 GHz e 10 GHz o valores de PLE para antenas H-H são maiores em relação ao V-V, para 9 GHz e 10 GHz o valor de PLE foi maior para V-V em relação ao H-H. Para desvio padrão ponto-a-ponto observou-se que utilizando antenas co-polarizadas V-V a variação permaneceu baixa variando de 0 a 0.26 dB, 35, para antenas co-polarizadas H-H o desvio padrão teve maior variabilidade indo de 0 a 1.1 dB (Fig. 36).

As paredes também possuem influência diferente para cada obstáculos, sua perda muda de acordo com a frequência usada, quanto maior a frequência maior a perda sofrida, este ponto é importante, pois as futuras tecnologias de acesso devem contornar esse problema já que os novos sistemas de telecomunicações usarão ondas milimétricas.

Outro ponto a verificar é a diferença na propagação das ondas dentro de ambientes distintos, porém confinados. No corredor as reflexões são mais intensas devido a proximidade das paredes e o tipo de material usado na formação de paredes, piso e teto, além de grades e painéis metálicos. O laboratório é um ambiente mais largo e possui uma composição diferente ao corredor, apresenta paredes de alvenaria e madeira, além de cadeiras, mesas e *desktops*, estas características afetam na perda de percurso das ondas eletromagnéticas dentro desses ambientes mostrando neste trabalho suas diferenças através dos modelos CI e suas extensões, FI, CIF e ABG além do desvio padrão.

Para a progressão do estudo, será feita uma abordagem em pequena-escala simulada e/ou medida para as frequências usadas nesta tese e se possível para frequências acima

de 28 GHz, afim de completar o estudo relacionado a propagação e seus fenômenos. Também espera-se realizar medições para abordagem em larga-escala para frequências mais elevadas, como 28 GHz até 93 GHz em ambientes *indoor*, propor também um modelo em larga-escala omnidirecional utilizando antenas diretivas variando azimute até completar 360°.

Referências

- 1 KIM, M. et al. Large scale parameters and double-directional characterization of indoor wideband radio multipath channels at 11 ghz. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 62, n. 1, p. 430–441, jan 2014. Citado na página 1.
- 2 RAPPAPORT, T. S. et al. Millimeter wave mobile communications for 5g cellular: It will work! *IEEE Access*, 2013, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 1, p. 335–349, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 1, 5 e 8.
- 3 D1.4, M. D. Metis channel models. 2015. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 6.
- 4 PI, Z.; KHAN, F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems. *IEEE Communications Magazine*, 2011, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 49, n. 6, p. 101–107, jun 2011. Citado na página 1.
- 5 RAPPAPORT, T. S. et al. Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 63, n. 9, p. 3029–3056, sep 2015. Citado 6 vezes nas páginas 1, 7, 22, 23, 27 e 28.
- 6 NETWORK 3rd Generation partnership project Technical Specification group radio access. Spatial channel model for multiple input multiple output (mimo). Release 15. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 23.
- 7 COMMISSION, F. C. Use of spectrum bands above 24 ghz for mobile radio services, et al., 2018. 2018. Citado na página 1.
- 8 D2.4, M. D. Proposed solutions for new radio access. fev. 2015. Citado na página 1.
- 9 ISKANDER, M.; YUN, Z. Propagation prediction models for wireless communication systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 50, n. 3, p. 662–673, mar 2002. Citado na página 1.
- 10 OKUMURA E. OHMORI, T. K. Y.; FUKUDA, K. Field strength and its variability in vhf and uhf land-mobile radio service. *Rev. Electr. Commun. Lab*, 1968, vol. 16, n. no. 9, p. 825–873, 1968. Citado na página 2.
- 11 DAMOSSO, E.; CORREIA, L. M. Cost action 231: digital mobile radio towards future generation systems, final report. *European Commission*, 1999, 1999. Citado na página 2.
- 12 PHILLIPS, C.; SICKER, D.; GRUNWALD, D. A survey of wireless path loss prediction and coverage mapping methods. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 15, n. 1, p. 255–270, 2013. Citado na página 2.

