Dissertação de Mestrado

Inatel
Instituto Nacional de Telecomunicações

Medições de Comunicações Sem Fio na Faixa de Ondas Milimétricas

Anderson Fagiani Fraga

Junho/2019

MEDIÇÕES DE COMUNICAÇÕES SEM FIO NA FAIXA DE ONDAS MILIMÉTRICAS

Anderson Fagiani Fraga

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

Orientador: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Júnior

Santa Rita do Sapucaí
2019

Fraga, Anderson Fagiani
F811m
Medições de Comunicações Sem fio na Faixa de Ondas Milimétricas. / Anderson Fagiani Fraga . – Santa Rita do Sapucaí, 2019.
109 p.

Orientador: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Júnior.
Dissertação de Mestrado em Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.
Inclui bibliografia e anexo.

1. Coeficiente de reflexão 2. Comunicações móveis 3. Ondas milimétricas 4. Perda de percurso e perda por penetração . 5. propagação. 6. Mestrado em Telecomunicações. I. Júnior, Arismar Cerqueira Sodré. II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

Biblioteca "Ministro Otávio Bilac Pinto"

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

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida em 15/08/2018 e aprovada 14/06/2019 pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Júnior

INATEL

Prof. Dr. Estevan Marcelo Lopes

INATEL

Prof. Dr. Rausley Adriano Amaral de Souza

INATEL

Dr. Agostinho Linhares de Souza Filho

ANATEL

Coordenador do Curso de Mestrado

Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito

À minha família.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, Aquele que me ajudou em cada palavra escrita neste trabalho, pelo amor e misericórdia em minha vida.

À minha família amada e querida, à minha esposa Juliana, aos meus filhos Pedro, Murilo e Elise, e à minha mãe Cecília pela compreensão quanto às minhas ausências necessárias para a conclusão deste trabalho. Pai João, mesmo não estando mais presente entre nós, eu sei que o seu amor esteve sempre ao meu lado.

Ao prof. Arismar por haver me orientado e apoiado ao longo deste trabalho e pela compreensão durante os momentos difíceis. Com a sua competência e dedicação é exemplo de profissionalismo, além de um grande amigo que conquistei.

Gostaria de agradecer ao professor Justino, que havia iniciado a minha orientação no Curso de Mestrado, e que por força maior não pôde dar a continuidade aos nossos trabalhos propostos inicialmente.

Aos amigos André Abbade e Ricardo Augusto do ICC Educação Continuada.

Aos amigos do laboratório WOCA pelos conselhos compartilhados e companheirismo, em especial ao Igor, Hugo e Marcello.

Índice

Lista de Publicações v

Lista de Figuras vi

Lista de Abreviaturas e Siglas xi

Lista de Símbolos xii

Resumo xiii

Abstract xiv

Capítulo 1 1

1. Introdução 1

1.1 Contextualização e Motivação 1

1.2 Revisão Bibliográfica 3

1.3 Objetivos e Contribuições 7

1.4 Estrutura da Dissertação 8

Capítulo 2 9

2.1 Conceitos de Propagação 9

2.2 Caracterizações dos Materiais em Ondas Milimétricas 11

2.3 Cenários das Simulações e dos Experimentos 23

2.4 Metodologia 25

Capítulo 3 35

3.1 *Software* Winprop 35

3.1.1 *Software* WallMan 35

3.1.2 Software AMan 38

3.1.3 Software PorMan 39

3.2 Resultados Numéricos 40

Capítulo 4 45
4. Medições de Propagação na faixa de ondas Milimétricas 45
4.1 Cenário 1 46
4.2 Cenário 2 55
4.3 Cenário 3 62
Capítulo 5 66
5.1 Conclusões 66
5.2 Trabalhos Futuros 67
ANEXO A 68
Determinação da confiabilidade nas medidas dos experimentos 68
Apêndice A 70
Referências Bibliográficas 80

Lista de Publicações

1. **A. Fagiani**, Arismar Cerqueira S. Jr., M. Vogel, “Propagation Analysis of mm-Waves Indoor Networks,” JMOe – *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Nov. 2018.
2. H. R. D. Filgueiras, **A. Fagiani**, T. Brandão, A. C. S. Junior, and M. Vogel, “Implementation and Numerical Analysis of an Indoor mm-Waves Network,” *Symposium Antenna Measurement Techniques Association (AMTA)*, Nov. 2018.
3. **A. Fagiani**, Arismar Cerqueira S. Jr., M. Vogel, “Medições de Propagação em Ondas Milimétricas em ambientes Indoor e Outdoor,” *18°* SBMO – *Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 13° CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo,* Aug. 2018.
4. **A. Fagiani**, H. R. D. Filgueiras, I. F. da Costa, D. A. Nunes, Arismar Cerqueira S. Jr., “Medidas de Propagação em Canais de Comunicação sem Fio Indoor em 28 GHz,” *Encontro Anual de Iecom em Comunicações, Redes e Criptografia (ENCOM*), pp. 17-18, Out. 2017.
5. **A. Fagiani**, Arismar Cerqueira S. Jr., “Caracterização da Perda de Percurso Indoor de Redes 5G em Ondas Milimétricas,” *XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*, Sep. 2017.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - *Previsão de crescimento global do tráfego de informações nas redes de comunicações móveis [1]*. 2

Figura 1.2- *Potenciais faixas de frequências para utilização no padrão 5G* 3

Figura 2.1 - *Atenuação no sinal provocada pelo gás oxigênio [60]*. 13

Figura 2.2 - *Atenuação no sinal provocado por precipitação de chuva [61]*. 13

Figura 2.3 - *Arranjo experimental utilizado na caracterização da perda por penetração.* 16

Figura 2.4 - *Arranjo experimental utilizado na caracterização do coeficiente de reflexão* 17

Figura 2.5 - *Tipos de tijolos encontrados nas paredes analisadas* 19

Figura 2.6 - *Disposição dos tijolos ao longo das paredes e as posições das instalações elétricas.* 20

Figura 2.7 - *Tipos de vidros utilizados nas análises dos experimentos práticos.* 21

Figura 2.8 - *Atenuações medidas nos cabos e conectores no equipamento PNA* 23

Figura 2.9 - *Montagens do experimento de perda por penetração (ECL).* 26

Figura 2.10 - *Montagens utilizadas no experimento da caracterização do coeficiente de reflexão.* 27

Figura 2.11 - *Campus do Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL, local dos cenários das simulações e dos experimentos práticos.* 28

Figura 2.12 - *Ilustrações dos ambientes de análises indoors e outdoor.* 29

Figura 2.13 - *Sintetize da metodologia utilizada para as obtenções da perda de percurso e do coeficiente de propagação* 30

Figura 2.14 – *Gerador de sinais EXG N5173B – 9 kHz a 40 GHz.* 31

Figura 2.15 – *FieldFox Microwave Analyser N9952A – 50 GHz.* 31

Figura 2.16 – *Diagrama de irradiação de azimute da antena SWAA em 28 e 38 GHz* 32

Figura 2.17 – *Diagramas de irradiações da antena corneta em 28 e 38 GHz.* 33

Figura 2.18 – *Diagrama de irradiação da antena omnidirecional em 28 GHz.* 33

Figura 2.19 – *Representação experimental em ambiente indoor do efeito do comportamento aleatório do canal em 28 GHz.* 35

Figura 2.20 – *Representação experimental em ambiente indoor do efeito do comportamento aleatório do canal em 38 GHz.* 35

Figura 2.21 – *Representação experimental em ambiente outdoor do efeito do comportamento aleatório do canal em 28 GHz.* 36

Figura 2.22 – *Representação experimental em ambiente outdoor do efeito do comportamento aleatório do canal em 38 GHz.* 36

Figura 2.23 – *Representação experimental para ponto medida.* 37

Figura 2.24 – *Representação dos resultados experimentais para suavizar os efeitos dos*

múltiplos percursos em ambiente indoor em 28 GHz. 37

Figura 2.25 – *Representação dos resultados experimentais para suavizar os efeitos dos múltiplos percursos em ambiente indoor em 38 GHz.* 38

Figura 2.26 – *Representação dos resultados experimentais para suavizar os efeitos dos múltiplos percursos em ambiente outdoor em 28 GHz.* 38

Figura 2.27 – *Representação dos resultados experimentais para suavizar os efeitos dos múltiplos percursos em ambiente outdoor em 28 GHz.* 39

Figura 3.0.2 - *WallMan interface de configuração das bases de dados.* 42

Figura 3.0.3 - *Representação final da base de dados gerada pelo software WallMan.* 44

Figura 3.0.4 - *Interface do software AMan.* 45

Figura 3.5 - *Interface do software ProMan.* 46

Figura 3.3 – *Mapa de cobertura do sinal propagado gerado pelo software ProMan em 28 GHz.* 48

Figura 3.4 – *Mapa de cobertura do sinal propagado gerado pelo software ProMan em 38 GHz.* 48

Figura 3.5 – *Mapa de cobertura do sinal propagado gerado pelo software ProMan em 28 GHz.* 50

Figura 3.6 – *Mapa de cobertura do sinal propagado gerado pelo software ProMan em 38 GHz.* 51

Figura 4.1 – *Ilustrações dos ambientes de análises indoors e outdoor com e sem a presença de pessoas.* 52

Figura 4.2 – *Ilustrações dos percursos definidos para os experimentos no prédio 2.* 53

Figura 4.3 – *Sistema de recepção com o arranjo de duas antenas na recepção* 63

Figura 4.4 – *Ilustrações dos percursos definidos para os experimentos no prédio 2.* 64

Figura 4.5 – *Ambiente outdoor das medições da perda de percurso e do coeficiente de propagação.* 72

Figura A.1 – *Medições da perda de percurso em 28 GHz com o arranjo de antenas SISO, sendo a transmissão configurada com a antena omnidirecional e a recepção com a antena corneta.* 80

Figura A.2 – *Medições da perda de percurso em 28 GHz com o arranjo de antenas SISO, sendo a transmissão configurada com a antena SWAA e a recepção com a antena corneta.* 81

Figura A.3 – *Medições da perda de percurso em 38 GHz com o arranjo de antenas SISO, sendo a transmissão configurada com a antena SWAA e a recepção com a antena corneta.* 82

Figura A.4 – *Medições da perda de percurso em 28 GHz com o arranjo de antenas SISO, sendo a transmissão e a recepção configurados com antenas cornetas de mesma características.* 83

Figura A.5 – *Medições da perda de percurso em 38 GHz com o arranjo de antenas SISO,*

sendo a transmissão e a recepção configurados com antenas cornetas de mesmas características. 84

Figura A.6 – *Medições da perda de percurso em 28 GHz com o arranjo de antenas SIMO (com a antena de transmissão omnidirecional e a recepção com duas antenas cornetas).* 85

Figura A.7 – *Medições da perda de percurso em 28 GHz com o arranjo de antenas SIMO (com a antena de transmissão SWAA e a recepção com duas antenas cornetas).* 86

Figura A.8 – *Medições da perda de percurso em 38 GHz com o arranjo de antenas SIMO (com a antena de transmissão SWAA e a recepção com duas antenas cornetas).* 87

Figura A.9 – *Medições da perda de percurso em 28 GHz com o arranjo de antenas SIMO, (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção.* 88

Figura A.10 – *Medições da perda de percurso em 28 GHz com o arranjo de antenas SIMO, (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).* 89

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - *Modelos de propagação.* 4

Tabela 2.1 - *Características físicas dos tijolos utilizados nas paredes analisadas.* 19

Tabela 2.2 - *Configuração do experimento de caracterização dos materiais.* 22

Tabela 2.3 - *Resultados do experimento da medida do coeficiente de reflexão.* 24

Tabela 2.4 - *Resultados do experimento da medida do coeficiente de reflexão.* 25

Tabela 2.5 - *Características das antenas utilizadas nos experimentos.* 32

Tabela 2.6 - *Configuração inicial utilizada nos equipamentos dos experimentos.* 34

Tabela 3.1 - *Configurações utilizadas no software Wallman para os materiais.* 43

Tabela 3.2 – *Coeficientes de propagação estimados somente no prédio 2 pelo software ProMan.* 49

Tabela 3.3 – *Coeficientes de propagação estimados nos 3 prédios pelo software ProMan.* 50

Tabela 4.1 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SISO (com a antena de transmissão omnidirecional e a recepção com a antena corneta).* 55

Tabela 4.2 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SISO (com a antena de transmissão SWAA e a recepção com a antena corneta).* 55

Tabela 4.3 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SISO (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).* 56

Tabela 4.4 – *Comparação dos valores dos coeficientes de propagação medidos e simulados.* 58

Tabela 4.5 – *Coeficiente de propagação obtido da média dos valores individuais de cada uma das três antenas utilizada na transmissão e comparados com o valor simulado.* 58

Tabela 4.6 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SIMO (com a antena de transmissão omnidirecional e a recepção com duas antenas cornetas).* 59

Tabela 4.7 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SIMO (com a antena de transmissão SWAA e a recepção com duas antenas cornetas).* 59

Tabela 4.8 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SIMO (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).* 60

Tabela 4.9 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas MISO (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).* 61

Tabela 4.10 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas MIMO 2x2 (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).* 62

Tabela 4.11 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SISO (com a antena de transmissão omnidirecional e a recepção com a antena corneta).* 65

Tabela 4.12 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SISO (com a antena de transmissão SWAA e a recepção com a antena corneta).* 66

Tabela 4.13 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SISO (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).* 66

Tabela 4.14 – *Comparação dos valores dos coeficientes de propagação medidos e simulados.* 68

Tabela 4.15 – *Coeficiente de propagação obtido da média dos valores individuais de cada uma das três antenas utilizada na transmissão e comparados com o valor simulado.* 68

Tabela 4.16 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SIMO (com a antena de transmissão omnidirecional e a recepção com duas antenas cornetas).* 69

Tabela 4.17 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SIMO (com a antena de transmissão SWAA e a recepção com duas antenas cornetas).* 69

Tabela 4.18 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SIMO (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).* 70
Tabela 4.19 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas MISO (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).* 71
Tabela 4.20 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas MIMO 2x2 (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).* 71
Tabela 4.21 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SISO (com a antena de transmissão omnidirecional e a recepção com a antena corneta).* 73
Tabela 4.22 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SISO (com a antena de transmissão SWAA e a recepção com a antena corneta).* 73
Tabela 4.23 – – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SISO (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).* 73
Tabela 4.24 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas MIMO 2x2 (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).* 74

Lista de Abreviaturas e Siglas

2G	Segunda geração de comunicações móveis
3G	Terceira geração de comunicações móveis
4G	Quarta geração de comunicações móveis
5G	Quinta geração de comunicações móveis
ECL	*Excess Channel Loss*
EIRP	*Effective Isotropic Radiated Power*
FCC	*Federal Communications Commission*
HIPERLAN	*High-Performance Radio Local Area Network*
Inatel	Instituto Nacional de Telecomunicações
ITS	*Intelligent Transport Systems*
ITU	*International Telecommunication Union*
ITU-RR	*International Telecommunication Union – Radio Regulations*
LMDS	*Local Multipoint Distribution Service*
LOS	*Line-of-Sight*
MBS	*Mobile Broadband Systems*
MDF	*Medium Density Fiberboard*
MIMO	*Multiple-Input Multiple-Output*
MISO	*Multiple-Input Single-Output*
MMDS	*Multichannel Multipoint Distribution Systems*
NGI	*Next Generation Internet*
NLOS	*Non-Line-of-Sight*
PLE	*Path Loss Exponent*
PNA	*Power Network Analyzer*
SIMO	*Single-Input Multiple-Output*
SISO	*Single-Input Single-Output*
SWAA	*Slotted-Waveguide Antenna Array*
UHF	*Ultra High Frequency*
VHF	*Very High Frequency*
WLAN	*Wireless Local Area Network*
WRC	*World Radiocommunication Conference*

Lista de Símbolos

$(P_R)_{LOS}$	Potência recebida com visada direta
$(P_R)_{Refl}$	Potência recebida com reflexão
$\overline{PL}$	Perda de percurso média
$\bar{x}$	Coordenada x médio
$\bar{y}$	Coordenada y médio
$\bar{\sigma}$	Desvio padrão médio
c	Velocidade da luz no vácuo
$C_{95\%}$	Confiança de 95%
d	Distância
d_0	Distância da região de Fraunhofer
d_1	Distância entre o transmissor e a superfície de reflexão
d_2	Distância entre a superfície de reflexão e o transmissor
d_{LOS}	Distância referente a visada direta entre transmissor e receptor
f	Frequência
G_R	Ganho da antena de recepção
G_T	Ganho da antena de transmissão
H	Polarização horizontal da antena
i	Índice da amostra do sinal
k	Número de medidas necessária para confiabilidade de 95%
n	Expoente de perda de percurso
n_c	Coeficiente de propagação obtido ambiente controlado
n_{nc}	Coeficiente de propagação obtido ambiente não controlado
n_s	Coeficiente de propagação obtido por simulação
P_L	Perda de percurso
P_R	Potência de recepção
P_T	Potência de transmissão
R	Maior dimensão física da antena
t_{k-2}	Fator de confiança
V	Polarização vertical da antena
x	Coordenada x curva de regressão utilizada na medida (distância)
y	Coordenada y curva de regressão utilizada na medida (Amplitude)
π	Constante que equivale 3,1415...
X_σ	Variável aleatória que representa os efeitos do canal de comunicação
E	Erro máximo admitido em cada medição
Γ	Coeficiente de reflexão
α	Coeficiente angular da curva de regressão
β	Coeficiente linear da curva de regressão
λ	Comprimento de onda
θ	Ângulo formado entre o sinal incidente e refletido
$\sigma_{máx}$	Desvio padrão máximo

Resumo

Esta Dissertação de Mestrado tem por objetivo a apresentação de medições de propagação de sistemas de comunicações móveis na faixa de ondas milimétricas, mais precisamente nas bandas de 28 e 38 GHz. Inicialmente, realizou-se a caracterização de diferentes materiais, oriundos em construções civis Brasileiras, em função da perda por penetração e do coeficiente de reflexão. Os valores obtidos nas caracterizações foram utilizados como parâmetros de entrada das simulações numéricas, as quais foram realizadas utilizando o software Winprop™ da empresa Altair. Investigou-se numericamente e experimentalmente a perda de percurso e o expoente da perda de percurso (PLE *ou Path Loss Exponent*) em ambientes indoor e outdoor para aplicações SISO (*Single-Input Single-Output*), SIMO (*Single-Input Multiple-Output*), MISO (*Multiple-Input Single-Output*) e MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*).

Palavras-Chave: Coeficiente de reflexão, comunicações móveis, ondas milimétricas, perda de percurso e perda por penetração propagação.

Abstract

This Master Thesis reports propagation measurements of wireless communication systems operating in millimeter waves (mm-waves), more precisely in the 28 and 38 GHz bands. Initially, we have characterized diverse materials, utilized in the Brazilian civil constructions, as a function of penetration loss and reflection coefficient. The obtained values have been applied as input parameters of numerical simulations, carried out using Altair Winprop^{TM}. Numerical and experimental investigations of path loss and path loss exponent (PLE) have been realized in indoor and outdoor environments, aiming SISO (*Single-Input Single-Output*), SIMO (*Single-Input Multiple-Output*), MISO (*Multiple-Input Single-Output*) and MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) applications.

.

Keywords: Loss penetration, millimeter waves, mobile communications, path loss, propagation and reflection coefficient.

Capítulo 1

1. Introdução

1.1 Contextualização e Motivação

As redes de acesso das operadoras de telecomunicações têm demandado maiores taxas e larguras de banda para escoar o alto fluxo de dados gerado pelos seus usuários. Projeções realizadas pela empresa Cisco [1], apresentadas na Figura 1.1, indicam que o tráfego global de dados atingirá 49 exabytes por mês até o ano de 2021, o que representa um aumento de sete vezes em relação ao ano de 2016. Globalmente, no final do ano de 2018, os números de conexões com as tecnologias de segunda geração (2G) e de terceira geração (3G) das comunicações móveis sejam ultrapassados pelos números de conexões com a tecnologia de quarta geração (4G). Adicionalmente, estima-se que até o ano de 2021 a tecnologia 4G corresponda a 53% das conexões, representando 79% do tráfego global de dados. Prevê-se ainda para o ano de 2021 que a emergente quinta geração das comunicações móveis (5G) corresponderá a 0,2% das conexões, representando 1,5% do tráfego de dados global [1].

Para o período de 2020 a 2030, a ITU (*International Telecommunication Union*) projeta uma taxa média de crescimento anual de 55% no tráfego global de dados [2]. Essa taxa foi estimada em função do histórico de crescimento global médio de 25% desde o ano 2000, devido às evoluções tecnológicas que transcorreram nas comunicações móveis. Adicionalmente foi considerada uma taxa de crescimento médio de 15% ao ano nas conexões banda larga de comunicações móveis, bem como um crescimento de 5% ao ano de novos usuários que adentrarão às redes das operadoras [2].

Com base nas estimativas da crescente demanda de dados, torna-se necessário utilizar novas faixas de frequências para as comunicações móveis. Visto que as faixas de frequências tradicionais de VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*) já estão todas congestionadas. A faixa de ondas milimétricas tem

sido considerada promissoras para as futuras redes celulares 5G, visto que são capazes de prover vazões de até 100 Gbit/s com larguras de faixa de 1 GHz [3]. Entretanto, o aumento da frequência da portadora para a faixa de ondas milimétricas culmina em novos desafios técnicos para a geração, a transmissão, a propagação e a recepção do sinal de RF.

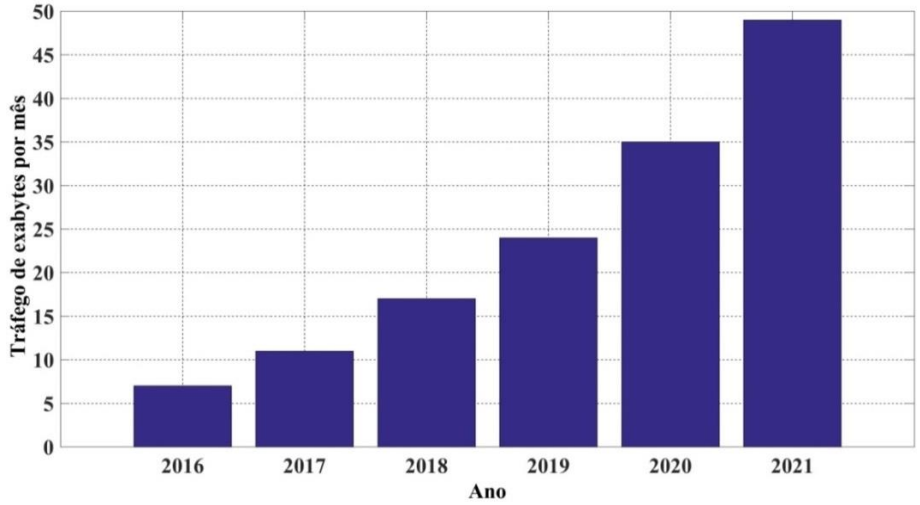


Figura 1.1 - *Previsão de crescimento global do tráfego de informações nas redes de comunicações móveis [1]*.

Em escala global, as faixas de frequências a serem utilizadas nas redes 5G foram muito discutidas nos últimos anos, sendo algumas delas atualmente utilizadas para outros sistemas de comunicação sem fio, tais como comunicações via satélite ou links ponto-a-ponto. Na Figura 1.2 são apresentadas as faixas de frequências potenciais a serem utilizadas no padrão 5G. Em outubro de 2019, o ITU-RR (*International Telecommunication Union – Radio Regulations*) reunirá os seus 193 países membros na conferência WRC-19 (*World Radiocommunication Conference* 2019), com a finalidade de apresentar as investigações já realizadas com as faixas de frequências candidatas, bem como as futuras tomadas de decisões referentes ao espectro de frequências para a utilização do padrão 5G [5].

Análises de potência na faixa de ondas milimétricas em diferentes tipos de ambientes *indoor* e *outdoor* é de suma importância para o planejamento e a implantação dos sistemas 5G, dada à complexidade do canal rádio móvel nesta porção do espectro eletromagnético [6]. Prevê-se atenuações muito superiores às dos sistemas 3G e 4G, assim como variação da potência média recebida. Portanto, torna-

se fundamental caracterizações, predições e investigações experimentais de comunicações sem fio em ondas milimétricas.

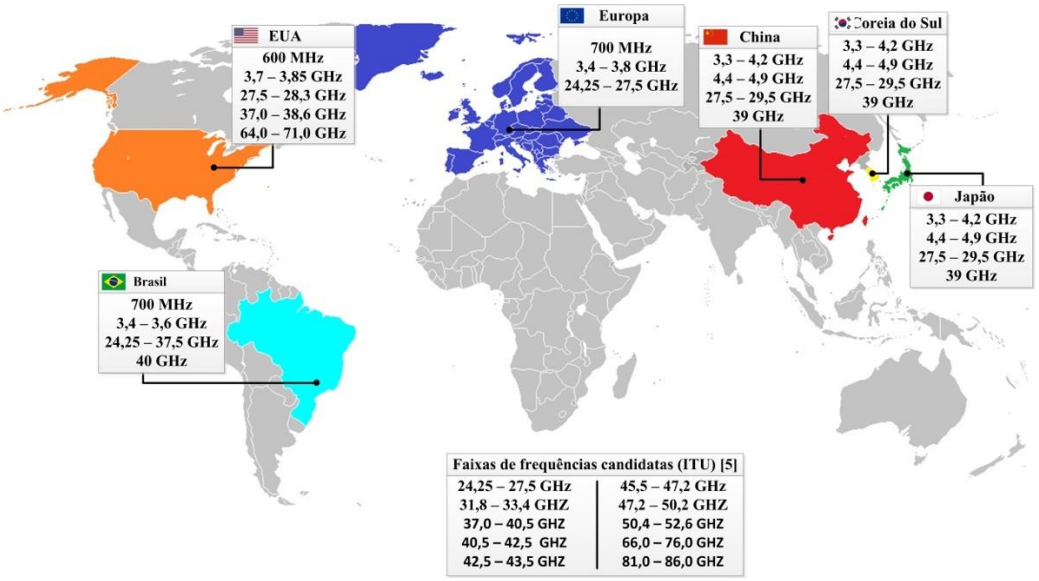


Figura 1.2 - *Faixas de frequência potenciais para utilização no padrão 5G.*

1.2 Revisão Bibliográfica

O sistemas de comunicações sem fio surgiram no século XIX, quando H. R. Hertz, N. Tesla, G. Marconi, L. de Moura e outros cientistas promoveram diversos experimentos com ondas eletromagnéticas para a transmissão de informações pelo ar [7]. Marconi, em 1897, patenteou o telégrafo sem fio como sendo o primeiro sistema de comunicação sem fio da história [7]. O progresso dos sistemas de comunicações sem fio se deu por melhorias nos serviços de voz, de vídeo e de dados, os quais refletiram no aumento da frequência e da largura de faixa para atender às demandas de transmissões de dados demandadas do mercado. Desenvolveram-se vários modelos de propagação para estimar a potência do sinal de RF em determinada área de cobertura [8].

A aplicação destes modelos para o planejamentos do sistemas, tanto em ambientes *indoor* quanto em *outdoor*, resulta em redução de custos de otimização do desempenho para as operadoras [3]. Tais modelos podem ser determinísticos, estatísticos ou uma combinação de ambos para a obtenção do valor médio da potência recebida em função da distância entre o transmissor e o receptor e das propriedades do canal de comunicação, que influenciam a propagação do sinal.

Tabela 1.1 - *Modelos de propagação.*

Nome	Faixa de frequência	Ano	Referência
Friis	$f < 4GHz$	1946	[20] [21]
Egli	$30MHz < f < 3GHz$	1957	[22]
Okumura	$150MHz < f < 1{,}5GHz$	1968	[23]
Edwards-Durkin	$f \in 85, 105, 167\ e\ 441MHz$	1969	[24] [25]
Allsebrook-Parsons	$f \in 85, 167\ e\ 441MHz$	1977	[25]
Blomquist-Ladell	$f \in 85, 167\ e\ 441MHz$	1977	[25]
ITU-R P.530	$450MHz < f < 45GHz$	1978	[26]
Okumura-Hata	$100MHz < f < 1{,}5GHz$	1980	[27]
Longley-Rice	$20MHz < f < 20GHz$	1982	[28]
Walfisch-Bertoni	$800MHz < f < 2GHz$	1988	[29]
Motley-Keenan	$f \in 900\ e\ 1700MHz$	1988	[30]
Flat-Edge	$900MHz < f < 1{,}8GHz$	1991	[31]
TM90	$40MHz < f < 1GHz$	1991	[32]
COST-231	$50MHz < f < 2GHz$	1993	[33]
Walfisch-Ikegami	$800MHz < f < 2GHz$	1993	[29]
Hata-Davidson (2-Ray)	$150MHz < f < 1{,}5GHz$	1994	[17]
Ericsson (Ericsson 9999)	$150MHz < f < 1{,}9GHz$	1997	[34]
Erceg-Greenstein	$f \approx 1{,}9GHz$	1999	[35]
Directional Gain Reduction Factor (GRF)	$f \approx 1{,}9GHz$	1999	[36]
Rural Hata	$f \in 160, 450, 900\ e\ 1800MHz$	2000	[37]
Stanford University Interim (SUI	$2{,}5MHz < f < 2{,}7GHz$	2001	[38]

Basic/IEEE 802.16d)			
ITU-R P.1546	$30MHz < f < 3GHz$	2001	[39]
ITU-R in VHF/UHF	$f \in 40, 160,$ $450, 900, 1.500\ e\ 2.000MHz$	2002	[40]
Green-Obaidat	$f \approx 2{,}4GHz$	2002	[41]
ECC-33	$3{,}4GHz < f < 3{,}8GHz$	2003	[42]
Riback-Medbo	$460MHz < f < 5{,}1GHz$	2006	[43]
ITU-R P.452	$100MHz < f < 50GHz$	2007	[44]
IMT-2000	$800MHz < f < 2GHz$	2007	[29]
Winner II	$2GHz < f < 6GHz$	2007	[45]
de Souza	$f \approx 2{,}4GHz$	2008	[46]
ITU-R P.1812	$30MHz < f < 3GHz$	2009	[47]
Herring	$f \approx 2{,}4GHz$	2010	[48]
Cost 231 - Multi-Hall	$f \approx 837MHz$	2013	[49]
ITU-R P.1238	$300MHz < f < 100GHz$	2017	[50]
Degli-Espost/Vitucci/Martin	$f \approx 858\ e\ 1935MHz$	2017	[51]

Embora os sistemas de comunicações atuais, como o 4G, já forneçam altas taxas de dados, ainda há muito o que evoluir para atender as premissas do padrão 5G. Isto torna inevitável a exploração de novas faixas de frequências, que sejam capazes de prover larguras de faixa da ordem de centenas de MHz, como por exemplo, a faixa de ondas milimétricas (*mm-waves*) [9]. Recentemente, diversos institutos têm conduzido pesquisas na área de propagação em *mm-waves*, principalmente a respeito da perda de percurso [11] [12] [13] [14] [15]. Tais estudos contribuem para a criação de novos modelos de propagação para altas frequências, já que a maioria dos atuais são precisos para até 6 GHz [16]. Como a análise da perda de percurso reflete apenas a condição momentânea do canal de comunicação investigado, são necessárias

investigações dos mecanismos de propagação em diferentes condições e tipos de ambientes (*indoor* e *outdoor*).

A inclinação da curva que representa a perda de percurso está diretamente associada ao valor estimado do parâmetro PLE (*Path Loss Exponent*), sendo a condição de propagação no espaço livre para PLE = 2. Em ambientes com condições de propagação adversas e/ou muito densos, o valor do PLE pode chegar a 6, conforme resultados experimentais para 914 MHz relatados em [17]. Trabalhos na banda de 28 GHz [18] [19] reportaram PLE entre 2,1 e 4,7 para ambientes *indoor* com linha de visada (LOS ou *Line-of-Sight*) e de 3,2 a 6,4 para ambientes sem linha de visada (NLOS ou *Non-Line-of-Sight*). Por outro lado, obteve-se PLE entre 2,4 e 3,7 para ambientes *outdoor* com LOS [18].

É importante destacar que a utilização das ondas milimétricas nas comunicações sem fio não é uma exclusividade do padrão 5G. Existem outros serviços operantes nessas faixas, tais como: WLAN (*Wireless Local Area Network*), ITS (*Intelligent Transport Systems*), NGI (*Next Generation Internet*), dentre outras aplicações por radiodifusão [52]. Por exemplo, em fevereiro de 1998 nos Estados Unidos, o FCC concedeu a utilização da banda de 28 GHz para os serviços de LMDS (*Local Multipoint Distribuition Service*) [53]. Já no ano de 1999, concedeu-se as faixas de 38,6 a 40 GHz e de 59 – 60 GHz para comunicações ponto-multiponto fixas ou móveis e aplicações *indoor* de curto alcance, respectivamente [53]. A Europa também, nesse mesmo período, iniciou a utilização das bandas de 17 GHz para os serviços de HIPERLAN (*High-Performance Radio Local Area Network*), de 42 GHz para os serviços de MMDS (*Multichannel Multipoint Distribution Systems*) e de 40 e 60 GHz para o serviço de MBS (*Mobile Broadband Systems*) [54].

Além dos mecanismos de propagação, o planejamento eficiente de um enlace na faixa de ondas milimétricas deve também considerar a perda por penetração e a reflexão do sinal de RF transmitido. Pesquisas anteriores reportaram que a perda por penetração em paredes de vidro para as frequências de 9,6, 28,8 e 57,6 GHz eram praticamente nulas [55]. Entretanto, os vidros atuais possuem sustentações metálicas e revestimentos para isolamento acústico e contra raios ultravioleta, os quais resultaram em um aumento da atenuação entre 25 a 50 dB para as mesmas

frequências anteriormente analisadas [56]. Já para paredes de gesso atuais, a perda por penetração variou de 5,4 a 8,1 dB nas frequências de 9,6, 28,8 e 57,6 GHz [56]. Os trabalhos conduzidos por [55] comprovaram que a perda por penetração média em paredes de tijolos de alvenaria foi de 28,3 dB para 28 GHz. Também foram conduzidas investigações experimentais deste parâmetro em 60 GHz [57], obtendo-se as atenuações médias de 6 dB em paredes de *drywall*, 3,6 dB em vidros claros e 10,2 dB em vidros escuros.

O trabalho [56] comprovou que as reflexões sofridas pelo sinal irão aumentar a atenuação de 15 a 20 dB em 28 GHz, quando comparado ao caso de visada direta entre o transmissor e o receptor. A referência [55] apresenta os resultados experimentais do coeficiente de reflexão (S_{11}) para um ângulo de incidência de 10°: S_{11} = 0,896 para vidros escuros; S_{11} = 0,740 para vidros claros; S_{11} = 0,815 para paredes de tijolos de alvenaria.

1.3 Objetivos e Contribuições

Esta Dissertação de Mestrado tem por objetivo a apresentação de medições de propagação de sistemas de comunicações móveis nas bandas de 28 e 38 GHz. Inicialmente, realizou-se a caracterização de diferentes materiais, encontrados em construções civis Brasileiras, em função da perda por penetração e do coeficiente de reflexão. Os valores obtidos na caracterização foram utilizados como parâmetros de entrada das simulações numéricas, as quais foram realizadas utilizando o *software Winprop*™ da empresa Altair. Investigou-se numericamente e experimentalmente a perda de percurso e o expoente da perda de percurso - PLE (*Path Loss Exponent*) em ambientes *indoor* e *outdoor* com e sem linha de visada, utilizando sistemas SISO (*Single-Input Single-Output*), MISO (*Multiple-Input Single-Output*), SIMO (*Single-Input Multiple-Output*) e MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*).

As simulações numéricas tomou como base as seguintes métricas em diferentes ambientes do campus do Inatel (Instituto Nacional de Telecomunicações): potência recebida; perda de percurso; PLE. A perda por penetração e o coeficiente de reflexão dos materiais utilizados nas paredes, portas e janelas dos edifícios do Inatel foram

incorporados às simulações, com a finalidade de torná-las realísticas. Além disso, configurou-se os sistemas de transmissão e recepção no *software* de acordo com as especificações dos equipamentos e componentes de RF utilizados nos experimentos: frequência; potência; perdas nos cabos e conectores; propriedades eletromagnéticas das antenas. Os experimentos foram realizados nos mesmos ambientes *indoor* e *outdoor* definidos nas simulações.

As principais contribuições deste trabalho são: a caracterização de materiais da construção civil do Brasil e a utilização dos mesmos como parâmetros de entrada das simulações numéricas; simulações numéricas em ambientes indoor e outdoor sob condições de linha de visada e sem linha de visada; implementação e investigação experimental de sistemas sem fio operando nas bandas de 28 e 38 GHz, voltados para as futuras redes celulares de quinta geração (5G).

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos:

- **Capítulo 2:** apresenta os conceitos básicos de propagação (Seção 2.1), a caracterização de materiais na faixa de ondas milimétricas (Seção 2.2), os cenários empregados nas simulações e nos experimentos (Seção 2.3) e, por fim, as metodologias utilizadas nas medições para obtenção dos valores da perda de percurso e do parâmetro PLE (Seção 2.4).
- **Capítulo 3:** concernente à apresentação do *software* WinProp^{TM} da empresa Altair, o qual foi utilizado para estimar numericamente a perda de percurso e o parâmetro PLE. Posteriormente, descreve-se o método numérico para as simulações, assim como os resultados numéricos para ambientes *indoor* e *outdoor*.
- **Capítulo 4:** relata-se a implementação e os resultados experimentais dos sistemas sem fio nas bandas de 28 e 38 GHz. Explorou-se as configurações SISO, SIMO e MIMO.
- **Capítulo 5:** reporta-se as conclusões finais dos resultados numéricos e experimentais e sugere-se trabalhos futuros.

Capítulo 2

2.1 Conceitos de Propagação

Um sistema de comunicação pode fazer uso da interface aérea (ar) como meio de transmissão para o enlace entre o transmissor e o receptor. Essa interface é chamada de canal de comunicação sem fio, ou simplesmente canal *Wireless*, cujo o sinal baseia-se em ondas eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas transmitidas irão interagir com o ambiente rádio móvel, e somente uma pequena parcela dessa energia será captada pela antena receptora.

Os efeitos aleatórios e fundamentais das interações entre o sinal propagado e as características do ambiente já sejam bem conhecidas e compreendidas, ainda é desafiador descrever o comportamento do canal sem fio sob uma única forma analítica e fechada. As complexidades e os desafios dessas descrições aumentam principalmente quando as frequências utilizadas na comunicação passam a ser da ordem de dezenas de gigahertz, ou seja, nas faixas de frequências de ondas milimétricas. Diversas campanhas de medições têm sido realizadas em cenários reais para compreender os mecanismos de propagação e avaliar novos modelos de propagação para *mm-waves* [12].

O aumento da frequência de operação tem como principal desvantagem o aumento significativo da atenuação provocada pelo canal, conhecida como perda de percurso. É definida como perda de percurso a razão entre as intensidades das potências transmitida e as recebida, conforme descrito por [58]

$$P_L = \frac{P_T}{P_R}, \tag{2.1}$$

onde P_L é a perda de percurso e P_R e P_T são as potências de recepção e transmissão, respectivamente. O impacto da perda de percurso em diferentes tipos de ambientes pode ser avaliado a partir da adaptação da fórmula de Friis em um cenário LOS, conforme descrito por [17]

$$P_R = P_T \times G_R \times G_T \times \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^n, \tag{2.2}$$

onde G_R e G_T são, na devida ordem, os ganhos das antenas de recepção e transmissão, d é a distância de separação entre as antenas e λ é o comprimento de onda [7]. O valor de n representa o expoente da perda de percurso (PLE), que indica o crescimento da perda ao longo do percurso em função da distância e do ambiente de propagação.

Outro fator que prejudica a propagação das ondas eletromagnéticas pela interface aérea é a atenuação pela absorção dos gases atmosféricos, principalmente com relação ao gás oxigênio. A Figura 2.1 apresenta a atenuação provocada pelo oxigênio em função da frequência do sinal. Pode-se observar que nas frequências inferiores a 10 GHz, a atenuação máxima provocada é de apenas 0,015 dB/km. Para as faixas de 28 e 38 GHz, consideradas potenciais para comunicações móveis 5G, apresentam uma atenuação de 0,10 e 0,12 dB/km, respectivamente [59]. Por outro lado, em torno de 60 GHz a atenuação é considerada mais impactante podendo atingir picos de até 15 dB/km. Esses picos de atenuações elevados irão ocorrer novamente nas bandas de frequências de 183 e 325 GHz com valores que podem atingir até 28 e 38 dB/km, respectivamente.

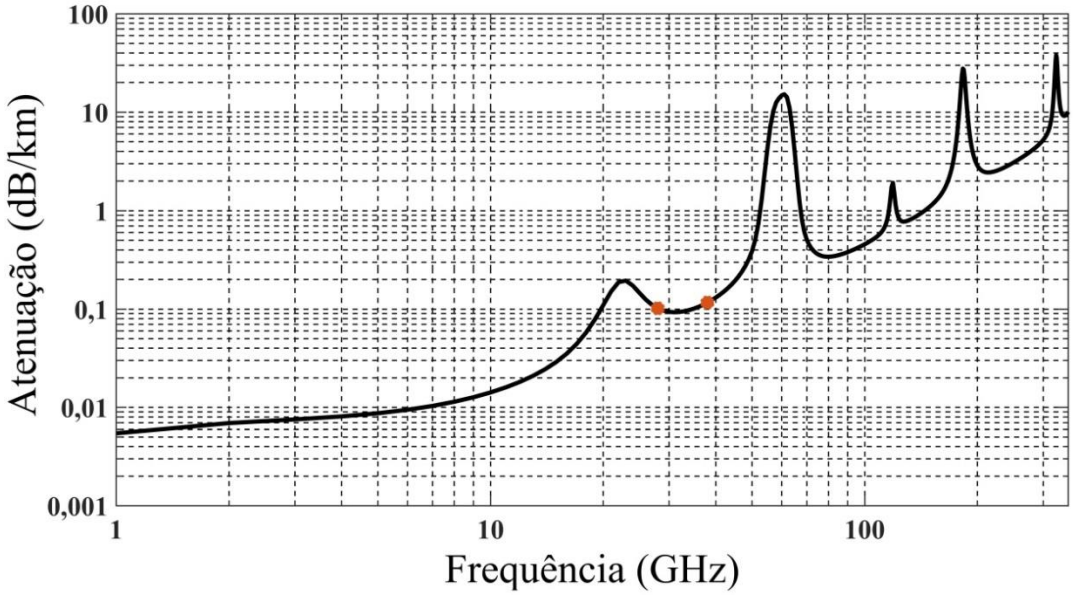


Figura 2.1 - *Atenuação no sinal provocada pelo gás oxigênio [60].*

Além disso, a atenuação em ondas milimétricas é significativamente impactada devido às precipitações de chuvas, uma vez que as gotas de água são da ordem de grandeza do comprimento de onda do sinal [60]. A Figura 2.2 mostra a relação da atenuação provocada pela precipitação de chuva em função da frequência [61].

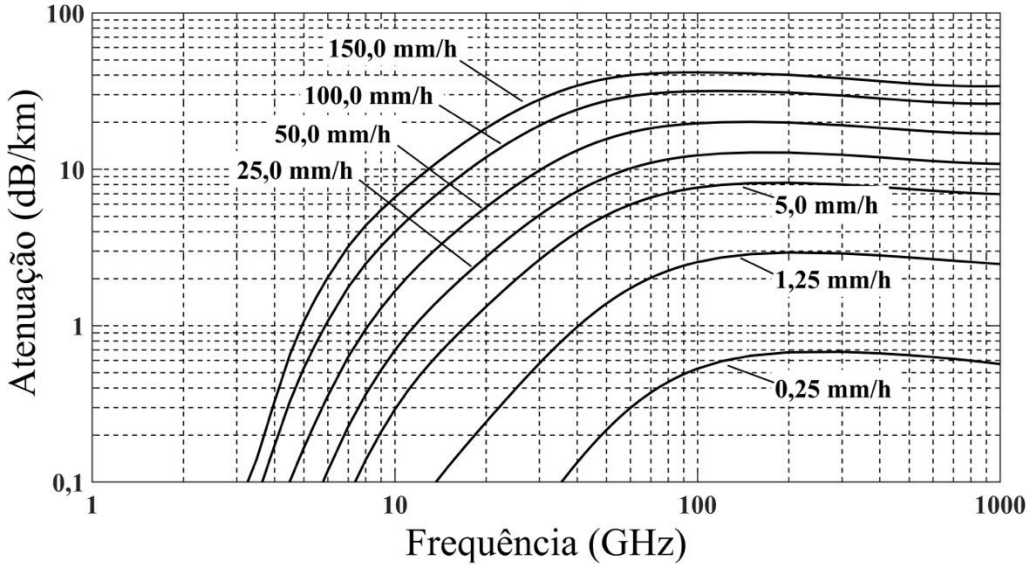


Figura 2.2 - *Atenuação no sinal provocado por precipitação de chuva [61]*.

2.2 Caracterizações dos Materiais em Ondas Milimétricas

A perda por penetração é menos intensa até a proximidade do limite superior da faixa de UHF, bem como nas superfícies das construções que utilizam materiais com maior homogeneidade de composição [56]. Entretanto, para ondas milimétricas, a utilização de materiais heterógenos nas construções civis atuais tendem a elevar a intensidade da atenuação provocada no sinal [56], variando entre 25 a 50 dB em 28 e 38 GHz.

A perda por penetração nos materiais pode ser determinada pela diferença entre as potências recebidas com visada direta e sem obstrução (Figura 2.3a) e com obstrução (2.3b) [55]

$$P_R = P_T + G_T + G_R - 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) - ECL, \tag{2.3}$$

onde o valor de ECL (*Excess Channel Loss*) é a atenuação acrescida devido à inclusão do material analisado e d é a distância mínima de separação entre as antenas de transmissão e recepção para operarem na região de Fraunhofer, dada por [62]

$$d = \frac{2R^2}{\lambda}, \tag{2.4}$$

onde *R* é representa a maior dimensão física da antena.

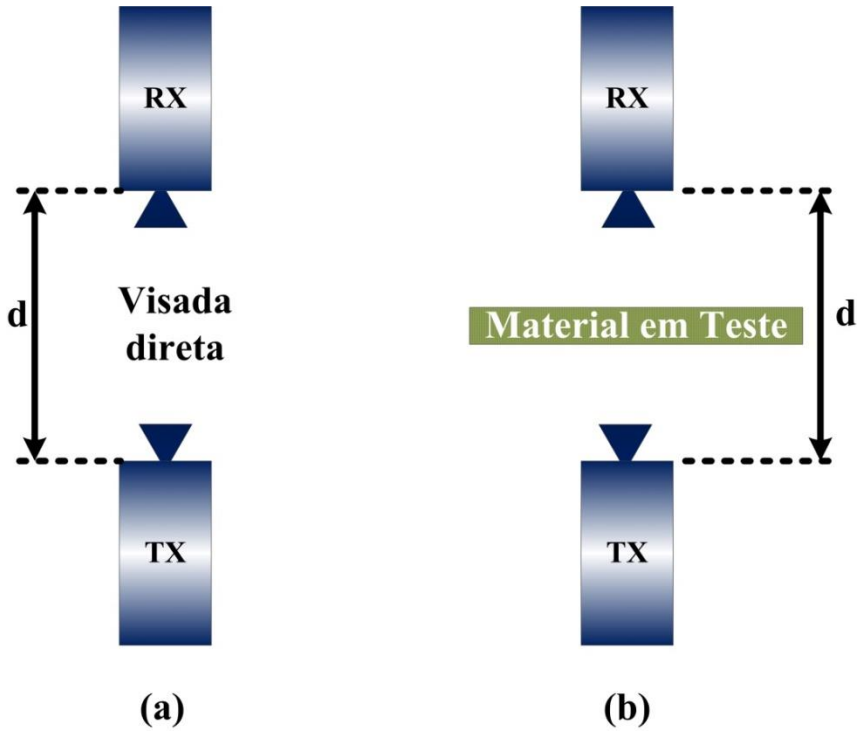


Figura 2.3 - *Arranjo experimental utilizado para a caracterização da perda por penetração.*

O valor da potência recebida para um enlace LOS pode ser obtida pela formula de Friis [63]:

$$(P_R)_{LOS} = \frac{P_T \times G_T \times G_R \times \lambda^2}{(4\pi)^2 \times (d_{LOS})^2}, \tag{2.5}$$

onde $(P_R)_{LOS}$ é a potência recebida com visada direta e d_{LOS} é a distância em visada direta, conforme apresentado na Figura 2.4a. O valor da potência refletida é também obtido pela fórmula de Friis, porém, ponderado pelo valor do coeficiente de reflexão da superfície e considerando a distância total do percurso entre as antenas [63]

$$(P_R)_{Refl} = \frac{P_T \times G_T \times G_R \times \lambda^2}{(4\pi)^2 \times (d_1 + d_2)^2} |\Gamma|^2 , \tag{2.6}$$

onde $(P_R)_{Refl}$ é a potência recebida com reflexão, d_1 é a distância do transmissor até a superfície, d_2 é a distância da superfície até o receptor (Figura 2.4b) e Γ é o coeficiente de reflexão da superfície. As distâncias d_1 e d_2 devem ser superiores à distância da região de Fraunhofer das antenas de transmissão e recepção.

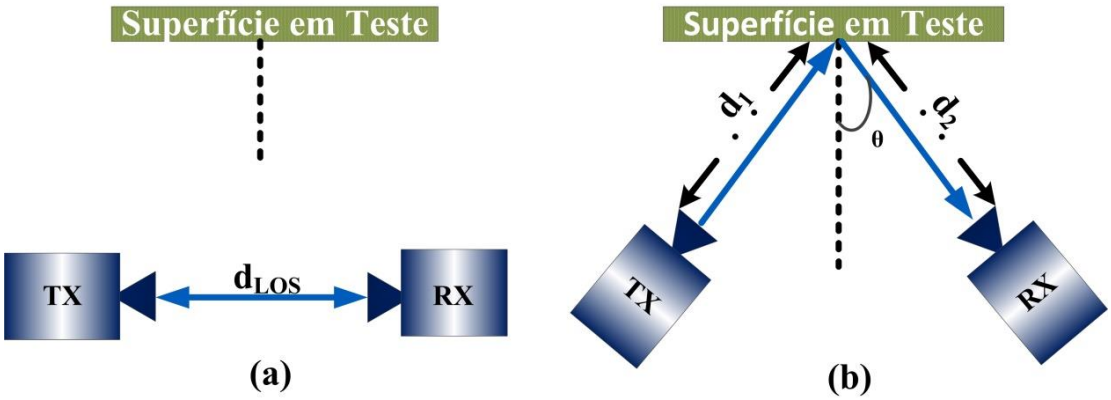


Figura 2.4 - *Arranjo experimental utilizado na caracterização do coeficiente de reflexão.*

O valor do coeficiente de reflexão da superfície é determinado pela razão entre as Equações (2.6) e (2.5), que irá resultar em [63]:

$$|\Gamma| = \frac{d_1 + d_2}{d_{LOS}} \sqrt{\frac{(P_R)_{Refl}}{(P_R)_{LOS}}} \tag{2.7}$$

Se o somatório das distâncias d_1 e d_2, for igual ao valor da distância com visada direta (d_{LOS}), o valor do coeficiente de reflexão da superfície é determinado pela raiz quadrada da razão entre a potência recebida refletida e a potência recebida com visada direta. Considerando que o valor da intensidade da potência recebida com

visada direta será sempre maior que o valor da intensidade da potência recebida proveniente do sinal de reflexões, resultará em valores do coeficiente de reflexão compreendidos entre 0 e 1. Para valores do coeficiente de reflexão próximo de zero, a intensidade da potência $(P_R)_{Refl}$ será muito menor do que a intensidade da potência $(P_R)_{LOS}$. Portanto, a potência recebida total será praticamente o valor obtido da potência com visada direta, ou seja, o sinal recebido pouco refletido pelas superfícies do ambiente.