- 13 HANEDA, K. Channel models and beamforming at millimeter-wave frequency bands. *IEICE Transactions on Communications*, 2015, Institute of Electronics, Information and Communications Engineers (IEICE), E98.B, n. 5, p. 755–772, 2015. Citado na página 2.
- 14 MOLISCH, A. F. et al. Millimeter-wave channels in urban environments. In: *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. [S.l.]: IEEE, 2016. Citado na página 2.
- 15 RATH, H. K. et al. Realistic indoor path loss modeling for regular WiFi operations in india. In: *2017 Twenty-third National Conference on Communications (NCC)*. [S.l.]: IEEE, 2017. Citado na página 2.
- 16 ANDREWS, J. G. et al. What will 5g be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 32, n. 6, p. 1065–1082, jun 2014. Citado na página 5.
- 17 AL-SAMMAN, A. M. et al. Statistical modelling and characterization of experimental mm-wave indoor channels for future 5g wireless communication networks. *PLOS ONE*, 2016, Public Library of Science (PLoS), v. 11, n. 9, p. e0163034, sep 2016. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 22.
- 18 AL-SAMMAN, A. M.; RAHMAN, T. A.; AZMI, M. H. 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, Hindawi Limited, v. 2018, p. 1–12, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.
- 19 LOPES IURY BATALHA, C. R. g. A. Proposal of improvement of propagation models to 5g by calculating optimal value of their propagation loss coefficients. In: *WTICp/D - Workshop de TIC para Desenvolvimento - Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado na página 6.
- 20 BATALHA JASMINE. P. L. ARAUJO, B. S. L. C. G. P. S. C. I. S. Large-scale model for 5.2 ghz in indoor academic environments. *Iecom*, 2018, 2018. Citado na página 6.
- 21 DENG, S.; MACCARTNEY, G. R.; RAPPAPORT, T. S. Indoor and outdoor 5g diffraction measurements and models at 10, 20, and 26 GHz. In: *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.]: IEEE, 2016. Citado na página 6.
- 22 ZHOU, X. et al. Indoor wideband channel measurements and analysis at 11 and 14 GHz. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2017, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 11, n. 10, p. 1393–1400, aug 2017. Citado na página 6.
- 23 OYIE, N. O.; AFULLO, T. J. O. Measurements and analysis of large-scale path loss model at 14 and 22 GHz in indoor corridor. *IEEE Access*, 2018, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 6, p. 17205–17214, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 6, 38 e 61.
- 24 LEI, M. et al. 28-GHz indoor channel measurements and analysis of propagation characteristics. In: *2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*. [S.l.]: IEEE, 2014. Citado na página 7.