O valor do coeficiente de reflexão próximo de uma unidade indica que o valor da intensidade da potência $(P_R)_{Refl}$ é próximo do valor da intensidade da potência $(P_R)_{LOS}$. Em outras palavras, a potência recebida total é o somatório das duas potências recebidas. Ou seja, o ambiente que o sinal propagou possui muitas reflexões. E dessa forma a potência captada pela antena será a combinação das potências recebidas com visada direta e da potência sem visada direta entre as antenas do sistema de comunicação sem fio.

As análises experimentais para obter os valores da perda por penetração e o coeficiente de reflexão dos principais materiais encontrados nas construções Brasileiras de alvenaria foram conduzidas em paredes de tijolos (com e sem instalações elétricas), paredes de gesso, divisórias de Eucatex, vidros e portas de madeira MDF (*Medium Density Fiberboard*) no campus do Inatel na cidade de Santa Rita do Sapucaí-MG.

Foram consideradas três diferentes tipos de paredes de tijolos: tijolos cerâmicos de nove furos; tijolos maciços sem furos; bloco ou tijolo de concreto. Todas as paredes analisadas possuíam o mesmo tipo de revestimento de argamassa com aproximadamente 0,8 cm de espessura em ambos os lados.

A primeira parede analisada foi de tijolo cerâmico de nove furos feito de argila vermelha cozida, conforme mostrado na Figura 2.5a [64]. A segunda parede analisada era de tijolos maciços sem furos, feitos de argila comum queimada, conforme apresentado na Figura 2.5b. Esse tipo de tijolo era o mais utilizado antes do surgimento do tijolo cerâmico de nove furos. A terceira parede analisada foi construída com blocos de concreto de três furos, conforme mostrado na Figura 2.5c.

Esse terceiro tipo de tijolo possui menor utilização nas construções de alvenaria brasileiras se comparado aos outros dois tipos apresentados anteriormente [64]. A Tabela 2.1 mostra as características físicas dos três tipos de tijolos utilizados nas paredes analisadas [64].

Tabela 2.1 - *Características físicas dos tijolos utilizados nas paredes analisadas.*

Tipo do tijolo	**Largura média (cm)**	**Altura Média (cm)**	**Comprimento médio (cm)**	**Massa média (kg)**
Cerâmico de nove furos	12	10	19	1,8
Maciço sem furos	12	06	24	2,3
Bloco de concreto de três furos	12	29	49	8,5

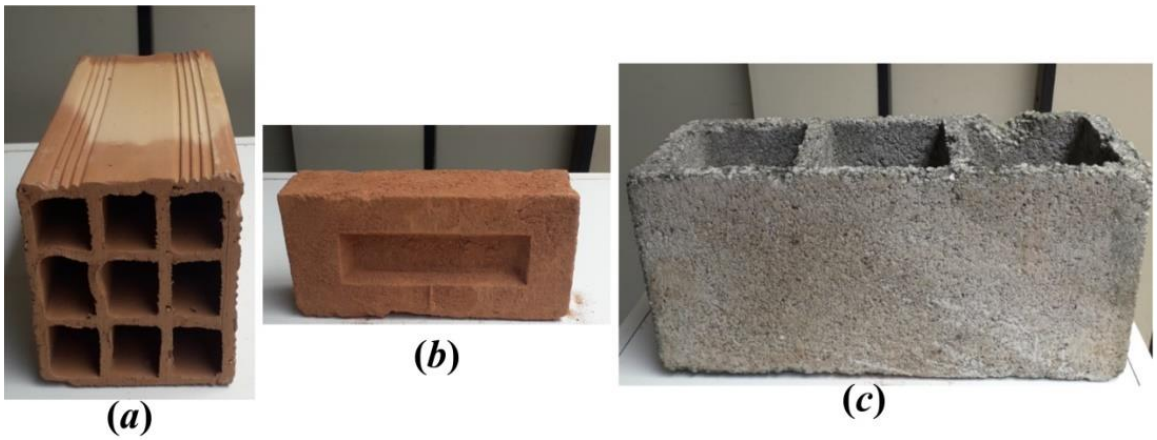


Figura 2.5 - *Tipos de tijolos encontrados nas paredes analisadas.*

Os tijolos foram dispostos longitudinalmente ao longo das paredes analisadas, assim como ilustrado na Figura 2.6. Também foram considerados trechos com fios condutores de energia elétrica feitos de cobre com diâmetro de 4mm, bem como quadros de distribuição de energia elétrica com disjuntores [65]. Os quadros de distribuição eram de 25 cm x 40 cm x 12 cm, instalados a 1,6 m de altura em relação

ao piso. O circuito elétrico interno dos quadros era também composto por disjuntores para a proteção de surtos elétricos.

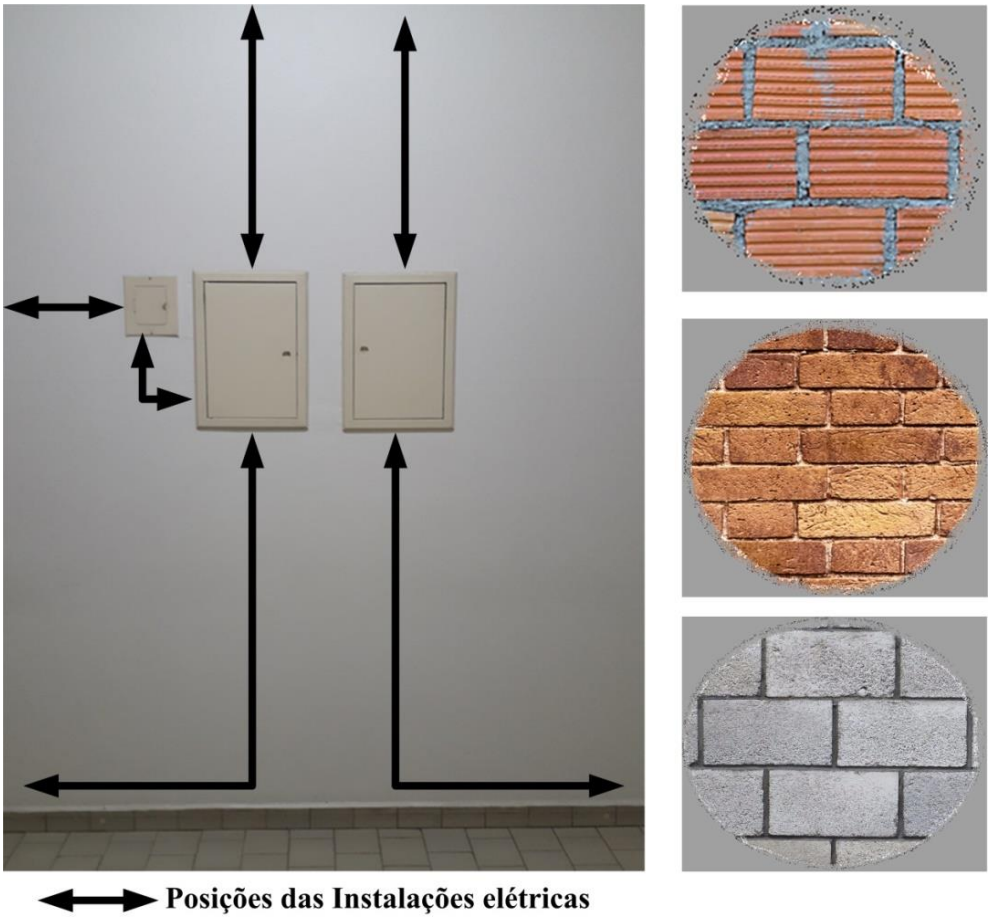


Figura 2.6 - *Disposição dos tijolos ao longo das paredes e as posições das instalações elétricas.*

Os vidros analisados foram do tipo temperado, utilizados em portas e janelas. E nas fachadas foram considerados vidros do tipo espelhado com proteção contra raios solares ultravioleta. Os níveis de transparência dos vidros das portas e janelas foram de 70% (Figura 2.7a), considerados levemente escuros) e 100% -transparentes (Figura 2.7b) [66]. O vidro espelhado é idêntico ao utilizado em fachadas (Figura 2.7c) e o seu nível de transparência é de 70% [66].

Utilizou-se o gerador de sinais *Keysight* EXG N5173B e o *FieldFox Microwave Analyser* N9952 para as análises em 28 e 38 GHz. As configurações todo experimento para a caraterização de materiais é apresentada na Tabela 2.2. A caracterização das atenuações provocadas por cabos e conectores foi realizada

utilizando o equipamento PNA *Network Analyzer* N5114A para a faixa de frequência de 10 MHz a 43,5 GHz, conforme resultados apresentados na Figura 2.8.

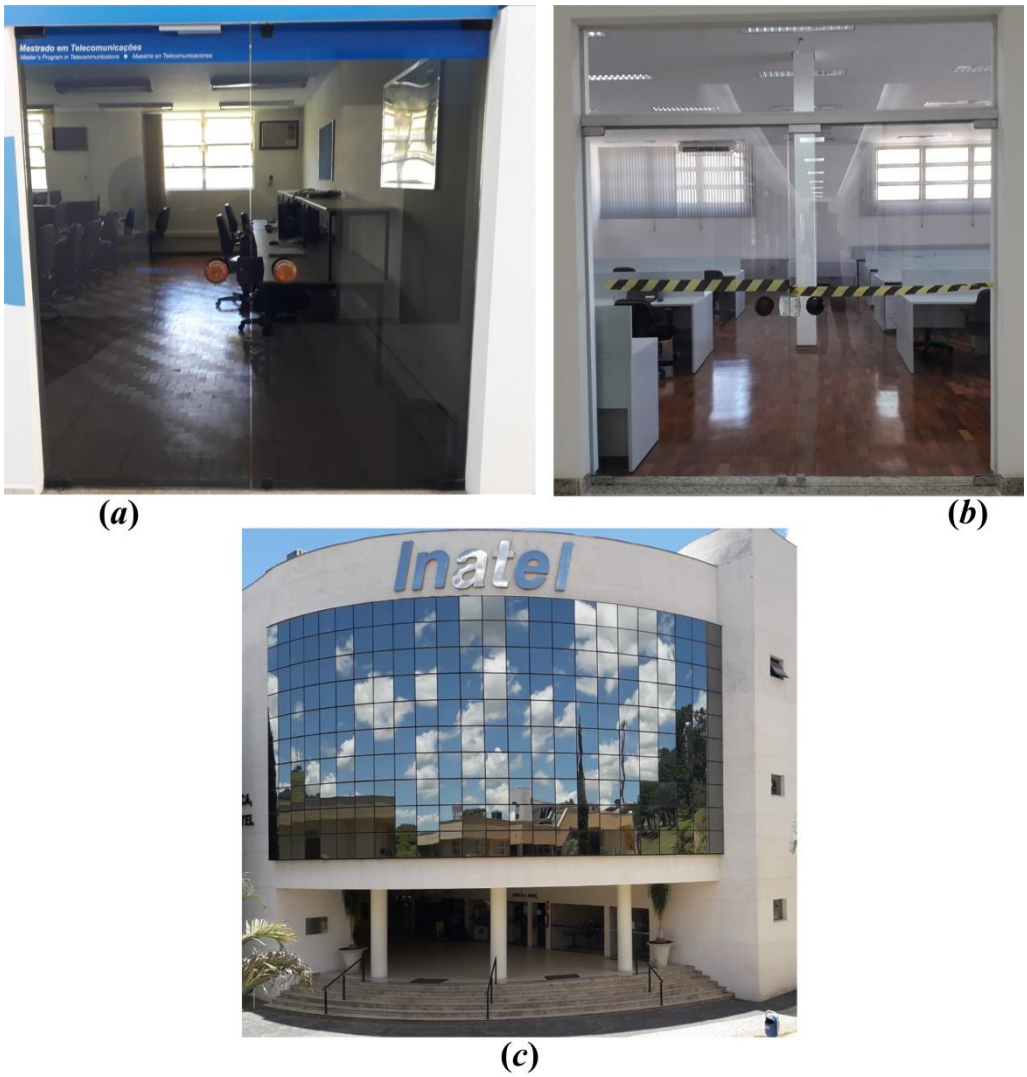


Figura 2.7 - *Tipos de vidros utilizados nos experimentos.*

Os valores encontrados nas medições da perda por penetração e do coeficiente de reflexão foram realizados com grau de confiabilidade de 95% e erro máximo de 0,5 dB. O número mínimo necessário de medidas para se obter essa confiabilidade é detalhado no anexo A. Foram tomadas 1001 amostras do sinal em um intervalo de tempo de 5 minutos. A Tabela 2.3 apresenta os resultados obtidos nos experimentos realizados da perda por penetração e na Figura 2.9 são apresentadas as montagens práticas realizadas nesse experimento.

Tabela 2.2 – *Configurações do experimento de caracterização dos materiais.*

Parâmetro	Frequência	
Antenas	Corneta	Corneta
Ganhos das antenas (TX e RX)	12,6 dBi	13,4 dBi
Atenuações nos cabos e conetores (Figura 2.8)	15,84 dB	19,89 dB
Potência de transmissão	3,24 dBm	6,49 dBm
EIRP	0 dBm	0 dBm
Ângulo de meia potência das antenas (TX e RX)	19° (V) 20,7° (H)	16° (V) 18,2° (H)
Altura de instalação em relação ao piso	1,70 m	1,70 m

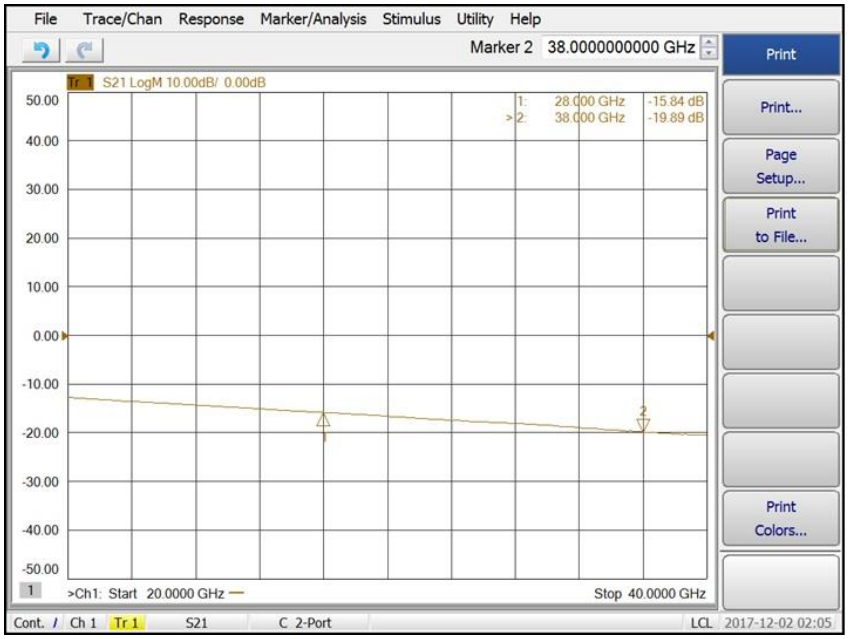


Figura 2.8 - *Atenuação medids nos cabos e conectores de RF.*

A Tabela 2.4 apresenta os resultados do coeficiente de reflexão medido nos ângulos θ igual 15°, 45° e 60° para as frequências 28 e 38 GHz, considerando somente a polarização vertical das antenas. As distâncias d_1 e d_2 foram de 1,5 m nas medições das paredes de tijolos cerâmicos e 2,5 m para as demais superfícies. Devido às distâncias d_1 e d_2 adotadas, as medições do coeficiente de reflexão não foram conduzidas em portas de madeira MDF e vidros espelhados, porque as suas respectivas dimensões físicas são inferiores às distâncias d_1 e d_2, o que poderia resultar em uma medição não confiável. Mediu-se o coeficiente de reflexão dos tijolos cerâmicos de nove furos sem instalação elétrica e com revestimento de argamassa, pois é o tipo mais comum encontrado nas construções de alvenaria. As paredes com tijolos maciços e de concreto de três furos não foram consideradas, mas medições do coeficiente de reflexão, porque possuíam o mesmo tipo de revestimento de argamassa. As maiores perdas por penetração foram encontradas nas superfícies de paredes com tijolos. Nos trechos de paredes com instalações elétricas, as medições da perda por penetração sofreram um acréscimo de atenuação devido aos materiais metálicos. Na frequência de 28 GHz, o acréscimo foi de 6,69 dB para polarização vertical e 7,3 dB na horizontal. Na frequência de 38 GHz, o acréscimo foi de 9,93 dB para a polarização vertical e 10,83 na horizontal. A diferença da atenuação entre as duas polarizações para a mesma frequência foi inferior a 1 dB.

Na frequência de 28 GHz, a perda por penetração nas paredes com tijolos com e sem instalação elétrica e na porta de madeira MDF foi superior para a polarização horizontal, enquanto para 38 GHz foi contrário. Nas superfícies de divisórias de Eucatex, paredes de gesso e vidros, a perda por penetração em 28 e 38 GHz foi superior na polarização horizontal do sinal se comparada à polarização vertical. As medidas do coeficiente de reflexão demonstraram que as superfícies analisadas elevaram as reflexões do sinal transmitido pelo ambiente, uma vez que os valores medidos foram em grande parte superiores a 0,5, chegando ao valor máximo medido de 0,928. Os vidros com níveis de transparência de 70% e 100% apresentaram maior refletividade do que as superfícies das paredes de tijolos, paredes de gesso e divisórias de Eucatex. Entretanto, nas paredes de tijolos, as perdas por penetração foram as maiores encontradas.

Tabela 2.3 - *Resultados do experimento da medida da perda por penetração.*

Material	Espessura total (cm)	ECL (dB)			
		Polarização			
		V	H	V	H
		Frequência (GHz)			
		28	28	38	38
Parede de tijolos cerâmicos de nove furos (com instalação elétrica)	15,5	36,86	38,93	49,09	47,76
Parede de tijolos cerâmicos de nove furos (sem instalação elétrica)	15,5	30,17	31,63	39,16	36,93
Parede de tijolos maciços sem furos (sem instalação elétrica)	15,5	32,21	33,85	40,62	38,15
Parede de tijolos de concreto de três furos (sem instalação elétrica)	15,5	31,92	32,74	40,53	39,66
Parede de gesso	11,2	2,73	3,60	2,97	3,65
Vidros temperados de portas e janelas com 70% de transparência	0,8	3,22	4,10	5,58	6,72
Vidros temperados de portas e janelas com 100% de transparência	0,8	3,43	3,85	5,30	5,94
Vidros espelhados de fachadas com proteção contra raios solares ultravioletas e com 70% de transparência	0,8	4,12	4,86	5,67	5,91
Divisória Eucatex	3,6	2,45	3,25	4,53	6,13
Porta de madeira MDF	4,0	12,58	16,12	16,74	13,76

Tabela 2.4 - *Resultados do experimento da medida do coeficiente de reflexão.*

Material	Ângulo	Frequência (GHz)	|Γ|
Parede de tijolos cerâmicos de nove furos (sem instalação elétrica)	15°	28	0,648
		38	0,889
	45°	28	0,591
		38	0,678
	60°	28	0,928
		38	0,571
Parede de gesso	15°	28	0,516
		38	0,558
	45°	28	0,435
		38	0,581
	60°	28	0,638
		38	0,587
Divisória Eucatex	15°	28	0,761
		38	0,798
	45°	28	0,615
		38	0,653
	60°	28	0,816
		38	0,623
Vidros temperados de portas e janelas com 70% de transparência	15°	28	0,676
		38	0,811
	45°	28	0,746
		38	0,752
	60°	28	0,613
		38	0,509
Vidros temperados de portas e janelas com 100% de transparência	15°	28	0,602
		38	0,894
	45°	28	0,843
		38	0,522
	60°	28	0,591
		38	0,497



Figura 2.9 - *Montagens do experimento de perda por penetração (ECL).*

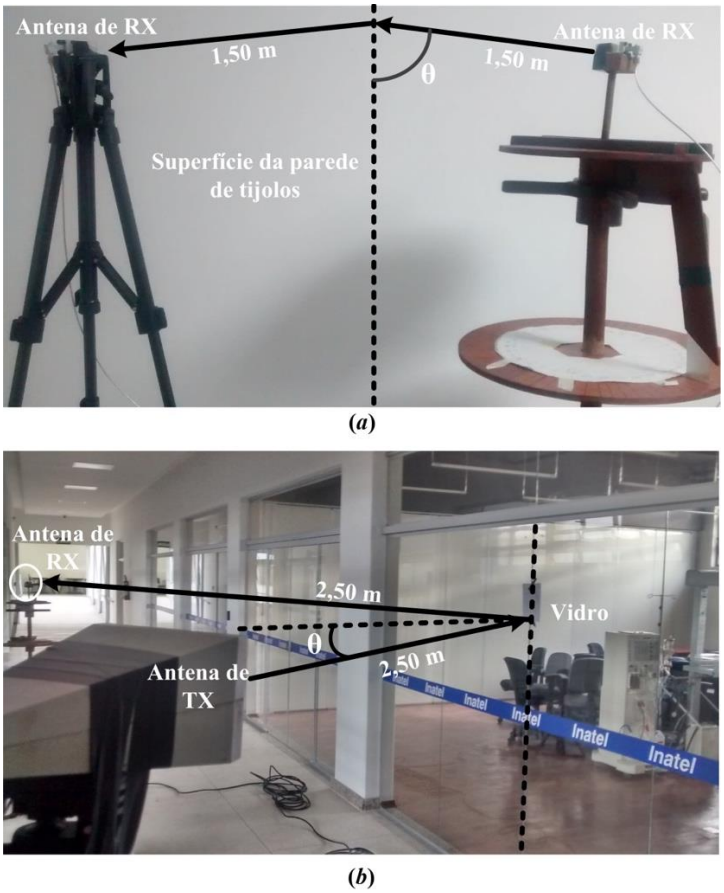


Figura 2.10 - *Montagens utilizadas no experimento da caracterização do coeficiente de reflexão.*

2.3 Cenários das Simulações e dos Experimentos

As campanhas de medições foram conduzidas em ambientes *indoor* e *outdoor* do Inatel. As campanhas em ambientes *indoors* foram realizadas nos prédios 2, 3 e 4, e as campanhas de medições em ambientes *outdoor* entre os prédios 1 e 2 do referido Instituto. A Figura 2.11 mostra a vista superior dos ambientes *indoor* e *outdoor* analisados.



Figura 2.11 - *Campus do Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL, local dos cenários das simulações e dos experimentos práticos.*

Os prédios que foram utilizados nas análises *indoor* possuem dois pisos construídos em alvenaria de concreto e paredes de tijolos cerâmicos maciços de concreto ou de gesso. Todas as paredes possuem o mesmo tipo de revestimento de argamassa. As portas são de madeira MDF ou vidro. As janelas são de vidro com níveis de transparência de 100% ou 70%, sustentadas por armações metálicas. As áreas internas são compostas por corredores, que interligam os ambientes de laboratórios com as salas, estas com dimensões inferiores às dos laboratórios, conforme relatado na Figura 2.12a-f. Os laboratórios possuem diversos equipamentos com carcaças de metal; bancadas dispostas transversalmente e longitudinalmente com tampo de madeira e pernas de metal; armários de metal que ocupam pequena parte de uma lateral da sala.

O prédio 2 foi construído no ano de 1975 utilizando estruturas de concreto e tijolos maciços nas paredes. No ano de 2015, esse prédio sofreu a sua última reforma, adquirindo novas características em sua estrutura, sendo agora composto por paredes de tijolos cerâmicos maciços e de concreto. As subdivisões existentes nas salas do segundo piso, onde se encontram os laboratórios, são feitas com paredes de gesso ou divisórias de Eucatex.

O prédio 3 foi construído no início da década de 1980, mas nos dias atuais possui paredes de tijolos cerâmicos maciços. As portas são de madeira MDF e os vidros possuem nível de transparência de 100%. As subdivisões encontradas nas salas do segundo piso são feitas com divisórias de Eucatex. O prédio 4 é o mais novo dentre os três ambientes analisados. Foi construído no início do ano 2000 e possui estruturas de concreto e paredes de tijolos cerâmicos e de gesso. As suas portas são de vidro com nível de transparência de 100%.

O ambiente *outdoor* analisado é uma praça de conveniência composta por jardins gramados, plantas ornamentais, bancos e árvores de médio porte, sendo uma área por onde transitam alunos, professores e funcionários da instituição. Esse ambiente possui ainda, um estacionamento ao lado com dezenas de veículos. O ambiente outdoor é ilustrado na Figura 2.12f.



Figura 2.12 - *Ilustrações dos ambientes de análises indoors e outdoor.*

2.4 Metodologia

A metodologia deste trabalho é sintetizada na Figura 2.13, sendo o primeiro processo as medições. Em seguida, os dados coletados são processados para representar adequadamente a curva da perda de percurso, obtida por meio de uma regressão linear. As análises das curvas de perda de percurso servirão para a obtenção dos valores estimados dos coeficientes de propagação de cada percurso definido nos ambientes, e por fim a apresentação dos resultados da perda de percurso e dos valores dos coeficientes de propagação. As Figura 2.14 e Figura 2.15 apresentam o gerador de sinais e o analisador de espectro usados nos experimentos, respectivamente.



Figura 2.13 - *Metodologia para obtenção da perda de percurso e do coeficiente de propagação***.**

As interligações entre os equipamentos de transmissão e de recepção com as suas respectivas antenas foram feitas com cabos coaxiais especiais para frequências de até 40 GHz e 1 m de comprimento. A atenuação em 28 e 38 GHz foi de 15,84 e 19,89 dB, respectivamente. A perda medida dos conectores do tipo *V* variou entre 1,6 e 1,9 dB. Nos procedimentos de medições da perda de percurso, as atenuações dos cabos e conectores foram descontadas, a fim de se obter somente o valor da perda de percurso do ambiente em teste.

As antenas utilizadas nos experimentos foram do tipo corneta, omnidirecional e *slotted-waveguide antenna array* (SWAA) (Jr., 2017). A Tabela 2.5 sintetiza as principais propriedades eletromagnéticas das antenas utilizadas nos experimentos. A Figura 2.16 apresenta o diagrama de irradiação da antena SWAA, enquanto que a Figura 2.17 mostra o diagrama da antena corneta. Por fim, a Figura 2.18, o diagrama da antena omnidirecional.



Figura 2.14 – *Gerador de sinais EXG N5173B – 9 kHz a 40 GHz.*



Figura 2.15 – *FieldFox Microwave Analyser N9952A – 50 GHz.*

Tabela 2.5 - *Características das antenas utilizadas nos experimentos.*

Antena	**Parâmetro**	**Frequências**	
		28 GHz	**38 GHz**
SWAA	**Ganho**	12,6 dBi	15,3 dBi
	Ângulo de meia potência	32° (V)	35° (V)
Corneta	**Ganho**	12,6 dBi	13,4 dBi
	Ângulo de meia potência	19° (V) 20,7° (H)	16° (V) 18,2° (H)
Omnidirecional	**Ganho**	12,25 dBi	--

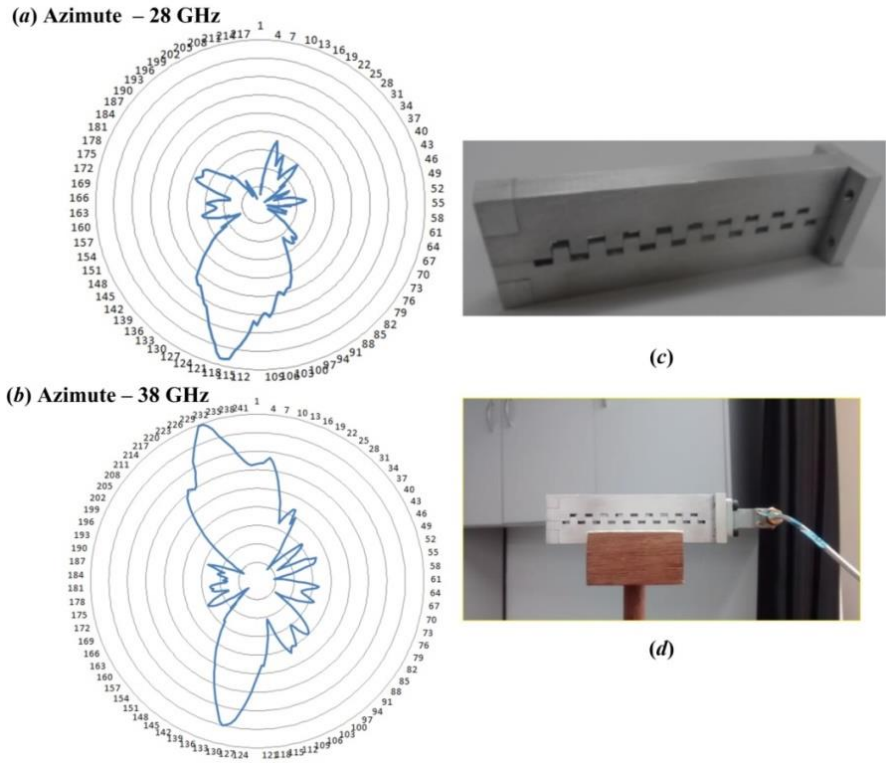


Figura 2.16 – *Diagrama de irradiação de azimute da antena SWAA em 28 e 38 GHz.*

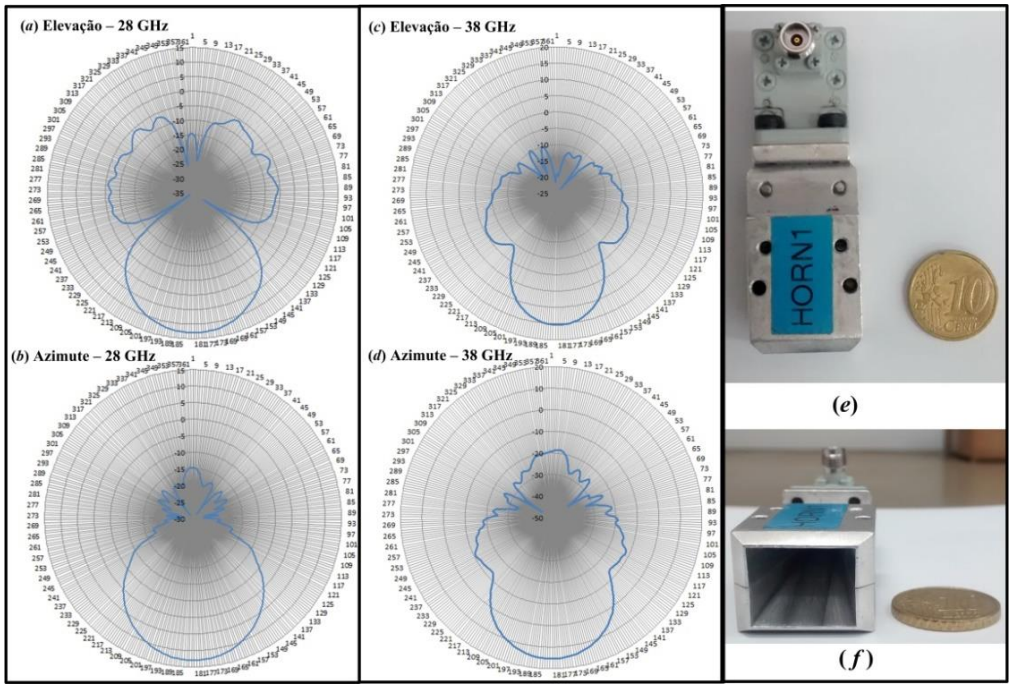


Figura 2.17 – *Diagramas de irradiações da antena corneta em 28 e 38 GHz.*

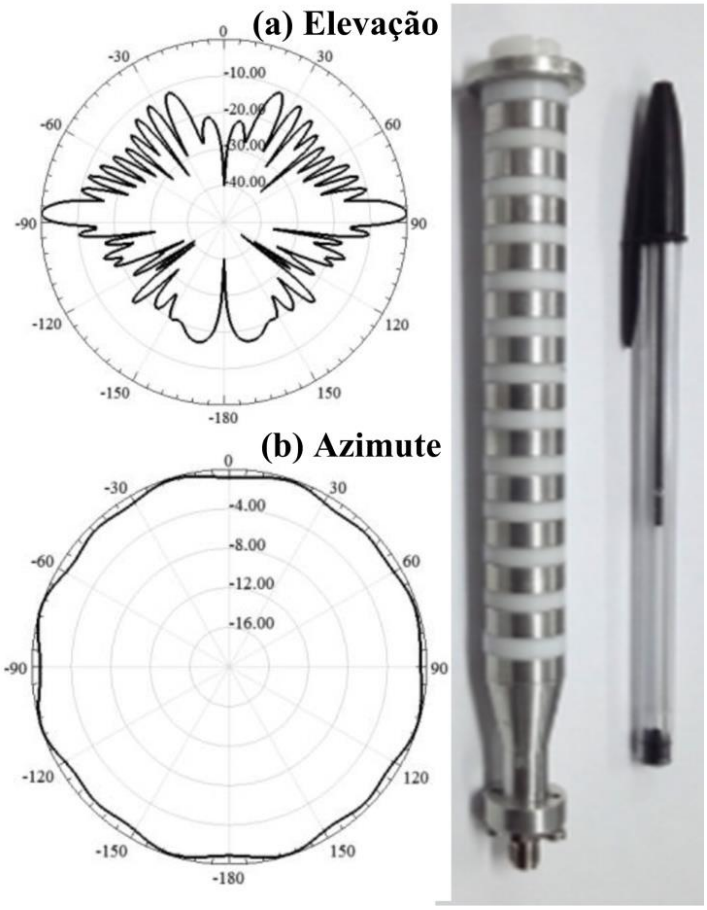


Figura 2.18 – *Diagrama de irradiação da antena omnidirecional em 28 GHz.*

Mediu-se 1.000 amostras em um intervalo de tempo de 5 segundos. Os efeitos aleatórios produzidos pelo canal de comunicação, tais como ruídos e múltiplos percursos, são somados à perda de percurso, resultando em [17]:

$$\overline{PL}(dB) = \overline{PL}(d_0) + 10\log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \mathrm{X}_\sigma, \tag{2.8}$$

onde $\overline{PL}(dB)$ é a perda de percurso média, $\overline{PL}(d_0)$ é a perda de percurso média na região de Fraunhofer, d_0 é a distância da região de Fraunhofer de referência e X_σ é a variável aleatória que representa a combinação dos efeitos produzidos pelo canal de comunicação no sinal transmitido.

Tabela 2.6 - *Configuração inicial utilizada nos equipamentos durante os experimentos.*

Parâmetro	**Frequência**	
	28 GHz	38 GHz
Ganhos das antenas (TX e RX)	12,6 dBi	13,4 dBi
Atenuações nos cabos e conetores (Figura 2.8)	15,84 dB	19,89 dB
Potência de transmissão	3,24 dBm	6,49 dBm
EIRP	0 dBm	0 dBm
Ângulo de meia potência das antenas (TX e RX)	19° (V) 20,7° (H)	16° (V) 18,2° (H)
Altura de instalação em relação ao piso	1,70 m	1,70 m

As Figuras 2.19 e 2.20 as medições para uma distância de 30 m entre o transmissor e o receptor nas frequências de 28 e 38 GHz em um ambiente indoor, respectivamente. Já as Figuras 2.21 e 2.22 reportam as medições sob as mesmas condições, só que para um ambiente *outdoor*. Pode-se observar pelo comportamento das distribuições dos histogramas, que a variável aleatória representa uma combinação dos efeitos produzidos pelo canal de comunicação, uma vez que somente a perda de percurso possui uma distribuição do tipo gaussiana de média zero [78]. Vale destacar que o efeito *doppler* não está contabilizado na combinação dos resultados das medidas, uma vez que o receptor permaneceu fixo no ponto de medida. Estas medidas ilustram o comportamento do sinal medido em todos os demais pontos ao longo do percurso.

Como um dos objetivos deste trabalho é analisar a perda média de percurso, para estimar o valor do coeficiente de propagação, faz-se necessária a remoção dos efeitos dos ruídos e múltiplos percursos produzidos pelo canal de comunicação. A referência [95] apresenta uma proposta prática para suavizar os efeitos dos múltiplos percursos no ponto de medida sobre o valor da perda de percurso. O processo

consiste no seguinte: para cada local definido para a realização de uma medida, sejam tomados oito novos pontos distanciados de 10λ. Para cada um desses oito novos pontos, toma-se uma nova quantidade de amostras do sinal que serão representadas pela sua média. Em cada uma das oito coletas é considerada uma janela de tempo igual. O valor final, que representa a medida no ponto para as análises da perda de percurso, será representado por uma nova média dos oito valores obtidos de cada ponto. A Figura 2.23 ilustra o método proposto, cujos resultados são representados pela curva suavizada (linha de cor preta) nos gráficos das Figuras 2.24 a 2.27 e os seus respectivos histogramas tendendo para uma distribuição gaussiana.

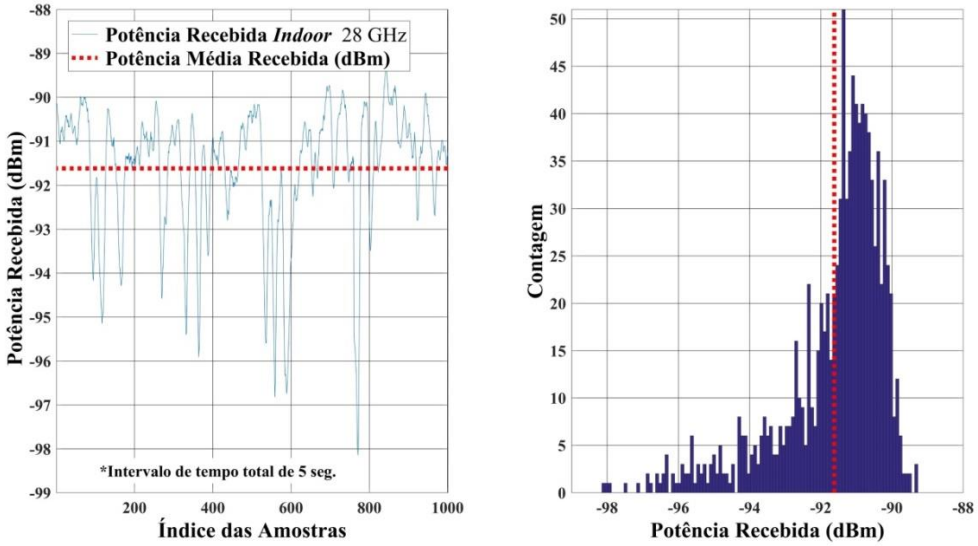


Figura 2.19 – *Efeito do comportamento aleatório do canal em 28 GHz em ambiente indoor.*

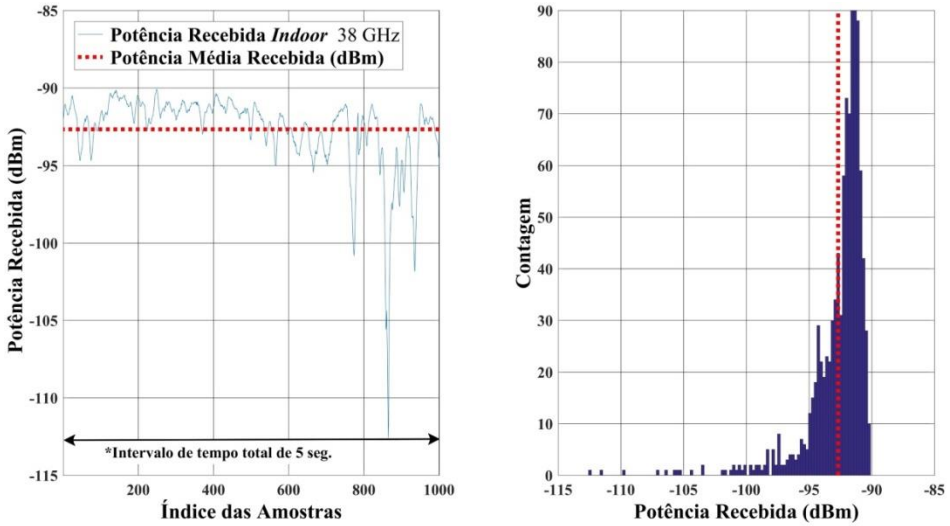


Figura 2.20 – *Efeito do comportamento aleatório do canal em 38 GHz em ambiente intdoor*

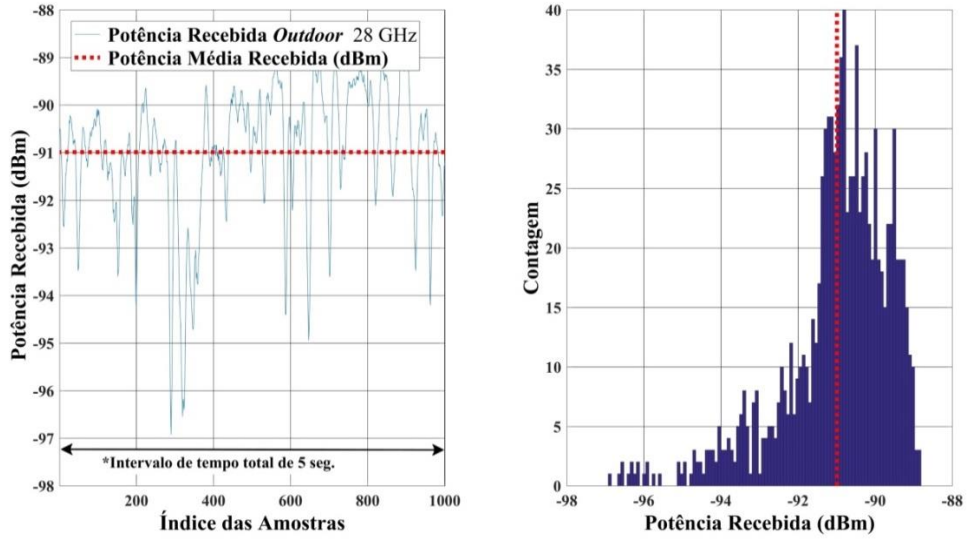


Figura 2.21 – *Efeito do comportamento aleatório do canal em 28 GHz em ambiente outdoor.*

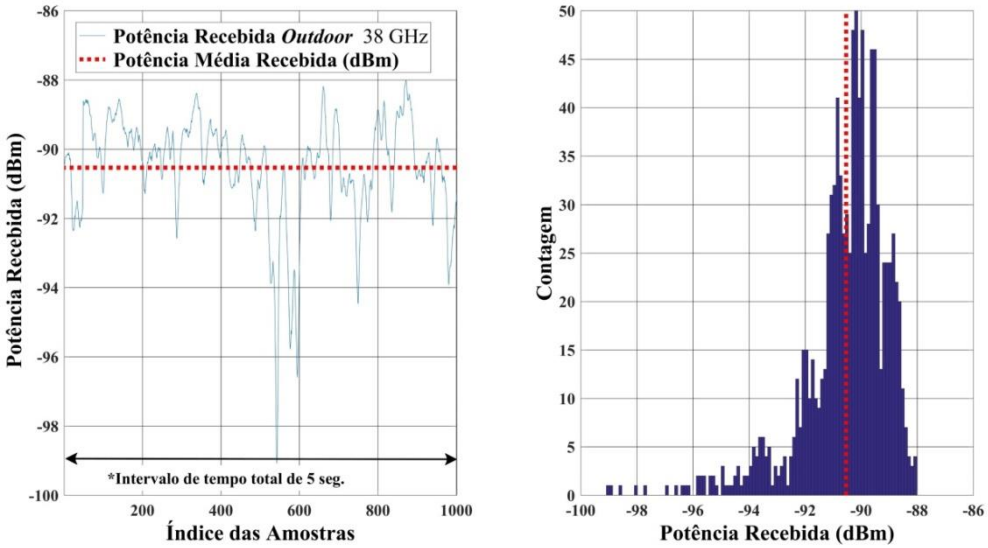


Figura 2.22 – *Efeito do comportamento aleatório do canal em 38 GHz em ambiente outdoor.*

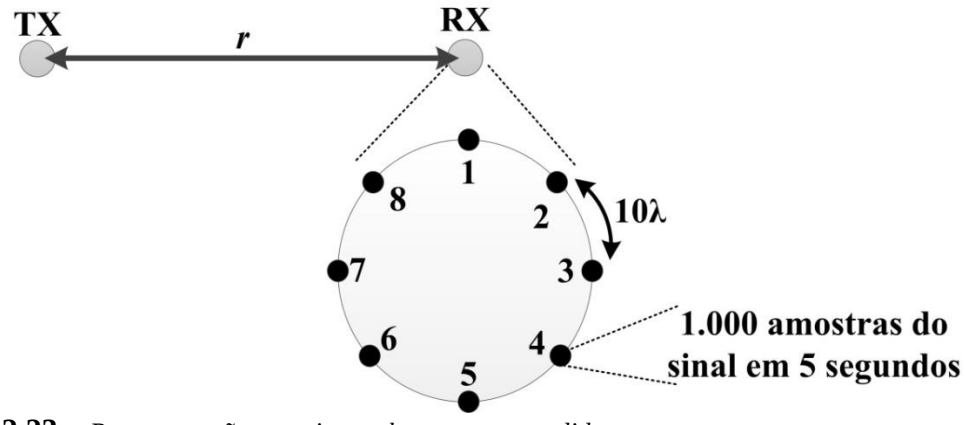


Figura 2.23 – *Representação experimental para ponto medida.*

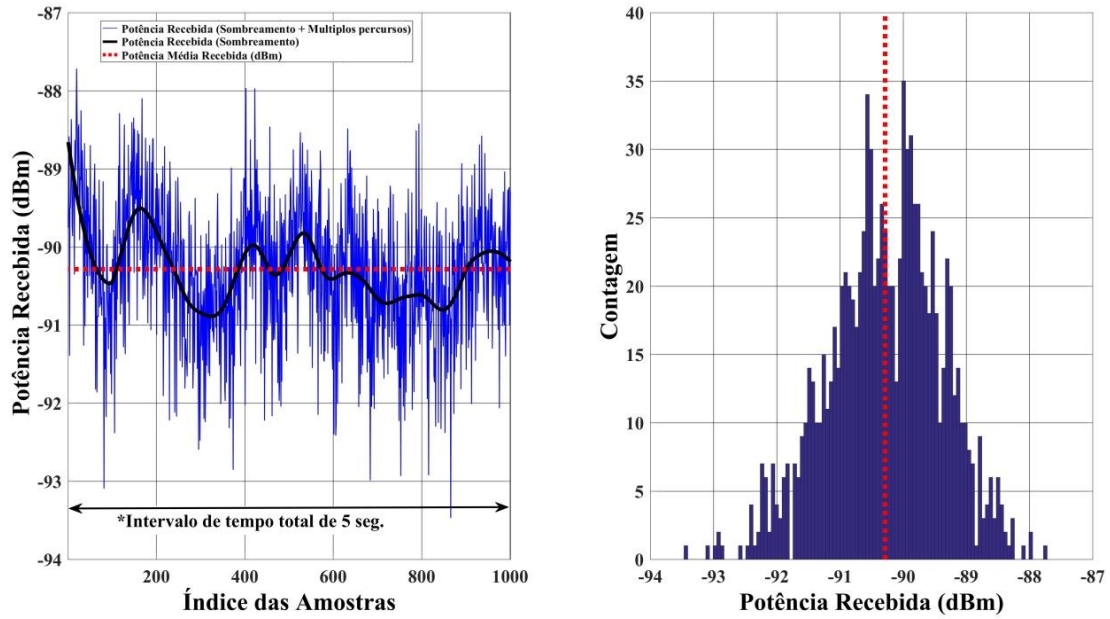


Figura 2.24 – *Suavização dos efeitos dos múltiplos percursos em 28 GHz em ambiente indoor.*

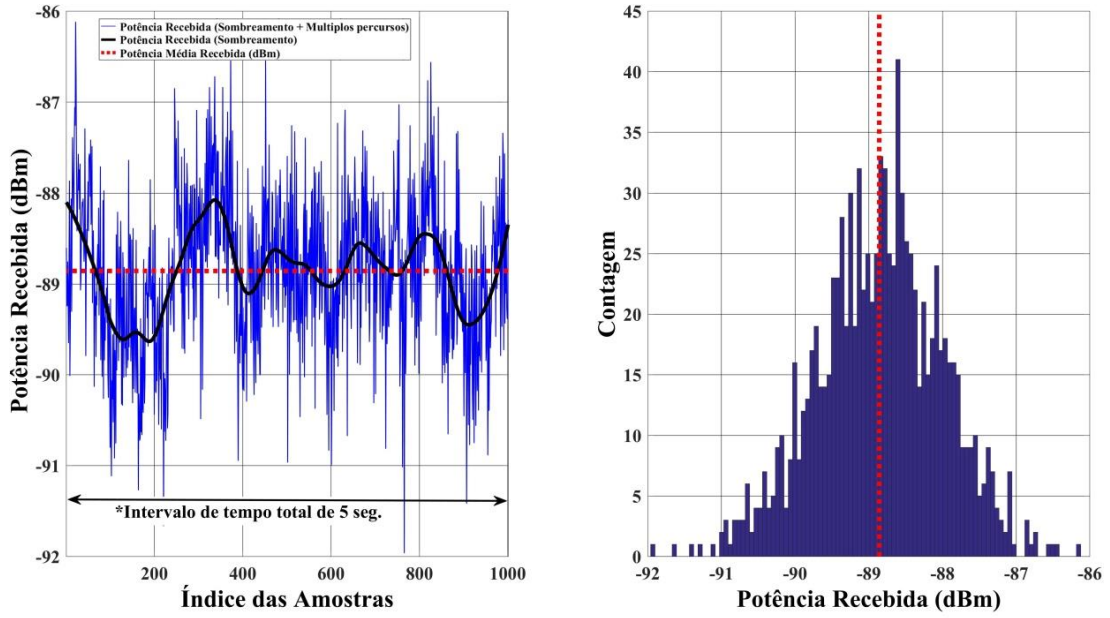


Figura 2.25 – *Suavização dos efeitos dos múltiplos percursos em 38 GHz em ambiente indoor.*

O desvio padrão máximo dos histogramas em cada um dos pontos foi de 10,4 dB. E o desvio padrão entre os pontos de medidas ao longo do mesmo percurso foi de 5,17 dB (anexo A). Admitindo-se um erro máximo de 1 dB no ponto de medida e de 2 dB entre os pontos de medidas, definiu-se a confiabilidade de 95% utilizada na regressão linear para representar a curva da perda de percurso. Vale destacar que a regressão linear adotada é valida somente para distribuições gaussianas de média

zero, justificando-se a necessidade das remoções ou as minimizações dos efeitos dos múltiplos percursos e ruídos no sinal medido da perda de percurso.