- 25 MACCARTNEY, G. 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, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 3, p. 2388–2424, 2015. Citado 8 vezes nas páginas 7, 22, 23, 28, 40, 41, 58 e 61.
- 26 RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. [S.l.]: Upper Saddle River, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 23.
- 27 HANSEN, C. WiGiG: Multi-gigabit wireless communications in the 60 GHz band. *IEEE Wireless Communications*, 2011, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 18, n. 6, p. 6–7, dec 2011. Citado na página 8.
- 28 BALANIS, C. A. *Teoria de antenas - Análise e síntese*. 3rd. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 11.
- 29 AL-FALAHY, N.; ALANI, O. Y. Technologies for 5g networks: Challenges and opportunities. *IT Professional*, 2017, IEEE, v. 19, n. 1, p. 12–20, 2017. Citado na página 14.
- 30 ERICSSON, A. Ericsson mobility report june 2018. *Recuperado de: <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2018/ericsson-mobility-report-june-2018.pdf> (Accedido el 09/09/2018)*, 2018, p. 3–13, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- 31 FORECAST, C. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2016–2021 white paper. *Cisco Public Information*, 2017, 2017. Citado na página 14.
- 32 Wang, C. et al. Cellular architecture and key technologies for 5g wireless communication networks. *IEEE Communications Magazine*, 2014, v. 52, n. 2, p. 122–130, fev. 2014. Citado na página 14.
- 33 KHODASHENAS, P. et al. 5g network challenges and realization insights. In: IEEE. *2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.], 2016. p. 1–4. Citado na página 14.
- 34 Ezhilarasan, E.; Dinakaran, M. A review on mobile technologies: 3G, 4G and 5g. In: *Proc. Second Int. Conf. Recent Trends and Challenges in Computational Models (ICRTCCM)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 369–373. Citado 3 vezes nas páginas 14, 18 e 20.
- 35 RODRIGUEZ, J. *Fundamentals of 5G Mobile Network*. [S.l.]: 2015, 2015. Citado na página 15.
- 36 CAI, Y. et al. Modulation and multiple access for 5g networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, IEEE, v. 20, n. 1, p. 629–646, 2017. Citado na página 17.
- 37 ROUSTRAY, S. K.; SHARMILA, K. 4.5 g: A milestone along the road to 5g. In: IEEE. *2016 International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES)*. [S.l.], 2016. p. 1–6. Citado na página 17.
- 38 Wu, Z. et al. Development challenges for 5g base station antennas. In: *Proc. Int. Workshop Antenna Technology (iWAT)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–3. Citado na página 17.

- 39 Sharma, S.; Singh, B. 5g networks: The next gen evolution. In: *Proc. Int. Conf. Signal Processing and Communication (ICSC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 55–60. Citado na página 18.
- 40 ERICSSON. Ericsson mobility report. On the Pulse of the Networked Society. Citado na página 19.
- 41 3GPP. Release description: Release 14. 2017. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 26 e 38.
- 42 PROJECT 3rd G. P. Technical specification group services system aspects - release 15. 2018. Citado na página 20.
- 43 PROJECT 3rd G. P. Technical specification group services system aspects - release 16. 2019. Citado na página 20.
- 44 Dahlman, E.; Parkvall, S. Nr - the new 5g radio-access technology. In: *Proc. IEEE 87th Vehicular Technology Conf. (VTC Spring)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Citado na página 20.
- 45 Pirinen, P. A brief overview of 5g research activities. In: *Proc. 1st Int. Conf. 5G for Ubiquitous Connectivity*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 17–22. Citado na página 20.
- 46 MACCARTNEY, G. R. et al. Path loss models for 5g millimeter wave propagation channels in urban microcells. In: *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.]: IEEE, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 28.
- 47 SKIDMORE, T. S. R. R. R.; ABBOTT, A. L. Interactive coverage region and system design simulation for wireless communication systems in multioored indoor environments: Smt plus. *IEEE International conference Universal Perspective Communication*, 1996, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 29.
- 48 TECHONOLOGIES, I. society. Winner ii channel models. Part I Channel Models. Citado na página 23.
- 49 RAPPAPORT, T. 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, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 65, n. 12, p. 6213–6230, dec 2017. Citado na página 24.
- 50 LIMA, A.; MENEZES, L. Motley-keenan model adjusted to the thickness of the wall. In: *SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics, 2005*. [S.l.]: IEEE. Citado na página 24.
- 51 RECOMMENDATIONS, I. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 900mhz to 100ghz. 2001. Citado na página 25.
- 52 UNION international telecommunication. Recommendation itu-r m.2083-0 (09/2015). IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Citado na página 26.

-
- 53 SUN, S. et al. Propagation path loss models for 5g urban micro- and macro-cellular scenarios. In: *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.]: IEEE, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- 54 PIERSANTI, S.; ANNONI, L. A.; CASSIOLI, D. Millimeter waves channel measurements and path loss models. In: *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.]: IEEE, 2012. Citado na página 28.
- 55 WANG, C.-X. et al. A survey of 5g channel measurements and models. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 20, n. 4, p. 3142–3168, 2018. Citado na página 59.