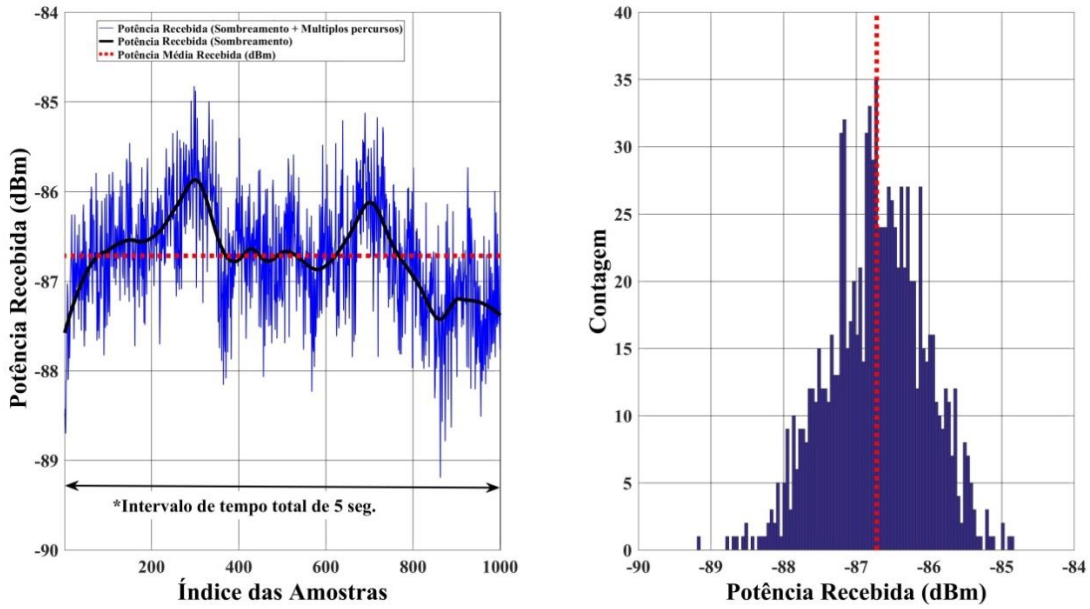


Figura 2.26 – *Suavização dos efeitos dos múltiplos percursos em 28 GHz em ambiente outdoor.*

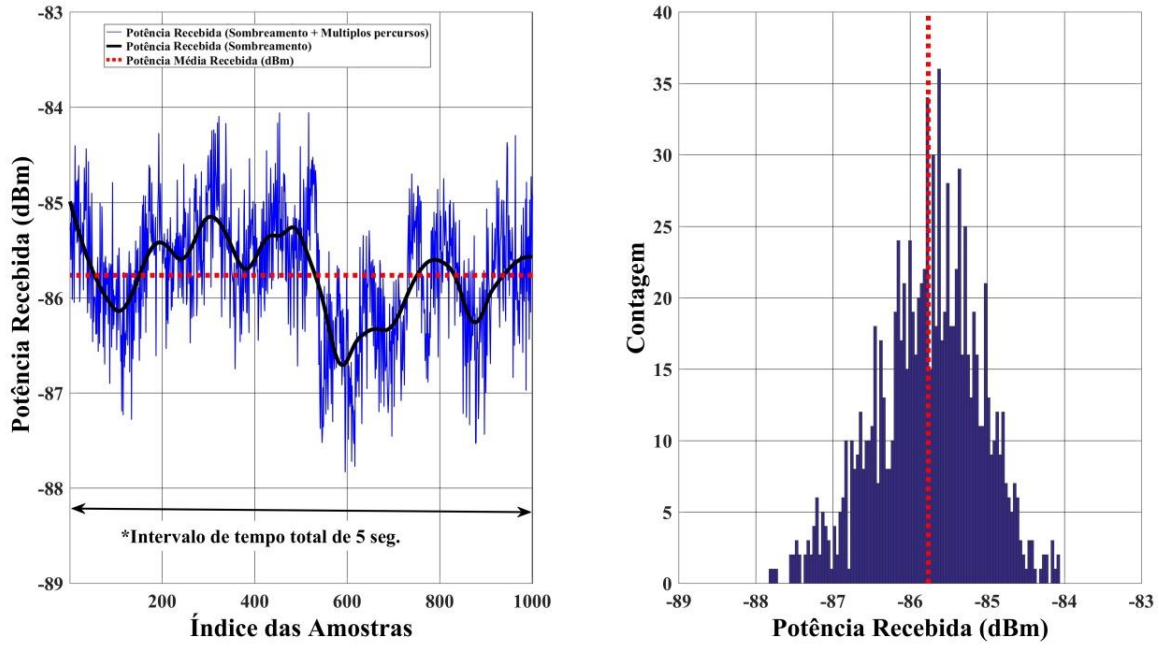


Figura 2.27 – *Suavização dos efeitos dos múltiplos percursos em 38 GHz em ambiente outdoor*

O método da regressão linear baseou-se em no mínimo 385 amostras de medidas em cada um dos pontos do percurso e 26 pontos de medidas ao longo de

todo o percurso; valores esses superados de acordo com as características do equipamento de medição, pois em todos os pontos de medidas foram tomadas 1.000 amostras do sinal em uma janela de tempo de 5 segundos. E em cada percurso foram definidos mais de 26 pontos por percurso.

Com a obtenção da curva da perda de percurso, foi possível estimar o valor do coeficiente de propagação, ou seja, do coeficiente angular da curva que representa a perda de percurso. Os resultados obtidos dos valores dos coeficientes de propagação representam as atenuações provocadas no ambiente. E a partir destas informações tornou-se possível dimensionar de forma mais precisa os valores e a potência de transmissão requeridos para cobrir uma determinada área. É de conhecimento que as remoções dos efeitos de múltiplos percursos e ruídos da medida da perda de percurso são mais eficientes com métodos de processamento digital de sinais, e assim os valores dos coeficientes de propagação são mais precisos. Entretanto, esta implementação não foi considerada neste trabalho.

Capítulo 3

Este capítulo do trabalho apresenta o set de *softwares* de simulação numérica utilizados para as análises de propagação e os resultados obtidos com os mesmos para as faixas de 28 e 38 GHz.

3.1 *Software* Winprop

O *software* de simulação numérica Winprop, desenvolvido pela *AWE Communications*, permite avaliar os fenômenos de propagação do sinal de RF em canais de comunicação sem fio. A versão 14.1 consiste na combinação dos três seguintes *softwares*: WallMan, responsável pela geração e configuração da base de dados necessária nas caracterizações da iconografia dos ambientes; AMan, *software* responsável por gerar as bases de dados com as propriedades eletromagnéticas das antenas, incluindo o diagrama de irradiação; *software* ProMan, responsável pelas configurações de todos os parâmetros técnicos do sistema de transmissão, simulações de propagação do sinal e das apresentações dos resultados numéricos.

3.1.1 *Software* WallMan

O *software* WallMan é um editor gráfico que possibilita definir a iconografia e todas as características existentes no ambiente, que compõe o cenário das gerações das simulações. Este *software* possibilita que cada uma das partes do cenário e os objetos existentes no ambiente recebam uma atribuição individualizada das coordenadas de localização, das dimensões e das características dos materiais que os compõem. Além disso, possibilita a organização e o agrupamento em classes das partes do cenário ou dos objetos, que possuem as mesmas propriedades elétricas.

Os cenários do ambiente *indoor* considerados nas simulações foram os prédios 2, 3 e 4 do Inatel, conforme descrito no item 2.3. O ambiente *outdoor* não foi considerado nas simulações devido à restrição da licença de utilização do *softwar*e, sendo portanto explorado apenas nos experimentos.

A Figura 3.1 ilustra a elaboração de uma base de dados para uma parte do cenário (parede de gesso). As características de perda por penetração e perda por reflexão foram configuradas com os mesmos obtidos nas caracterizações dos materiais do item 2.2. Na perda por espalhamento e na perda por difração foram considerados os valores recomendados pela plataforma Altair WinProp^{TM} na faixa de ondas milimétricas [69]. Os valores das constantes dielétricas foram configurados conforme indicado em [7]. As configurações da permeabilidade relativa e da condutividade dos materiais foram realizadas conforme descrito por [70], uma vez que tais características sofrem variações em função da frequência do sinal que as atravessam. A Tabela 3.1 apresenta todas as configurações realizadas nas bases de dados das características dos materiais.

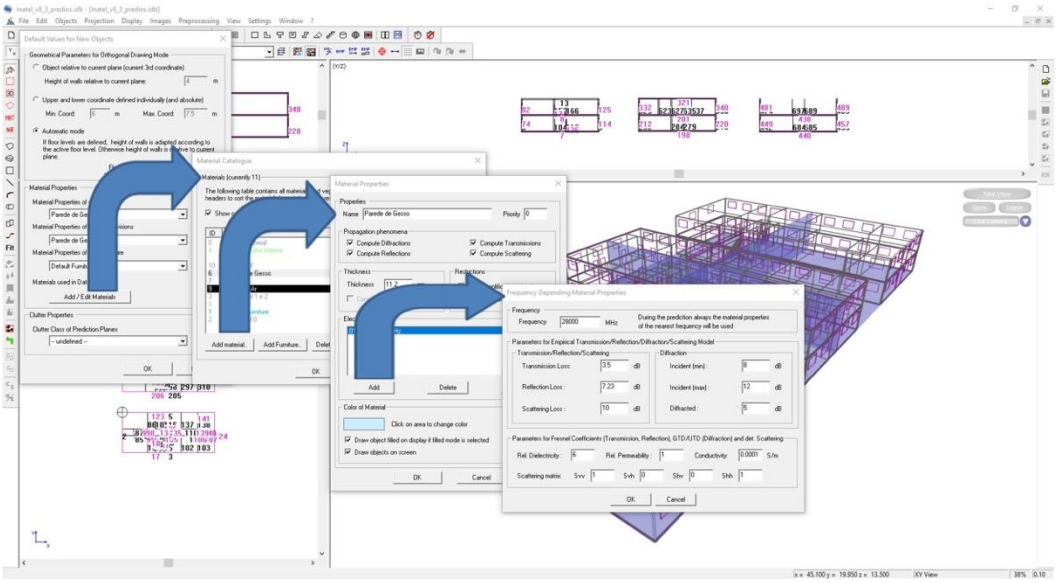


Figura 3.1 – *WallMan: interface de configuração das bases de dados.*

Todas as dimensões das repartições, pisos e instalações elétricas foram reproduzidas fielmente em cada uma das plantas dos prédios, além de considerar as principais mobílias existentes nos ambientes, tais como: mesas, bancadas, cadeiras e armários. A Figura 3.2 ilustra a representação final da elaboração do cenário de simulação.

Tabela 3.1 - *Configurações utilizadas no software Wallman para os materiais.*

Material		Parede de Gesso	Parede de tijolos cerâmicos (com instalação elétrica)	Parede de tijolos cerâmicos (sem instalação elétrica)	Parede de tijolos maciços sem furos	Parede de tijolos de concreto de três furos	Vidros 70% de transparência	Vidros 100% de transparência	Porta de madeira MDF	Divisória Eucatex
Perda por reflexão (dB)	28 GHz	20,9	38,7	38,7	38,7	38,7	49,8	51,7	30	41,9
	38 GHz	38,3	42,2	42,2	42,2	42,2	53,1	53,1	34	45,3
Perda por espalhamento (dB)		10	10	10	10	10	10	10	10	10
Perda por difração (dB)	Mín.	19	24	21	21	20	20	20	25	25
	Med.	22	27	24	24	23	23	23	28	28
	Máx.	25	30	27	27	26	26	26	31	31
Constante dielétrica		4	6	6	6	6	6	6	2	2
Permeabilidade relativa		2,9	3,7	3,7	3,7	5,3	6,3	6,3	2	2
Condutividade (S/m)	28 GHz	0,123	0,038	0,038	0,038	0,483	0,228	0,167	0,167	0,167
	38 GHz	0,152	0,038	0,038	0,038	0,619	0,329	0,232	0,232	0,232

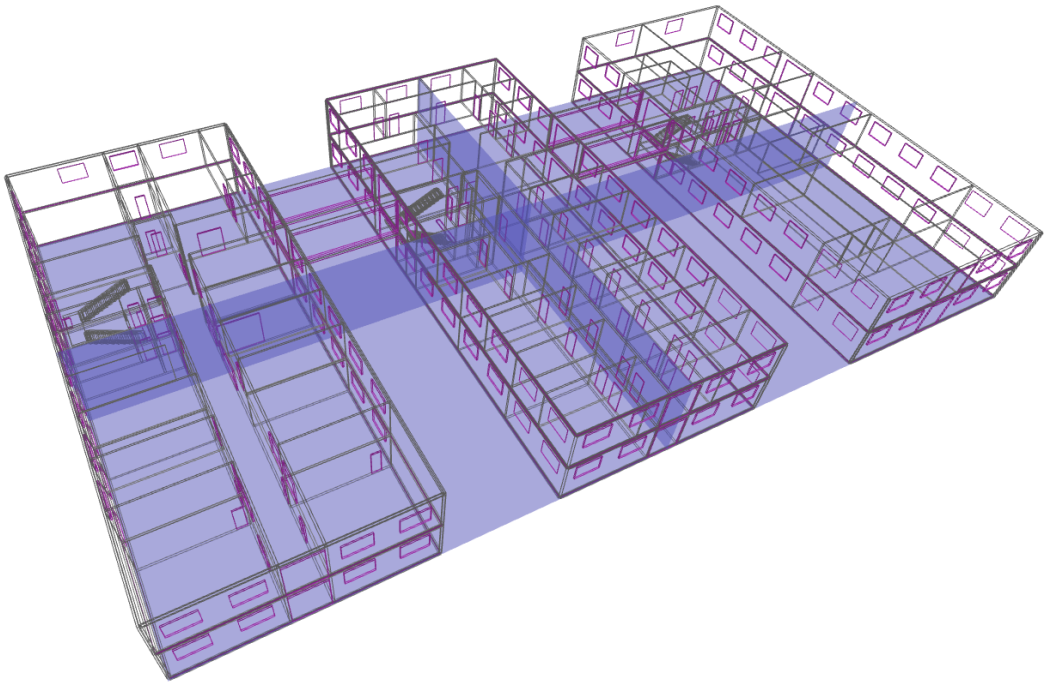


Figura 3.0.2 - *Representação final da base de dados gerada pelo software WallMan.*

3.1.2 Software AMan

As ferramentas de planejamento das redes de comunicação sem fio dependem de modelos precisos para estimar as suas influências na propagação das ondas eletromagnéticas. Nesse contexto, os diagramas de irradiação das antenas são fundamentais as informações das características das antenas utilizadas nas simulações. O *software* AMan é o ambiente responsável por gerar os diagramas de irradiação das antenas e associar as suas respectivas características. Os planos de azimute e elevação são inseridos individualmente, e nas suas combinações é possível interpolar o padrão de irradiação tridimensional. Os diagramas utilizados foram os mesmos apresentados no item 2.4. Este *software* permite a importação de qualquer formato de imagem, que represente os diagramas de irradiação das antenas. A Figura 3.3 ilustra a interface do *software* AMan para a incorporação do diagrama de irradiação.

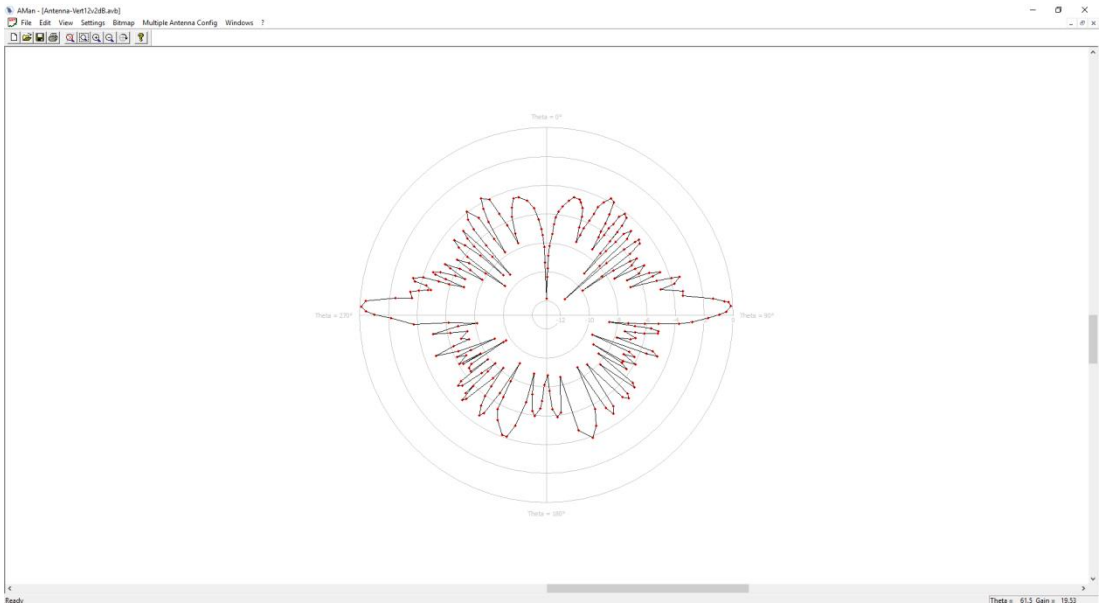


Figura 3.3 - *Interface do software AMan.*

3.1.3 Software PorMan

Com o *software* ProMan é possível importar as bases de dados geradas nos *softwares* WallMan e AMan para simular a propagação de ondas eletromagnéticas. Este *software* permite aplicar os modelos de propagação *One Slope*, *Motley Keenan*, COST231, Caminho dominante e Raios com caminho inteligente. O método configurado neste trabalho foi o de raios de caminho inteligente, no qual todos os possíveis caminhos (espaços) existentes no ambiente são considerados nos cálculos da predição da intensidade do sinal propagado, permitindo assim as análises numéricas dos percursos do tipo LOS e NLOS. Além disso, permiti a análise individual ou conjunta das influências de todos os itens que compõem o cenário, tais como mobílias ou as características elétricas dos materiais utilizados nas construções.

O posicionamento e as características do transmissor são realizados também no *software* ProMan. As configurações de frequência e potência de transmissão, atenuações dos cabos e conectores e potência foram as mesmas descritas no item 2.4. A Figura 3.4 ilustra a *interface* do *software* ProMan.

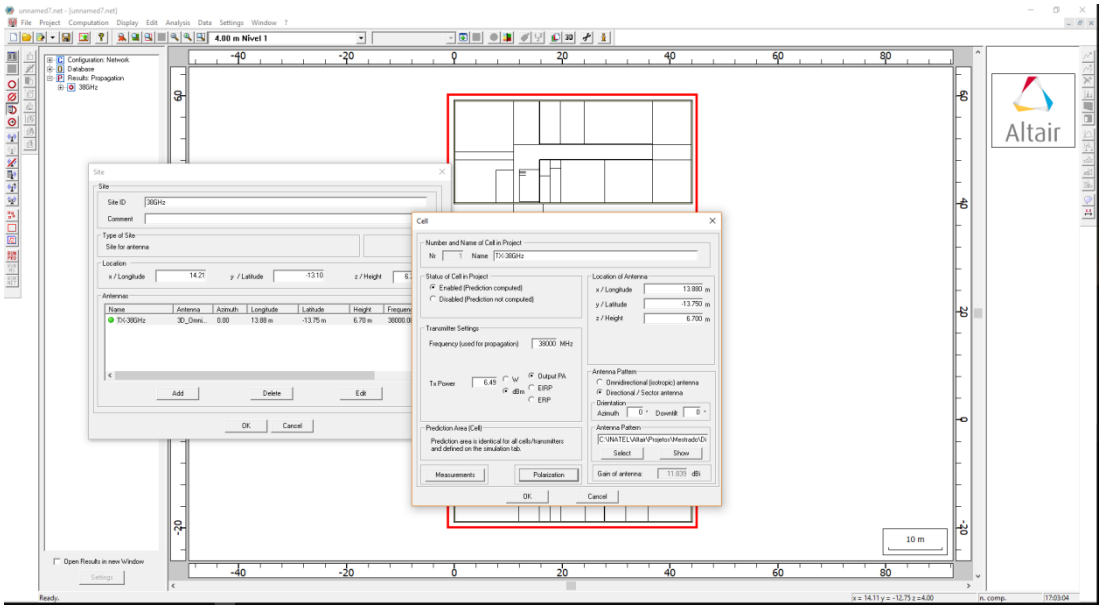


Figura 3.4 - *Interface do software ProMan.*

3.2 Resultados Numéricos

O primeiro cenário definido para a realização das análises numéricas foi o segundo piso do prédio 2 do Inatel, criando-se um único ponto de transmissão, correspondente ao mesmo local de instalação do transmissor do experimento prático, para fins de comparações. A altura da antena transmissora e as análises do sinal recebido também foram idênticas às praticadas nos experimentos é iguais a 1,70 m.

Uma vez que o *software* ProMan permite a configuração de potência efetivamente radiada (EIRP ou *Effective Isotropic Radiated Power*), definiu-se o valor 12 dBm em ambas frequências (28 e 38 GHz). Esse valor de potência foi definido em razão do valor máximo de potência EIRP permitido pelo equipamento dos experimentos. Foram contabilizados na configuração da simulação da potência EIRP os valores dos ganhos das antenas e as atenuações dos cabos e conectores.

Para o ambiente *indoor*, 19140 pixels foram computados pelo *software* ProMan e o tempo médio gasto com cada simulação foi de duas horas. Um pixel é o menor elemento de uma imagem digital, e cada pixel representa um valor de potência recebida no local estimado pelo *software* de forma independente dos demais pixels da simulação.

O resultado fornecido pelo *software* foi o mapa de intensidade do sinal recebido, conforme apresentado nas Figuras 3.2 e 3.3 para 28 e 38 GHz, respectivamente. A potência recebida na região próxima ao transmissor foi de -66,70 dBm, enquanto que no ponto mais distante foi de -130,6 dBm.

A diferença entre a potência transmitida (*configurada no software*) e a potência recebida (estimada pelo *software*) é definida como a perda de percurso. Foram definidos cinco percursos na simulação com perfis LOS e NLOS para estimar as respectivas perdas de percursos e, consequentemente, o valor do coeficiente de propagação. O valor de cada coeficiente foi obtido com auxilio do *software* MatLab, a partir do valor do coeficiente angular das curvas de perda de percurso. A Tabela 3.2 sintetiza os valores do coeficiente de propagação simulado (n_s) para 28 e 38 GHz.

No percurso 1 (LOS), o valor do coeficiente de propagação estimado foi de 2,36 na frequência 28GHz e 2,53 na frequência 38GHz. Nos demais percursos (NLOS), o menor valor estimado foi de 2,85 para o percurso 4, e o maior foi de 4,49 no percurso 2 em 28 GHz. Para a frequência de 38 GHz, o maior valor estimado foi de 3,19 para o percurso 4, e o maior foi de 4,67 no percurso 2. Os valores mais altos representam mais obstruções do sinal propagado, o que reflete as condições configuradas nos percursos 2, 3, 4 e 5, caracterizados como NLOS. Nos percursos LOS, os valores obtidos foram inferiores a 3, que representam pouca obstrução nos percursos.

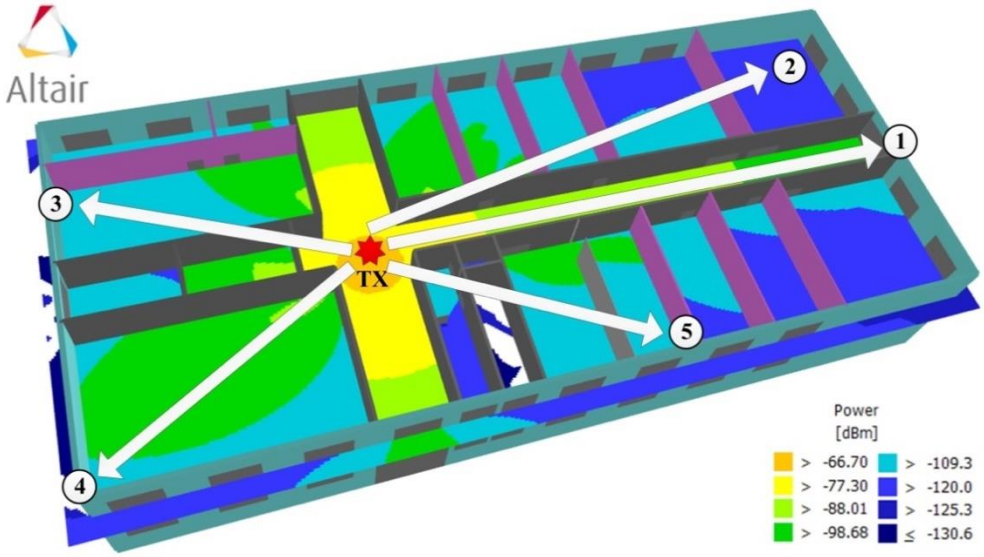


Figura 3.3 – *Mapa de cobertura do sinal propagado, gerado pelo software ProMan em 28 GHz*

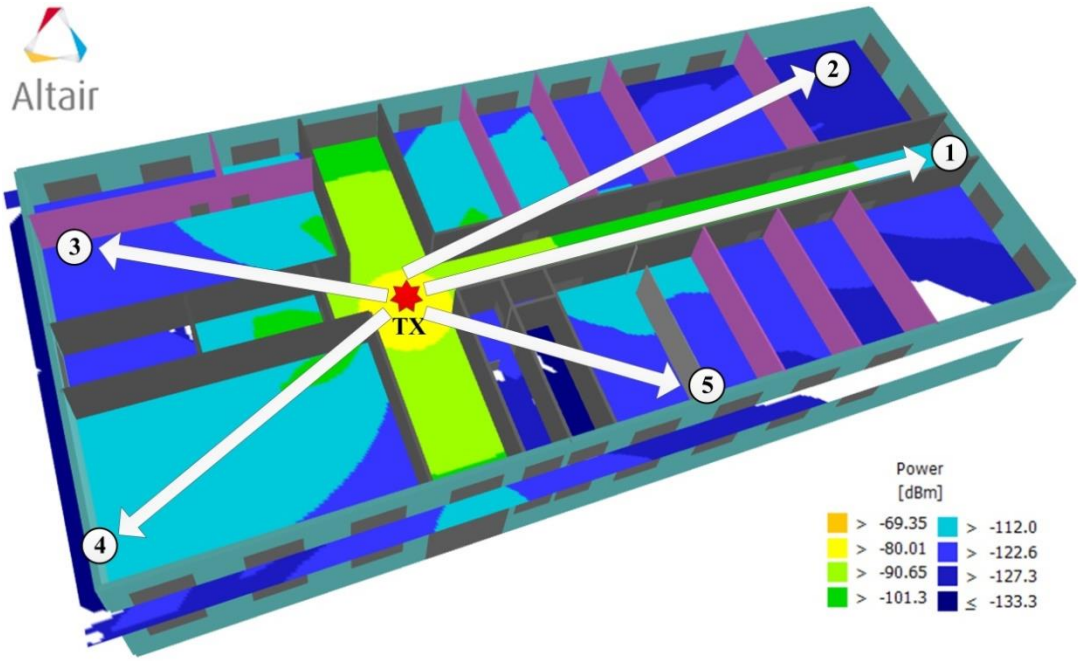


Figura 3.4 – *Mapa de cobertura do sinal propagado gerado pelo software ProMan em 38 GHz.*

Tabela 3.2 – *Coeficientes de propagação estimados somente no prédio 2 pelo software ProMan.*

Percurso	**Frequência (GHz)**	n_s	**Distância (m)**
1	28	2,36	35
	38	2,53	35
2	28	4,49	25
	38	4,67	25
3	28	2,95	16
	38	3,28	16
4	28	2,85	16
	38	3,19	16
5	28	3,48	15
	38	3,84	15

As Figuras 3.4 e 3.5 apresentam os mapas de coberturas considerando o segundo piso dos três prédios da instituição (prédios 2, 3 e 4). O transmissor foi instalado no segundo piso do prédio 2, mantendo a mesma posição da primeira simulação. Na entrada do corredor do prédio 3, a intensidade do sinal recebido foi de -115 dBm, porém no interior dos prédios 3 e 4 foi de -130 dBm.

De forma análoga, foram definidos três percursos para a análise da perda de percurso. A Tabela 3.3 sintetiza os valores dos coeficientes de propagação simulados de acordo com os resultados adquiridos nas simulações com os três prédios para as frequências de 28 e 38 GHz. No percurso 1, os valores dos coeficientes de propagação foram 3,85 e 4,82, respectivamente, nas frequências de 28 e 38 GHz. Esses valores foram resultantes da presença de mais obstruções nos prédios e pelo fato do sinal propagado atravessar diferentes ambientes. As diferenças de altura entre os prédios também foi um fator fundamental para elevar os valores dos coeficientes de propagação estimados.

Tabela 3.3 – *Coeficiente de propagação estimado nos 3 prédios pelo software ProMan.*

Percurso	**Frequência (GHz)**	n_s	**Distância (m)**
1	28	3,85	85
	38	4,82	85
2	28	4,53	36
	38	5,08	36
3	28	4,78	40
	38	4,97	40

Os resultados obtidos nas simulações serão utilizados para fins de comparação com experimentos. A potência recebida considerada adequada para um sistema convencional deve ser superior a -100 dBm. Nas zonas mais claras do mapa de cobertura foram estimadas potências de pelo menos -98 dBm.

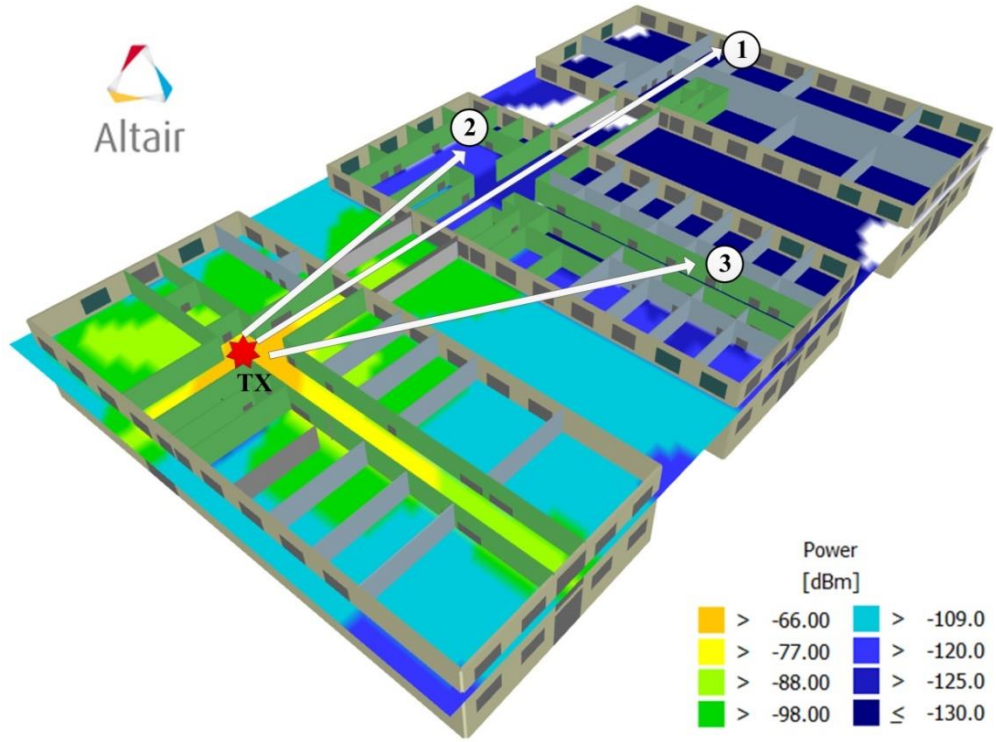


Figura 3.5 – *Mapa de cobertura do sinal propagado gerado pelo software ProMan em 28 GHz.*

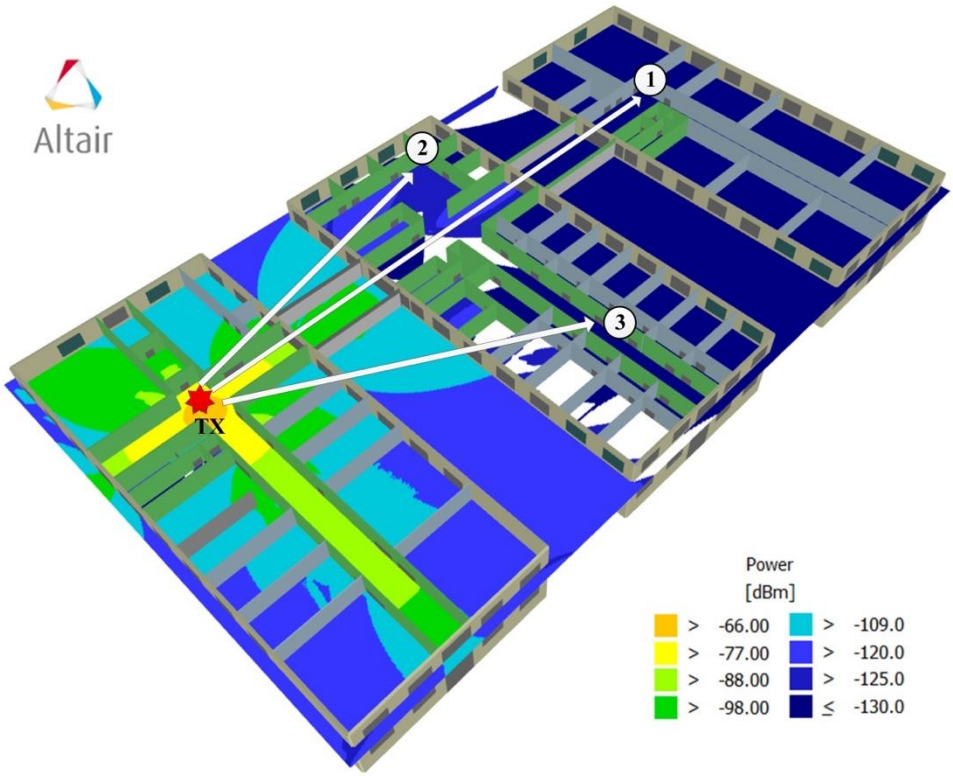


Figura 3.6 – *Mapa de cobertura do sinal propagado gerado pelo software ProMan em 38 GHz*

Capítulo 4

4. Medições de Propagação na faixa de ondas Milimétricas

Este Capítulo apresenta os resultados experimentais da perda de percurso e do coeficiente de propagação nas bandas de 28 e 38 GHz, utilizando os cenários propostos na seção 2.3. Os cenários foram analisados sob duas diferentes condições: sem a presença de pessoas transitando pelos corredores e dentro dos laboratórios, denominada condição de controlada de medição; com pessoas transitando pelos corredores e laboratórios dos prédios, denominada condição não controlada do ambiente. As Figuras 4.1a e 4.1b ilustram os ambientes dos laboratórios com e sem pessoas trabalhando, respectivamente. Já as Figuras 4.1c e 4.1d mostram os ambientes dos corredores com e sem pessoas transitando. Para o ambiente *outdoor*, também foram consideradas as mesmas condições de análises, relatos nas Figuras 4.1e e 4.1f.

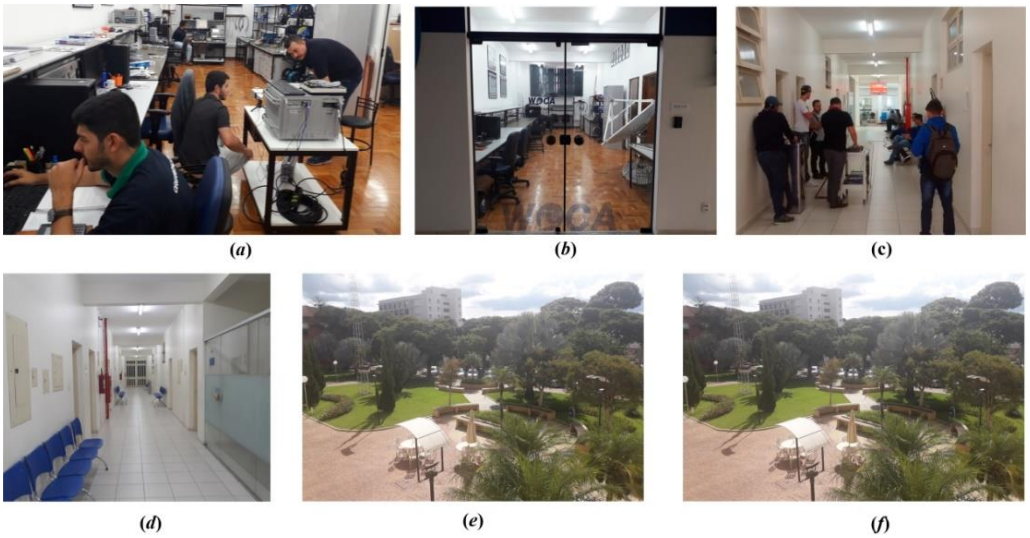


Figura 4.1 –*Ambientes de análises indoors e outdoor com e sem a presença de pessoas.*

4.1 Cenário 1

Os primeiros resultados experimentais da perda de percurso e do coeficiente de propagação foram realizados nas áreas internas do prédio 2 do Inatel. Foram definidos cinco percursos para as medições, de tal forma que coincidam com os mesmos percursos analisados nas simulações da seção 3.2. O percurso 1 definido como sendo o corredor do prédio 2 é o único que possui a característica LOS, os outros quatros são NLOS. A Figura 4.2 ilustra os cinco percursos definidos para serem utilizados nas medições.

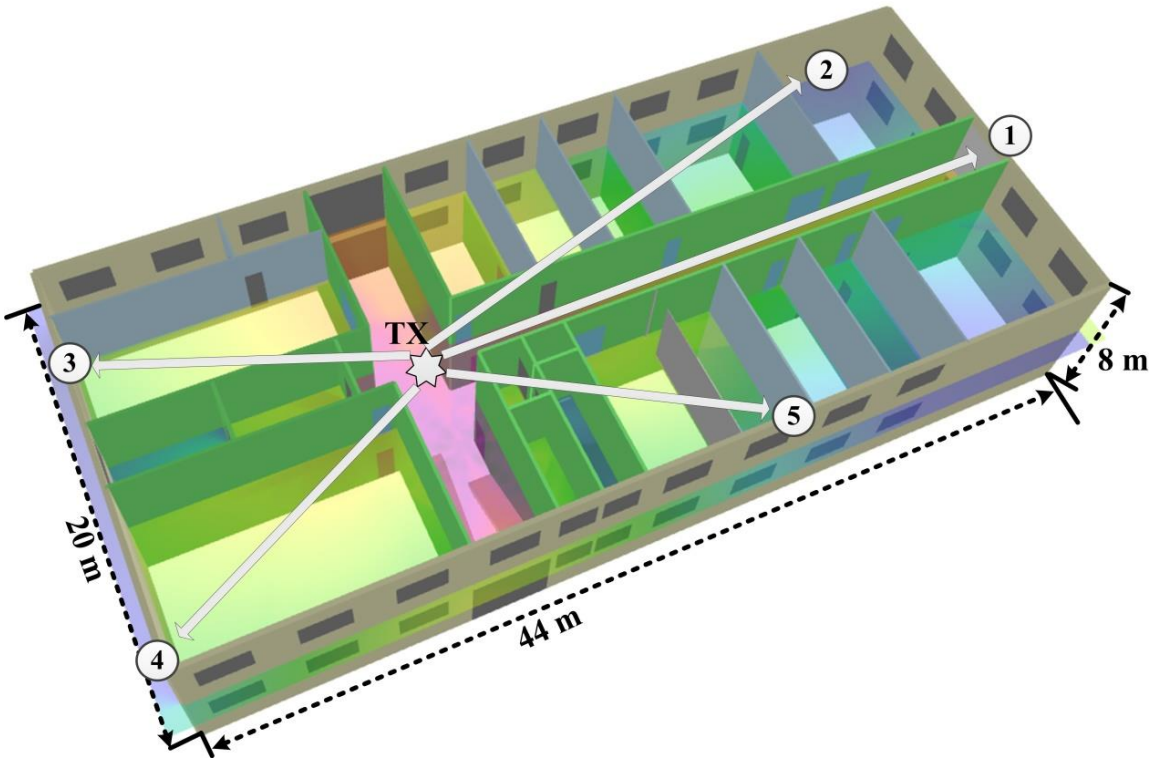


Figura 4.2 – *Ilustrações dos percursos definidos para os experimentos no prédio 2.*

As medições da perda de percurso foram realizadas com quatro configurações diferentes: SISO, SIMO, MISO e MIMO. Em todas as configurações, o valor da EIRP foi de 0 dBm.

A primeira configuração explorada foi utilizando apenas uma antena no transmissor e uma no receptor (SISO). Com o objetivo de emular um sistema de comunicação *indoor picocell*, as medições foram conduzidas inicialmente com a antena omnidirecional e depois com a antena SWAA. No site de recepção utilizou-se

uma antena corneta.As Tabelas 4.1 a 4.3 sintetizam os valores dos coeficientes de propagação em 28 e 38 GHz na configuração SISO para cada um dos percursos definidos no prédio 2. Os coeficientes de propagação foram obtidos com ambientes controlados (n_c) e não controlados (n_{nc}). As curvas da perda de percurso em todas as configurações dos arranjos de antenas são mostradas no Apêndice A.

Tabela 4.1 – *Sistema SISO (com uma antena de transmissão omnidirecional e recepção com a antena corneta).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância (m)
1	**28**	2,35	2,54	8,9	12,7	32
2	**28**	3,52	3,54	9,5	14,2	22
3	**28**	2,91	3,04	8,8	10,1	16
4	**28**	2,89	3,10	7,9	10,6	16
5	**28**	2,95	3,21	8,6	13,6	15

Tabela 4.2 – *Sistemas SISO (com uma antena de transmissão SWAA e corneta na recepção).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância (m)
1	**28**	2,42	2,49	10,6	13,2	32
	38	2,65	2,66	9,8	14,3	32
2	**28**	3,55	3,60	9,6	14,2	22
	38	3,74	3,75	10,9	13,9	22
3	**28**	2,92	2,90	8,6	11,3	16
	38	3,01	2,98	7,8	10,6	16
4	**28**	2,86	2,88	8,3	10,2	16
	38	2,92	2,82	8,5	11,6	16
5	**28**	3,16	3,14	9,7	13,1	15
	38	3,21	3,18	10,9	14,3	15

Tabela 4.3 –*Sistema SISO (utilizando antenas cornetas idênticas na transmissão e na recepção).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância (m)
1	**28**	2,17	2,40	5,1	8,3	32
	38	2,51	2,52	5,3	7,3	32
2	**28**	4,42	4,67	9,6	14,8	22
	38	4,35	4,45	11,3	13,9	22
3	**28**	3,95	3,98	8,6	10,1	16
	38	3,96	4,21	7,7	11,3	16
4	**28**	3,76	3,94	8,9	13,2	16
	38	3,93	4,01	8,3	12,5	16
5	**28**	4,12	4,22	10,6	14,7	15
	38	4,08	4,32	11,8	15,1	15

Para o percurso LOS controlado, o menor valor do coeficiente de propagação medido em 28 GHz na configuração SISO foi de 2,17, utilizando-se a antena corneta e o maior valor foi de 2,42 com a antena SWAA. Para a frequência de 38 GHz, o menor valor foi 2,51 também com a antena corneta e o maior valor foi 2,65 com a antena SWAA.

De acordo com os gráficos da perda de percurso apresentados no apêndice A, nota-se que, conforme esperado, a perda de percurso nos trajetos definidos aumenta com a distância. A perda de percurso no raio de circunferência de 2 metros do ponto de instalação do transmissor ficou em torno de 64 dB em 28 GHz e 67 dB em 38 GHz. Nos pontos mais distantes do transmissor a potência de limiar do receptor foi o fator limitante em ambas as frequências, sendo medida a perda de percurso com um valor aproximado de 110 dBO nível de potência do sinal recebido com a antena omnidirecional foi em média 5,6 dB superior em relação ao nível recebido com a antena SWAA. O nível do sinal recebido, utilizando as antenas cornetas na transmissão e na recepção foi superior, conforme o esperado para uma antena de características diretiva irradiando para um local com visada direta e desobstruído. Entretanto, nos percursos NLOS, os valores medidos dos coeficientes de propagação

utilizando a antena corneta na transmissão foram maiores se comparados com os valores dos coeficientes de propagação com a antena omnidirecional ou SWAA.

A Tabela 4.4 apresenta os valores médios dos coeficientes de propagação nos ambientes controlados e não controlados, comparados com as simulações numéricas (n_s). Observa-se que a maior diferença entre os valores dos coeficientes de propagação medidos e simulado foi de 9,1%. A Tabela 4.5 apresenta os valores médios dos coeficientes de propagação sem considerar o tipo de. Além disso, mostra que a diferença entre os valores dos coeficientes de propagação medido em ambientes controlados e os simulado (Δ_{cs}) é inferior a 1% para 28 GHz e inferior a 3% para 38 GHz.

Tabela 4.4 – *Comparação dos valores dos coeficientes de propagação medidos e simulados*.

Antena TX	Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	n_s
Omnidirecional	**LOS**	**28**	2,35	2,54	2,36
	NLOS	**28**	3,06	3,22	3,44
SWAA	**LOS**	**28**	2,42	2,49	2,36
		38	2,65	2,66	2,53
	NLOS	**28**	3,12	3,13	3,44
		38	3,22	3,18	3,74
Corneta	**LOS**	**28**	2,37	2,40	2,36
		38	2,51	2,52	2,53
	NLOS	**28**	4,06	4,20	3,44
		38	4,08	4,24	3,74

Tabela 4.5 – *Coeficiente de propagação obtido da média dos valores individuais de cada uma das três antenas utilizada na transmissão e comparados com o valor simulado*.

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	n_s	Δ_{cs}%
LOS	**28**	2,38	2,47	2,36	0,85%
	38	2,58	2,59	2,53	1,98%
NLOS	**28**	3,41	3,52	3,44	0,88%
	38	3,65	3,71	3,74	2,47%

A segunda configuração foi considerada uma antena no sistema de transmissão e duas antenas no sistema de recepção, caracterizando um arranjo de antenas utilizado em sistemas de comunicações SIMO. Com o mesmo objetivo da configuração SISO de emular um sistema de comunicação *indoor picocell*, foi configurado primeiramente o sistema de transmissão com a antena omnidirecional e depois foi reconfigurado com a antena SWAA. A utilização da antena corneta na transmissão também foi considerada, com a mesma justificativa realizada para a configuração SISO. No lado da recepção dos experimentos foram definidas as utilizações de duas antenas cornetas com as mesmas características elétricas. E os sinais recebidos pelas duas antenas foram somados, antes de entrar no receptor, com um somador de Wilkinson de 3 dB, com faixa de operação nas duas bandas de frequências de 28 e 38 GHz.

As Tabelas 4.6 a 4.8 apresentam os valores dos coeficientes de propagação encontrados em cada um dos percursos definidos, para a configuração SIMO. As curvas que representam a perda de percurso na configuração SIMO são mostradas no apêndice A, sendo a coluna da esquerda de cada Figura representam os ambientes controlados e a coluna da direita os ambientes não controlados.

Tabela 4.6 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SIMO (com a antena de transmissão omnidirecional e a recepção com duas antenas cornetas).*

Percurso	**Frequência (GHz)**	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ **(dB)**	$\sigma_{máx}$ **(dB)**	**Distância máxima (m)**
1	**28**	2,76	2,88	9,8	12,9	32
2	**28**	3,45	3,62	14,2	16,2	22
3	**28**	2,97	3,12	11,3	14,4	16
4	**28**	2,95	3,09	12,1	15,6	16
5	**28**	3,15	3,29	14,6	14,8	16

Para o percurso LOS com ambiente controlado o menor valor do coeficiente de propagação medido em 28 GHz na configuração SIMO foi de 2,59 com a utilização da antena corneta na transmissão e o maior valor foi de 2,83 com a antena SWAA. Para a frequência de 38 GHz, o menor valor encontrado foi de 2,65 também utilizando a antena corneta e o maior valor foi de 2,88 com a antena SWAA.

Tabela 4.7 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SIMO (com a antena de transmissão SWAA e a recepção com duas antenas cornetas).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância máxima (m)
1	**28**	2,83	2,85	10,1	13,6	32
	38	2,89	2,92	10,9	12,4	32
2	**28**	4,19	4,32	12,2	15,8	22
	38	4,41	4,43	11,6	16,1	22
3	**28**	2,84	2,98	8,8	11,9	16
	38	2,97	3,06	9,8	12,5	16
4	**28**	2,89	2,95	9,4	12,9	16
	38	3,05	3,11	8,7	12,6	16
5	**28**	3,96	3,98	11,8	13,4	16
	38	4,19	4,22	12,3	14,7	16

Tabela 4.8 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas SIMO (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância máxima (m)
1	**28**	2,59	2,63	10,5	14,4	32
	38	2,65	2,71	12,2	15,1	32
2	**28**	4,25	4,33	13,4	16,7	22
	38	4,38	4,48	14,6	18,3	22
3	**28**	3,92	4,02	12,9	16,4	16
	38	4,11	4,19	13,3	16,7	16
4	**28**	3,88	3,97	12,5	15,4	16
	38	4,06	4,23	14,3	18,6	16
5	**28**	4,22	4,38	15,1	18,9	16
	38	4,43	4,45	15,9	19,3	16

Como os valores dos coeficientes de propagação nos ambientes controlados NLOS podem sofrer variações de acordo com as características encontradas em cada um dos percursos, foi analisada a média dos valores obtidos nos percursos. O menor valor médio encontrado foi de 3,13 com a utilização da antena omnidirecional na transmissão, e de 4,06 com a utilização da antena corneta, ambos os valores medidos na frequência de 28 GHz. Na frequência de 38 GHz foi medido menor valor de 3,66 com a utilização da antena SWAA na transmissão e 4,24 com a antena corneta.

De acordo com os gráficos da perda de percurso apresentados no Apêndice A nota-se, logo à primeira vista, que, e conforme o esperado que a perda de percurso nos trajetos definidos aumenta com a distância. Se comparados com a configuração SISO a potência média recebida foi 3,6 dB superior. Entretanto, o desvio padrão encontrado em cada uma das medidas também foram nitidamente superiores, na média foi acrescido de 5,3 dB no desvio padrão das medidas.

A terceira configuração foi considerada duas antenas no sistema de transmissão e uma antena no sistema de recepção, caracterizando um arranjo de antenas utilizado em sistemas de comunicações MISO. As três antenas utilizadas neste experimento são de mesmas características e comportamentos elétricos. O sinal na saída do transmissor foi dividido para as duas antenas por meio de um divisor de Wilkinson de 3 dB, com faixa de operação nas duas bandas de frequências de 28 e 38 GHz.

As medições da perda de percurso são apresentadas no Apêndice A ocorreram com as antenas de transmissão e recepção apontadas para a mesma direção de máxima irradiação, em todos os percursos definidos no prédio 2. A Tabela 4.9 apresentam os valores dos coeficientes de propagação encontrados em cada um dos percursos definidos, na configuração MISO.

É importante ressaltar, para esta configuração do arranjo que não foram consideradas as utilizações das antenas omnidirecional e SWAA na transmissão, por razões da quantidade disponível. E por manter uma coerência de comparação com os arranjos SISO e SIMO a recepção foi mantida a utilização somente com a antena corneta.

Considerando a média dos valores obtidos nos percursos NLOS controlados, resultou no valor do coeficiente de propagação médio de 3,91 em 28 GHz e 4,11 para 38 GHz. O nível do sinal recebido para esta configuração ficou próximo ao valor encontrado na configuração SISO. Entretanto, o desvio padrão apresentado em cada uma das medidas foi semelhante aos valores encontrados na configuração SIMO. Ou seja, ambas as semelhanças foram inferiores a 2 dB.

A quarta configuração baseou-se em duas antenas cornetas na transmissão e outras duas na recepção, caracterizando um sistema MIMO. A Figura 4.3 mostra a montagem de recepção com as duas antenas. Utilizou-se somador e divisor de Wilkinson de 3 dB.

As medições da perda de percurso apresentadas Apêndice A ocorreram com as antenas de transmissão e recepção apontadas para a mesma direção de máxima irradiação, em todos os percursos definidos no prédio 2. A Tabela 4.10 apresentam os valores dos coeficientes de propagação encontrados em cada um dos percursos definidos, na configuração MIMO.

Considerando a média dos valores obtidos nos percursos NLOS controlados, obteve-se coeficiente de propagação médio de 4,06 em 28 GHz e 4,18 em 38 GHz. O nível de sinal recebido para esta configuração ficou próximo ao valor encontrado na configuração SISO. Entretanto, o desvio padrão apresentado em cada uma das medidas foi superior, se comparado com as demais configurações realizadas. Obteve-se média de 4,6 dB superior se comparado com SIMO, 4,8 dB se comparado com MISO e 6,3 dB se comparado com SISO.

Tabela 4.9 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas MISO (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância máxima (m)
1	**28**	2,91	2,99	11,9	16,3	32
	38	3,10	3,15	12,5	16,8	32
2	**28**	4,62	4,71	14,3	18,9	22
	38	4,74	4,81	15,5	19,3	22
3	**28**	3,15	3,21	12,6	15,4	16
	38	3,38	3,42	12,9	16,8	16
4	**28**	3,28	3,31	13,4	16,9	16
	38	3,49	3,54	14,7	17,1	16
5	**28**	4,56	4,63	14,9	17,8	16
	38	4,83	4,97	15,6	18,8	16

Tabela 4.10 – *Medidas do cenário 1 com MIMO 2x2.*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância máxima (m)
1	**28**	3,18	3,26	15,8	18,9	32
	38	3,22	3,31	14,9	18,5	32
2	**28**	4,57	4,60	16,7	21,9	22
	38	4,68	4,72	18,6	23,6	22
3	**28**	3,52	3,74	18,2	21,8	16
	38	3,64	3,81	17,5	20,7	16
4	**28**	3,46	3,61	16,5	20,9	16
	38	3,66	3,78	18,3	21,8	16
5	**28**	4,68	4,59	18,1	21,9	16
	38	4,74	4,76	19,4	22,7	16

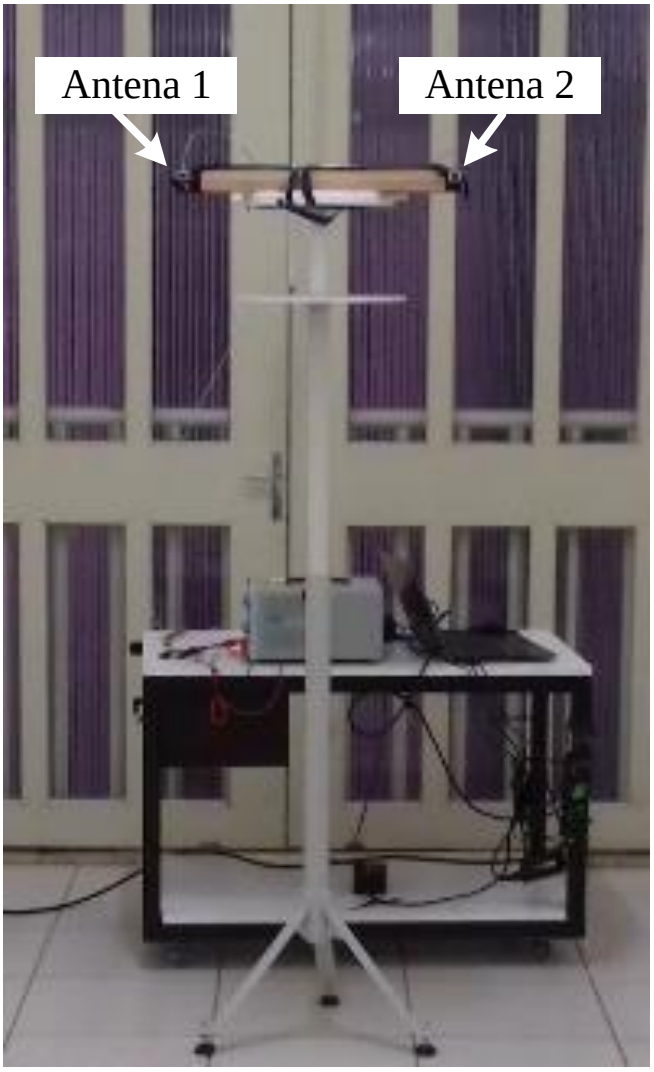


Figura 4.3 – *Sistema de recepção com duas antenas.*

4.2 Cenário 2

Os resultados experimentais da perda de percurso e do coeficiente de propagação foram realizados nas áreas internas dos prédios 2, 3 e 4 do Inatel. O percurso 1 é o corredor que interliga os três prédios, sendo o único LOS, os dois outros percursos são NLOS. A Figura 4.4 ilustra os três percursos para as medições neste segundo cenário proposto.

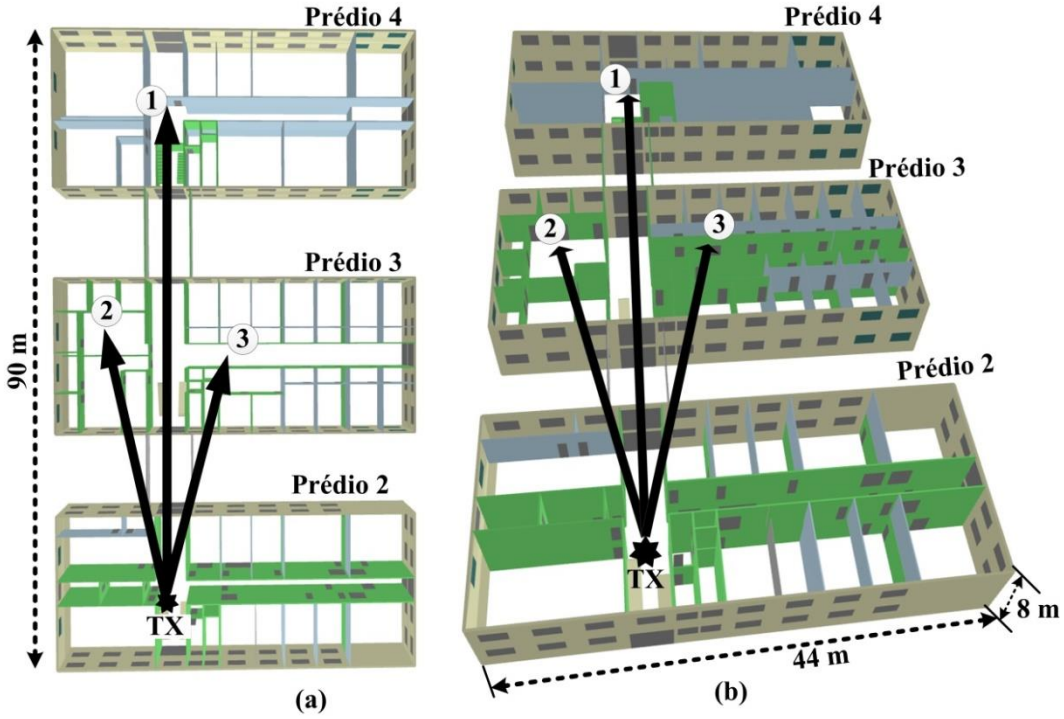


Figura 4.4 – *Ilustrações dos percursos definidos para os experimentos no cenário 2.*

As medições da perda de percurso foram realizadas também com quatro configurações: SISO, SIMO, MISO e MIMO. Para as configurações SISO e SIMO, as análises foram conduzidas com as antenas omnidirecional, SWAA e corneta instaladas no lado da transmissão. Na configuração MISO e MIMO, utilizou-se somente as antenas cornetas. Em ambas as configurações nos arranjos de antenas o lado da recepção sempre foi configurado com antena corneta. As Tabelas 4.11 a 4.13 sintetizam os valores do coeficiente de propagação em 28 e 38 GHz na configuração SISO para cada um dos percursos definidos no cenário 2. Os coeficientes de propagação foram obtidos em ambientes controlados e não controlados.

Outro ponto a destacar nas Tabelas 4.11 a 4.13 são as distâncias envolvidas nas análises das medições. Para as análises que envolveram as antenas omnidirecional e SWAA, as distâncias máximas foram limitadas pela sensibilidade do receptor, uma vez que a potência EIRP foi mantida em 0 dBm em todos os casos analisados. As análises conduzidas com a antena corneta na transmissão resultaram em distâncias superiores. Os altos alcances obtidos com a antena corneta podem ser explicados pela sua alta diretividade.

Tabela 4.11 – *Sistema SISO (com a antena de transmissão omnidirecional e a recepção com a antena corneta).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância (m)
1	**28**	3,55	3,73	5,1	8,3	40
2	**28**	3,74	4,02	9,6	14,8	25
3	**28**	4,25	4,52	8,6	10,1	25

Tabela 4.12 – *Sistema SISO (com a antena de transmissão SWAA e a recepção com a antena corneta).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância (m)
1	**28**	3,64	3,72	5,1	8,3	40
	38	3,82	4,13	5,3	7,3	40
2	**28**	3,95	4,23	9,6	14,8	25
	38	4,12	4,35	11,3	13,9	25
3	**28**	4,22	4,41	8,6	10,1	25
	38	4,29	4,56	7,7	11,3	25

Tabela 4.13 – *Sistema SISO (utilizando antenas cornetas na transmissão e recepção).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância (m)
1	**28**	3,05	3,17	5,1	8,3	75
	38	3,23	3,29	5,3	7,3	75
2	**28**	4,45	4,53	9,6	14,8	32
	38	4,68	4,56	11,3	13,9	32
3	**28**	4,31	4,46	8,6	10,1	36
	38	4,35	4,43	7,7	11,3	36

Para o percurso LOS controlado, o menor valor do coeficiente de propagação medido em 28 GHz na configuração SISO foi 3,05 com a utilização da antena

corneta e o maior valor foi de 3,64 com a antena SWAA. Para a frequência de 38 GHz, o menor valor encontrado foi 3,82 também com a antena corneta e o maior valor foi de 2,65 com a antena SWAA.

O nível de potência do sinal recebido com a antena omnidirecional foi 4,3 dB superior na média em relação ao nível de potência recebida com a antena SWAA, tanto em LOS quanto em NLOS. O nível médio do sinal recebido, utilizando as antenas cornetas nos arranjos de transmissão e recepção foram superiores somente nos percursos LOS, conforme o esperado para uma antena de características diretiva irradiando para um local com visada direta e desobstruída. Entretanto, nos percursos NLOS, os valores dos coeficientes de propagação utilizando a antena corneta na transmissão foram sempre superiores se comparados com as demais configurações dos arranjos utilizados nos experimentos.

A Tabela 4.14 sintetiza os valores médios do coeficiente de propagação nos ambientes controlados e não controlados, e também dos valores médios obtidos nas simulações numéricas. A Tabela 4.14 é organizada em função do tipo de percurso e do tipo da antena da transmissão, para a configuração SISO. Pode-se observar que a maior diferença encontrada entre todos os valores de coeficientes de propagação medidos em ambiente controlado foi de 8,12%.

A Tabela 4.15 apresenta os valores médios dos coeficientes de propagação, sem classificar pelo tipo de antena da transmissão do sinal. É apresentada também a diferença encontrada entre os valores dos coeficientes de propagação medido em ambientes controlados e simulado (Δ_{cs}). Ao comparar os valores obtidos no segundo cenário com o primeiro, os resultados obtidos do coeficiente de propagação foram superiores (Δ_{PS}), conforme mostrado na última coluna da Tabela 4.15. Os valores superiores nos coeficientes de propagação para o segundo cenário já eram esperados nos experimentos, uma vez que nos percursos definidos possuíam características bem diferentes ao do primeiro cenário. Principalmente com relação as perdas por penetração geradas pelas paredes externas dos prédios, que são mais espessas e construídas com concreto e por cada separação entre os prédios de aproximadamente 18 metros e de característica *outdoor*.

Tabela 4.14 – *Comparação dos valores dos coeficientes de propagação medido e simulado.*

Antena TX	Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	n_s
Omnidirecional	**LOS**	**28**	3,55	3,73	3,85
	NLOS	**28**	3,99	4,27	4,66
SWAA	**LOS**	**28**	3,65	3,72	3,85
		38	3,82	4,13	4,82
	NLOS	**28**	4,08	4,32	4,66
		38	4,21	4,46	5,03
Corneta	**LOS**	**28**	3,05	3,17	3,85
		38	3,23	3,29	4,82
	NLOS	**28**	4,38	4,49	4,66
		38	4,51	4,50	5,03

Tabela 4.15 – *Coeficiente de propagação obtido pela média dos valores individuais de cada uma das três antenas da transmissão e comparados com o valor simulado.*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	n_s	$\Delta_{cs}\%$	$\Delta_{PS}\%$
LOS	**28**	3,42	3,54	3,85	12,57%	+43,70%
	38	3,53	3,71	4,82	8,22%	+36,82%
NLOS	**28**	4,15	4,36	4,66	12,29%	+21,70%
	38	4,36	4,48	5,03	15,37%	+19,45%

A segunda configuração considerada nos experimentos do segundo cenário foi a SIMO. Com o mesmo objetivo da configuração SISO de emular um sistema de comunicação *indoor picocell* e analisar a influência entre prédios diferentes, foi configurado primeiramente o sistema de transmissão com a antena omnidirecional e depois foi reconfigurado com a antena SWAA. No arranjo de antenas de transmissão também foram consideradas as antenas cornetas nas analises. No lado da recepção dos experimentos, foram definidas as utilizações de duas antenas cornetas iguais. Os apontamentos das antenas de transmissão e recepção sempre ocorreram nas direções de máxima irradiação. As Tabelas 4.16 a 4.18 apresentam os valores do coeficiente de propagação obtidos em cada um dos percursos definidos para SIMO.

Tabela 4.16 – *Sistema SIMO (com a antena de transmissão omnidirecional e a recepção com duas antenas cornetas).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância (m)
1	**28**	4,13	4,18	5,1	8,3	40
2	**28**	4,61	4,89	9,6	14,8	25
3	**28**	4,53	4,76	8,6	10,1	25

Tabela 4.17 – *Sistema SIMO (com a antena de transmissão SWAA e a recepção com duas antenas cornetas).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância (m)
1	**28**	4,85	5,03	5,1	8,3	40
	38	5,38	5,47	5,3	7,3	40
2	**28**	5,75	5,90	9,6	14,8	25
	38	6,02	6,16	11,3	13,9	25
3	**28**	5,83	6,08	8,6	10,1	25
	38	6,21	6,39	7,7	11,3	25

Tabela 4.18 – *Sistema SIMO (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância máxima (m)
1	**28**	3,61	3,72	10,1	13,6	75
	38	3,83	3,91	10,9	12,4	75
2	**28**	4,76	4,84	12,2	15,8	32
	38	4,91	5,08	11,6	16,1	32
3	**28**	4,89	5,03	8,8	11,9	36
	38	5,12	5,31	9,8	12,5	36

Para o percurso LOS, com ambiente controlado, o menor valor do coeficiente de propagação medido em 28 GHz na configuração SIMO foi 3,61 com a utilização da antena corneta na transmissão; o maior valor foi de 4,85 com a antena SWAA. Para a frequência de 38 GHz, o menor valor encontrado foi de 3,83 também utilizando a antena corneta e o maior valor foi de 5,38 com a antena SWAA.

Nos percursos NLOS, o maior valor do coeficiente de propagação encontrado foi 4,53 utilizando a antena omnidirecional e o maior valor foi de 5,83 utilizando a antena SWAA, ambos os valores obtidos na frequência de 28 GHz. Para a frequência de 38 GHz o menor valor obtido foi de 4,91 utilizando a antena corneta e o maior valor obtido foi de 6,21 utilizando a antena SWAA.

Na média, os valores dos coeficientes de propagação foram maiores no segundo cenário devido às características dos percursos analisados. Principalmente pela existência de paredes externas com grandes espessuras se comparadas com as paredes internas e também pelos espaçamentos existentes entre os prédios, que possuem característica *outdoor* o faz com que o sinal propagado se espalhe mais pelo espaço. A terceira e a quarta configurações consideradas nos experimentos do segundo cenário foram a MISO e a MIMO. A Tabela 4.19 e 4.20 apresentam os valores dos coeficientes de propagação encontrados em cada um dos percursos na configuração MISO e MIMO, respectivamente.

Tabela 4.19 – *Sistema MISO (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).*

Percurso	**Frequência (GHz)**	n_c	n_{nc}	$\bar{\sigma}$ **(dB)**	$\sigma_{máx}$ **(dB)**	**Distância máxima (m)**
1	**28**	3,72	3,84	11,9	16,3	75
	38	3,89	5,02	12,5	16,8	75
2	**28**	4,65	4,88	14,3	18,9	32
	38	4,92	5,14	15,5	19,3	32
3	**28**	4,63	4,76	12,6	15,4	36
	38	4,77	4,95	12,9	16,8	36

Tabela 4.20 – *Sistema MIMO 2x2 (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n	$\bar{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância máxima (m)
1	**28**	3,81	3,96	15,8	18,9	75
	38	3,93	5,08	14,9	18,5	75
2	**28**	4,84	5,17	16,7	21,9	32
	38	4,96	5,21	18,6	23,6	32
3	**28**	4,56	4,85	18,2	21,8	36
	38	4,59	4,92	17,5	20,7	36

Na média os valores dos coeficientes de propagação também foram superiores no segundo cenário devido às características dos percursos analisados. As contribuições para a elevação nos valores dos coeficientes de propagação foram as paredes externas com grande espessura e de concreto, espaçamentos existentes entre os prédios e também devido a utilização dos somadores/divisores de sinais utilizados para configurar o arranjo de antenas MISO e MIMO.

4.3 Cenário 3

Os resultados experimentais da perda de percurso e do coeficiente de propagação realizados na área externa do Inatel. Foram definidos três percursos para as realizações das medições LOS, conforme mostrado na Figura 4.5. As medições da perda de percurso foram conduzidas em ambientes controlados e não controlados nas configurações SISO e MIMO. Na configuração SISO foram utilizadas as antenas omnidirecional, SWAA e corneta na transmissão. A recepção foi feita somente com a antena corneta. Para a configuração MIMO foram utilizadas antenas cornetas na transmissão e recepção. A antena de transmissão foi instalada na passarela do segundo piso de acesso do prédio 1 para o prédio 2, resultando em uma altura total entre a superfície do solo e o centro geométrico da antena de 5,7 m. A antena de recepção foi instalada a 1,7 m em relação ao solo para as medições. Em todas as

configurações propostas foi configurada a EIRP foi de 0 dBm. As Tabelas 4.21 a 4.23 apresentados os resultados dos coeficientes de propagação encontrados em cada um dos três trajetos definidos.

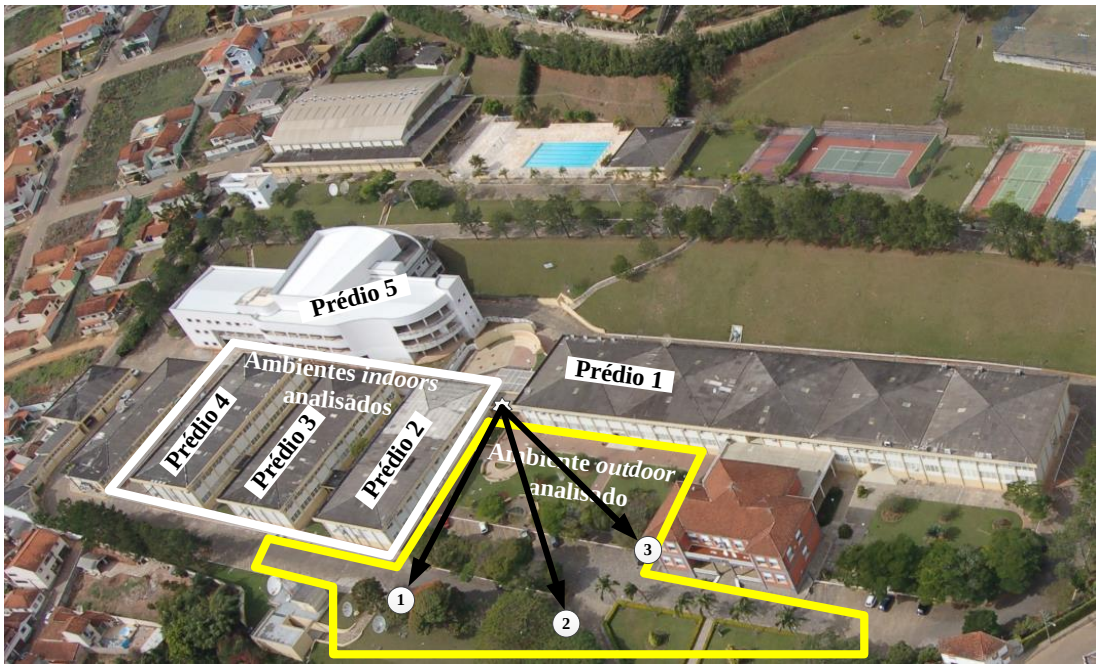


Figura 4.5 – *Ambiente outdoor das medições da perda de percurso e do coeficiente de propagação.*

Todos os percursos analisados apresentaram visada direta entre o transmissor e o receptor. Conforme esperado, o menor valor do coeficiente de propagação medido em 28 GHz na configuração SISO foi 2,42 com a utilização da antena corneta no percurso 3. O maior valor encontrado foi de 2,96 no percurso 2, utilizando a antena SWAA. Para a frequência de 38 GHz, o menor valor encontrado do coeficiente de propagação foi 2,49 no percurso 3 utilizando a antena corneta. E o maior valor encontrado foi de 3,07 utilizando a antena SWAA. A Tabela 4.24 apresentados os resultados dos coeficientes de propagação encontrados em cada um dos três trajetos com a configuração MIMO. Os valores dos coeficientes de propagação apresentaram um aumento se comparado com a configuração SISO.

Tabela 4.21 – *Sistema SISO (com a antena de transmissão omnidirecional e a recepção com a antena corneta).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância (m)
1	**28**	2,65	2,76	5,1	8,3	35
2	**28**	2,88	2,94	9,6	14,8	55
3	**28**	2,56	2,71	8,6	10,1	70

Tabela 4.22 – *Sistema SISO (com a antena de transmissão SWAA e a recepção com a antena corneta).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância máxima (m)
1	**28**	2,68	2,83	10,1	13,6	35
	38	2,94	3,12	10,9	12,4	35
2	**28**	2,96	3,15	12,2	15,8	55
	38	3,07	3,23	11,6	16,1	55
3	**28**	2,59	2,66	8,8	11,9	70
	38	2,71	2,82	9,8	12,5	70

Tabela 4.23 – *Sistema SISO (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).*

Percurso	Frequência (GHz)	n_c	n_{nc}	$\overline{\sigma}$ (dB)	$\sigma_{máx}$ (dB)	Distância máxima (m)
1	**28**	2,45	2,59	11,9	16,3	35
	38	2,56	2,81	12,5	16,8	35
2	**28**	2,87	3,08	14,3	18,9	55
	38	3,04	3,32	15,5	19,3	55
3	**28**	2,42	2,55	12,6	15,4	16
	38	2,49	2,63	12,9	16,8	16

Tabela 4.24 – *Valores encontrados nas medições utilizando arranjo de antenas MIMO 2x2 (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).*

Percurso	**Frequência (GHz)**	n_c	n_{nc}	$\bar{\sigma}$ **(dB)**	$\sigma_{máx}$ **(dB)**	**Distância máxima (m)**
1	**28**	3,25	3,42	15,8	18,9	35
	38	3,32	3,48	14,9	18,5	35
2	**28**	3,38	3,64	16,7	21,9	22
	38	3,45	3,67	18,6	23,6	22
3	**28**	3,17	3,29	18,2	21,8	70
	38	3,30	3,47	17,5	20,7	70

Capítulo 5

5.1 Conclusões

O trabalho teve como principal objetivo apresentar as medições dos coeficientes de propagação e da perda de percurso em ambientes *indoor* e *outdoo*r na faixa de ondas milimétricas em 28 e 38 GHz. O trabalho baseou-se em simulações numéricas e medições. Adicionalmente, foram realizadas caracterizações dos principais materiais encontrados nas construções civis brasileiras em função da perda por penetração e do coeficiente de reflexão. Estes parâmetros serviram como parâmetros de entrada das simulações numéricas.

No Capítulo 1 foi apresentada a contextualização sobre a demanda de dados das redes móveis e as faixas de frequência potenciais para aumentar a taxa de transmissão e a qualidade de serviço nas futuras redes 5G. Ainda no Capítulo 1, apresentou-se uma revisão bibliográfica, contendo estudos sobre os mecanismos de propagação na faixa de ondas milimétricas.

O Capítulo 2 discorreu sobre os conceitos de propagação e relatou a caracterização dos materiais da construção civil em função da perda por penetração e do coeficiente de reflexão na faixa de ondas milimétricas. Além disso, descreveu-se os equipamentos utilizados e os cenários *indoor* e *outdoor* das simulações e dos experimentos. As maiores perdas por penetração foram das paredes com tijolos. Nos trechos de paredes com instalações elétricas, as medições da perda por penetração sofreram um acréscimo de atenuação devido aos materiais metálicos. Na frequência de 28 GHz, o acréscimo foi de 6,69 a 7,3 dB. Na frequência de 38 GHz, o acréscimo foi de 9,93 dB a 10,83.

Na frequência de 28 GHz, a perda por penetração nas paredes com tijolos com e sem instalação elétrica e na porta de madeira MDF foi superior para a polarização horizontal se comparada à polarização vertical do sinal; enquanto na frequência de 38 GHz foi inferior na polarização horizontal em relação à vertical. Nas superfícies de divisórias de Eucatex, paredes de gesso e vidros, a perda por penetração em 28 e

38 GHz foi superior na polarização horizontal do sinal se comparada à polarização vertical.

As medidas do coeficiente de reflexão demonstraram que as superfícies elevaram as reflexões do sinal transmitido pelo ambiente, uma vez que os valores medidos foram em grande parte superiores a 0,5, chegando ao valor máximo medido de 0,928. Os vidros com níveis de transparência de 70% e 100% apresentaram maior refletividade do que as superfícies das paredes de tijolos, paredes de gesso e divisórias de Eucatex. Entretanto, nas paredes de tijolos as perdas por penetração foram as maiores encontradas.

O Capítulo 3 foi dedicado a descrição, a configuração e a utilização do *software* WinProp. Os resultados simulados obtidos foram o mapa da intensidade do nível do sinal propagado por todo ambiente, perda de percurso e o coeficiente de propagação nos trajetos LOS e NLOS. A intensidade do sinal ao longo de um raio de 2 metros do transmissor foi de aproximadamente -66 dBm em 28 GHz e -69 dBm em 38 GHz.

No Capítulo 4 foram reportadas as medições da perda de percurso e do coeficiente de propagação, conforme a metodologia escolhida com confiabilidade de 95%. Os valores foram obtidos em ambientes controlados (sem a presença de pessoas no local da medição) e ambientes não controlados (com presença de pessoas pelo local da mediação). Foram conduzidas análises experimentais com as configurações SISO, SIMO, MISO e MIMO. Com a configuração SISO, os valores do coeficiente de propagação foram próximos daqueles obtidos nas simulações. Para as demais configurações, os valores do coeficiente de propagação foram superiores.

5.2 Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se a obtenção da perda de percurso e do coeficiente de propagação em tempo real, utilizando processamento digital de sinais e outros novos modelos com e sem portadora modulada. E por fim, o desenvolvimento computacional de um padrão de análise da área cobertura na faixa de ondas milimétricas para os ambientes *indoor* e *outdoor*.

ANEXO A

Determinação da confiabilidade nas medidas dos experimentos

A determinação do número de medidas necessárias que levam a confiabilidade é de 95%, é dado por [111]

$$k = \frac{(t_{k-2})^2(\sigma_{máx})^2}{E^2}, \tag{A.1}$$

onde *n* é número de amostras necessárias para a confiabilidade de 95% nas medições, t_{k-2} fator de confiança, equivale a 1,96 conforme apresentado por [111], E é o erro máximo admitido em cada uma das medições e σ é desvio padrão máximo encontrado em cada uma das medidas.

O método de regressão linear utilizado para determinar a perda de percurso e o coeficiente de propagação baseia-se em [111]

$$\overline{PL} = (\alpha + \beta x) \pm C_{95\%} \tag{A.2}$$

onde $\overline{PL}$ é a perda de percurso média, α é o coeficiente angular da curva, ou seja, o valor do coeficiente de propagação, β *é o* coeficiente linear da curva. Calcula-se o valor médio para as coordenadas x e y com [111]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{A.3}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \tag{A.4}$$

$$\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2 \tag{A.5}$$

$$\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 \tag{A.6}$$

$$\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \tag{A.7}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-2}\left[\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 - \beta^2 \sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2\right] \tag{A.8}$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{A.9}$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 - \left[\beta \times \sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2\right] \tag{A.10}$$

Finalmente a regressão linear para determinar a perda de percurso com a confiabilidade de 95% nas medições é dada por [111]

$$\overline{PL} = (\alpha + \beta x) \pm t_{k-2}\sqrt{\sigma^2\left[\frac{1}{n} + \frac{\left(x - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\right]} \tag{A.11}$$

Apêndice A

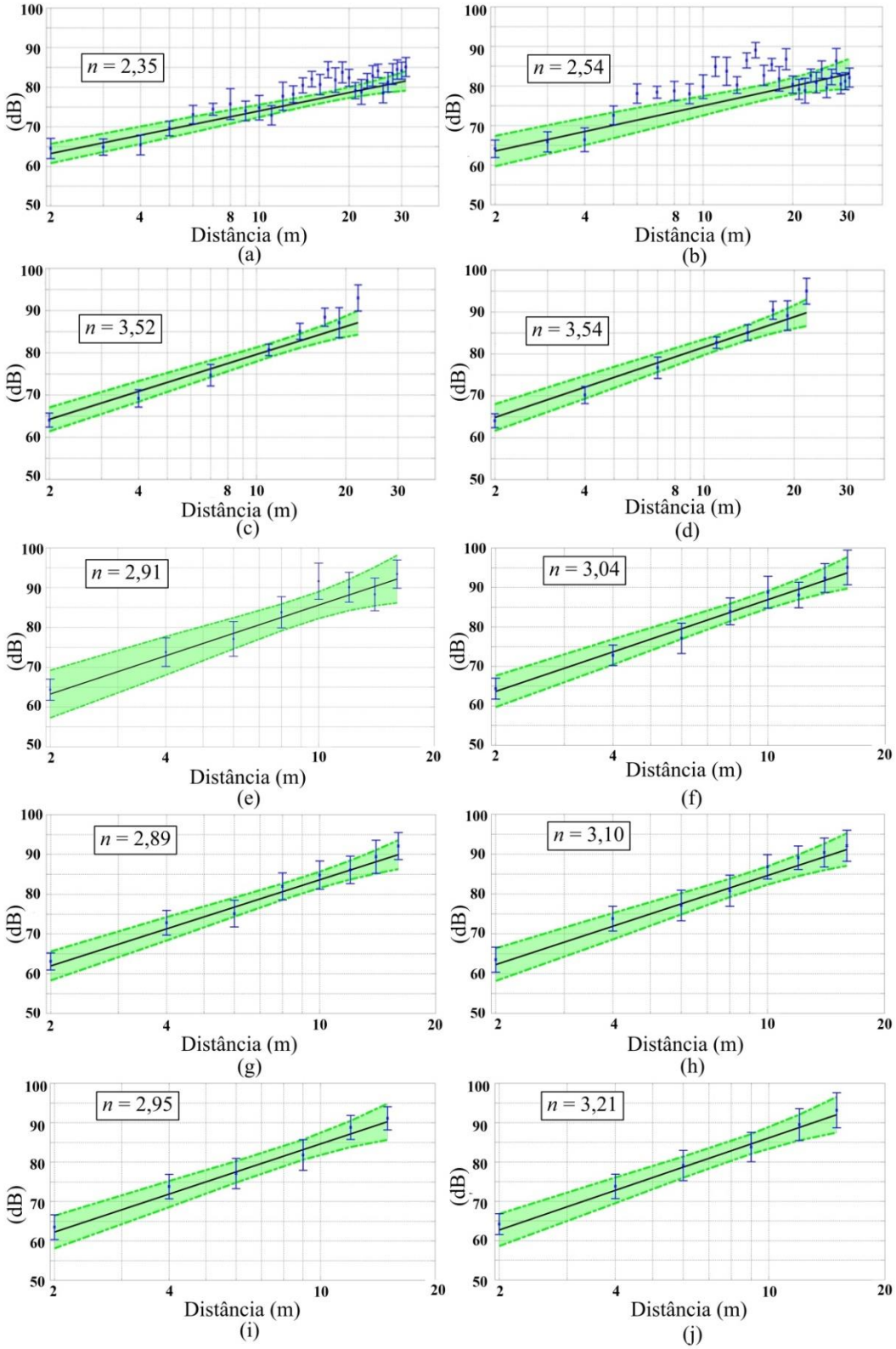


Figura A.1 – *Medições da perda de percurso em 28 GHz com sistema SISO, sendo a transmissão configurada com a antena omnidirecional e a recepção com a antena corneta.*

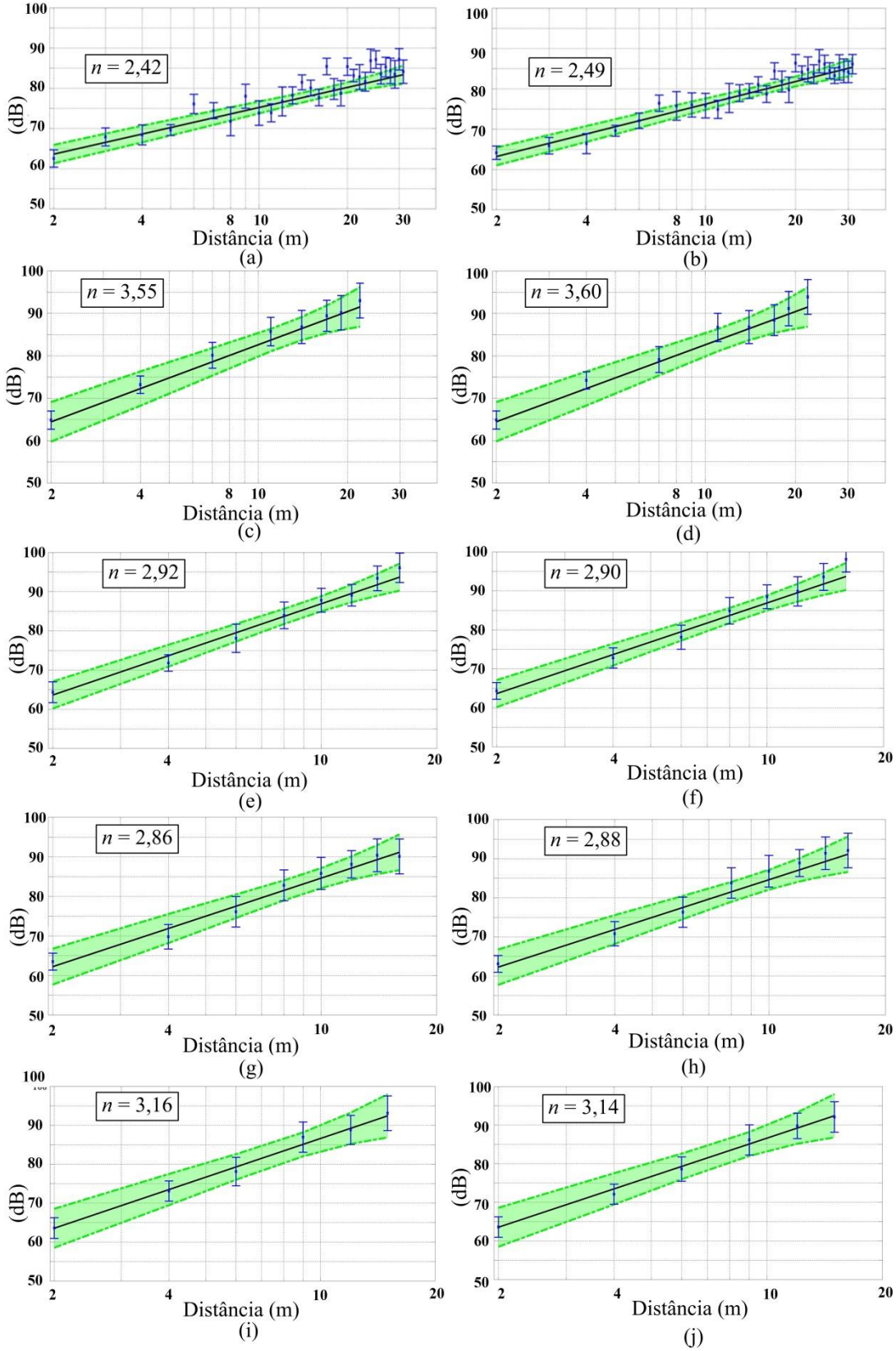


Figura A.2 – *Medições da perda de percurso em 28 GHz com sistema SISO, sendo a transmissão configurada com a antena SWAA e a recepção com a antena corneta***.**

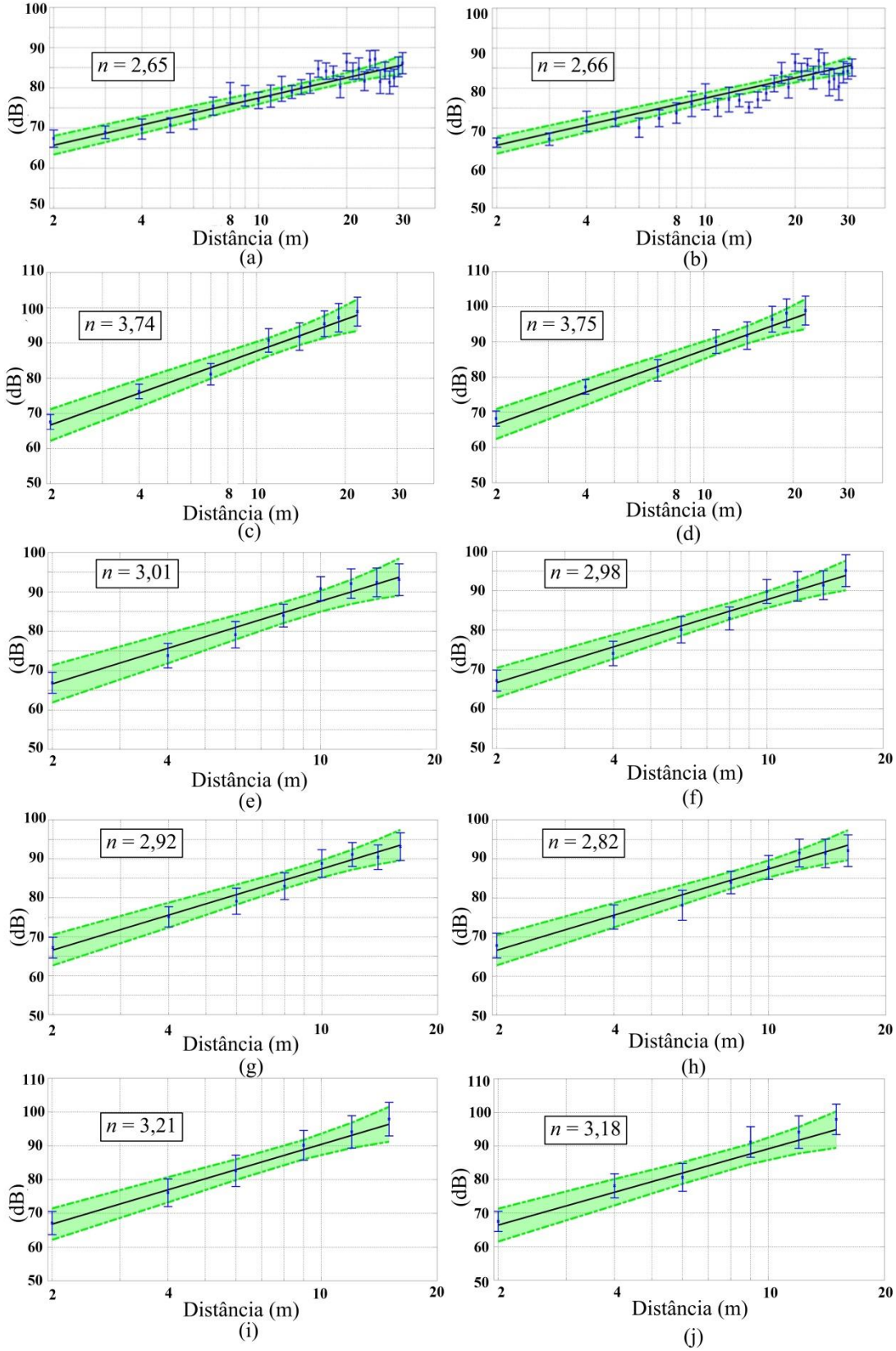


Figura A.3 – *Medições da perda de percurso em 38 GHz com sistema SISO, sendo a transmissão configurada com a antena SWAA e a recepção com a antena corneta***.**

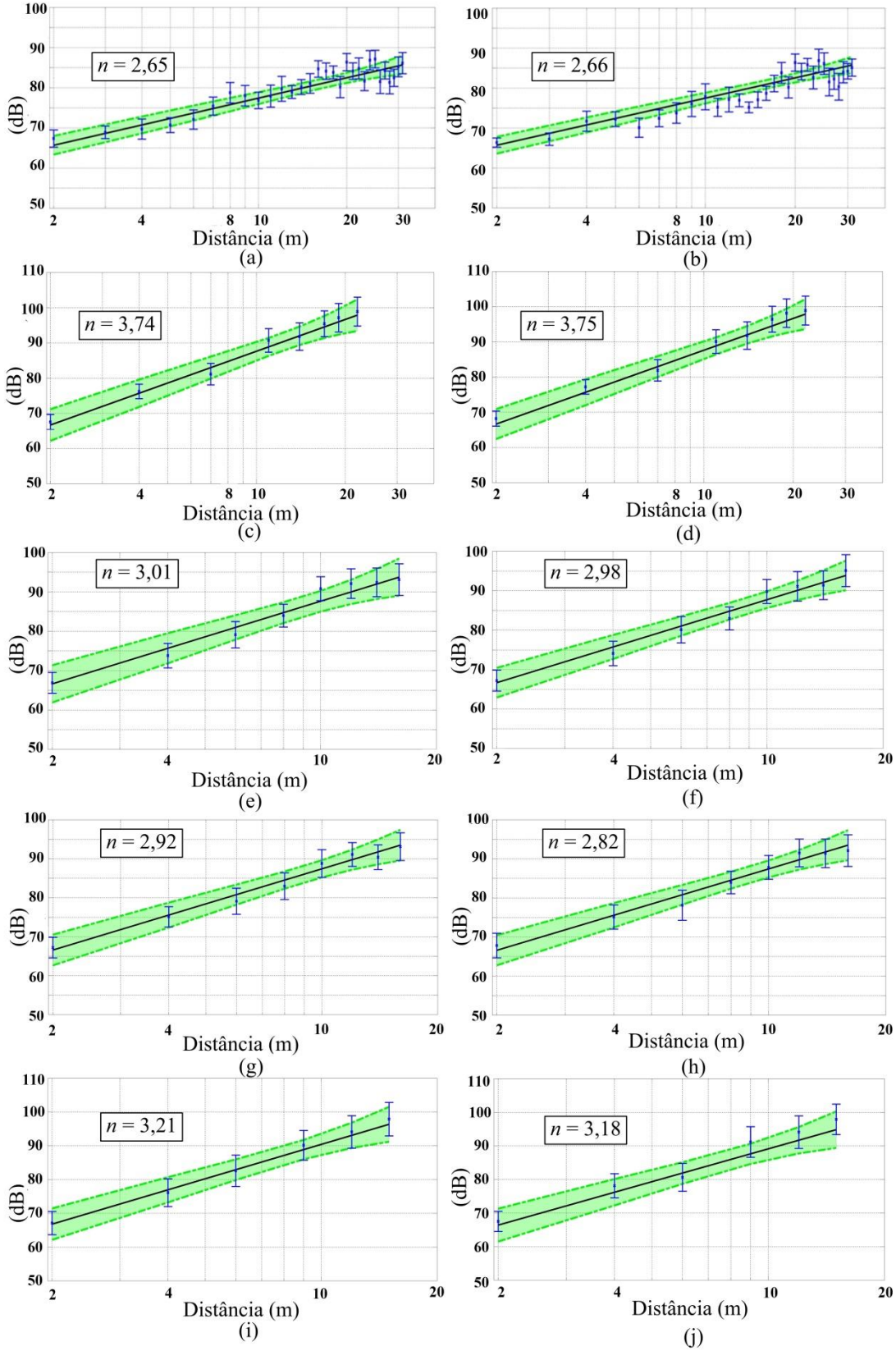


Figura A.4 – *Medições da perda de percurso em 28 GHz com sistema SISO, sendo a transmissão e a recepção configurados com antenas cornetas de mesma características*.

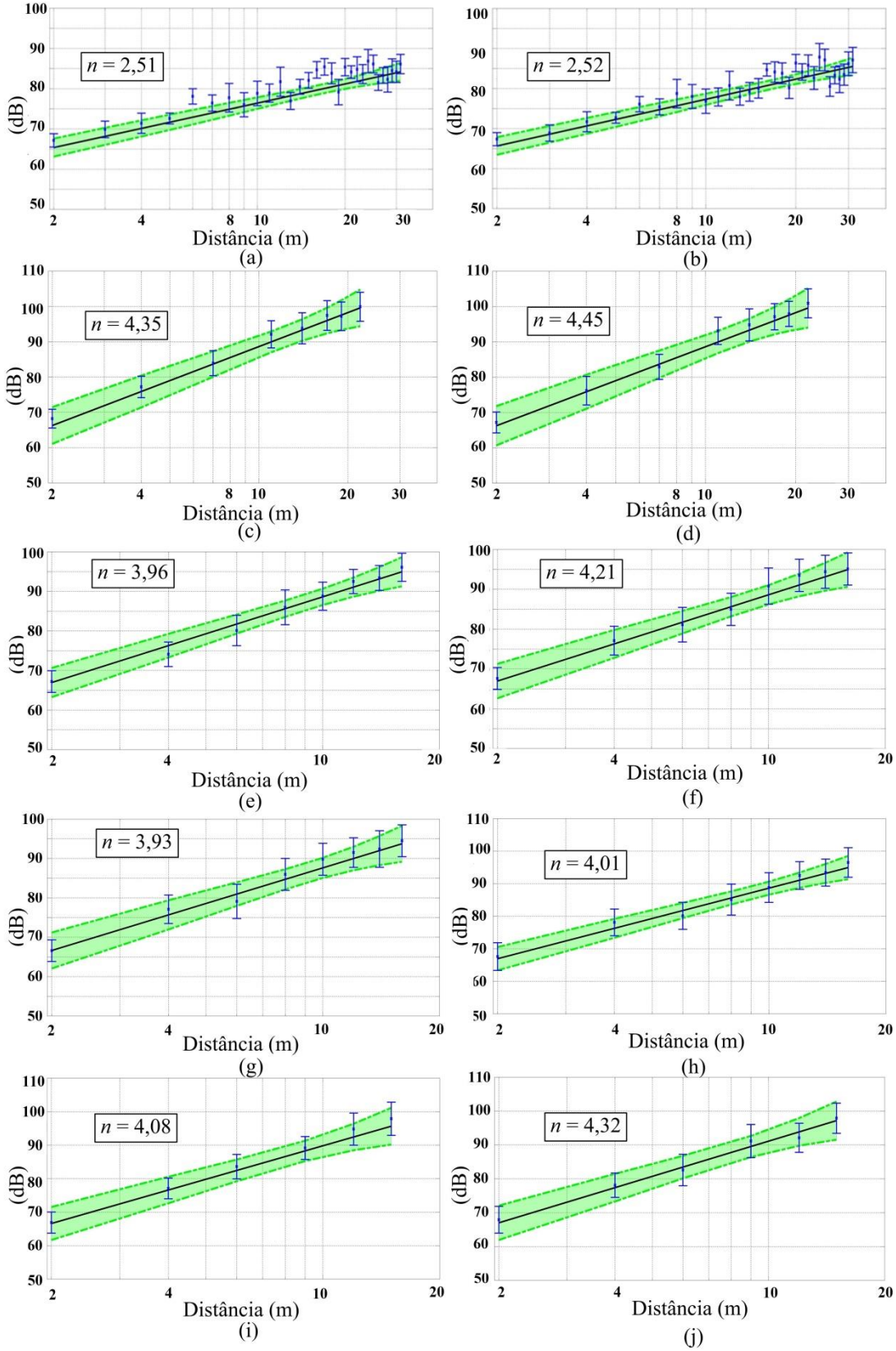


Figura A.5 – *Medições da perda de percurso em 38 GHz sistema SISO, sendo a transmissão e a recepção configurados com antenas cornetas de mesmas características.*

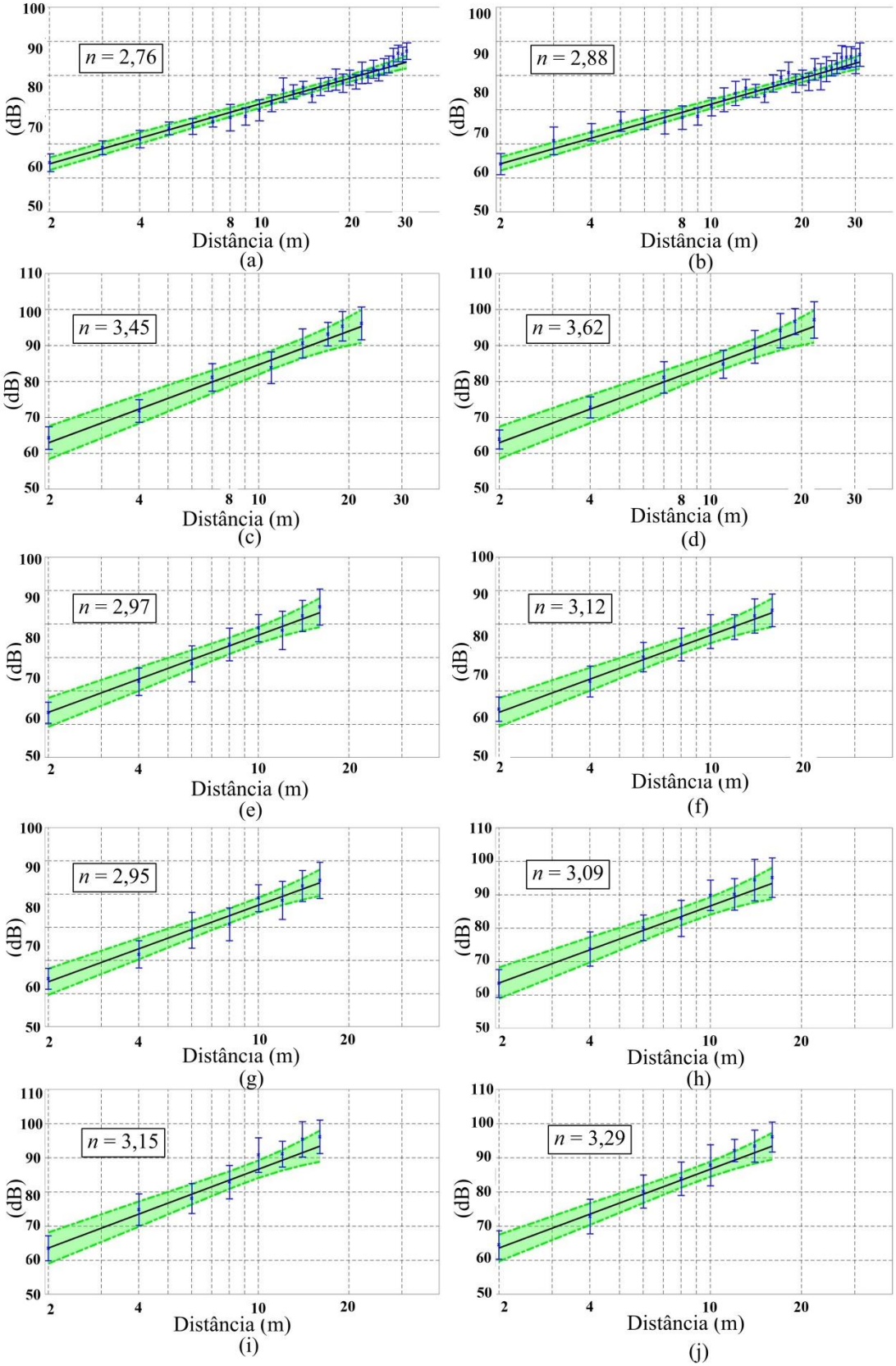


Figura A.6 – *Medições da perda de percurso em 28 GHz com sistema SIMO (com a antena de transmissão omnidirecional e a recepção com duas antenas cornetas).*

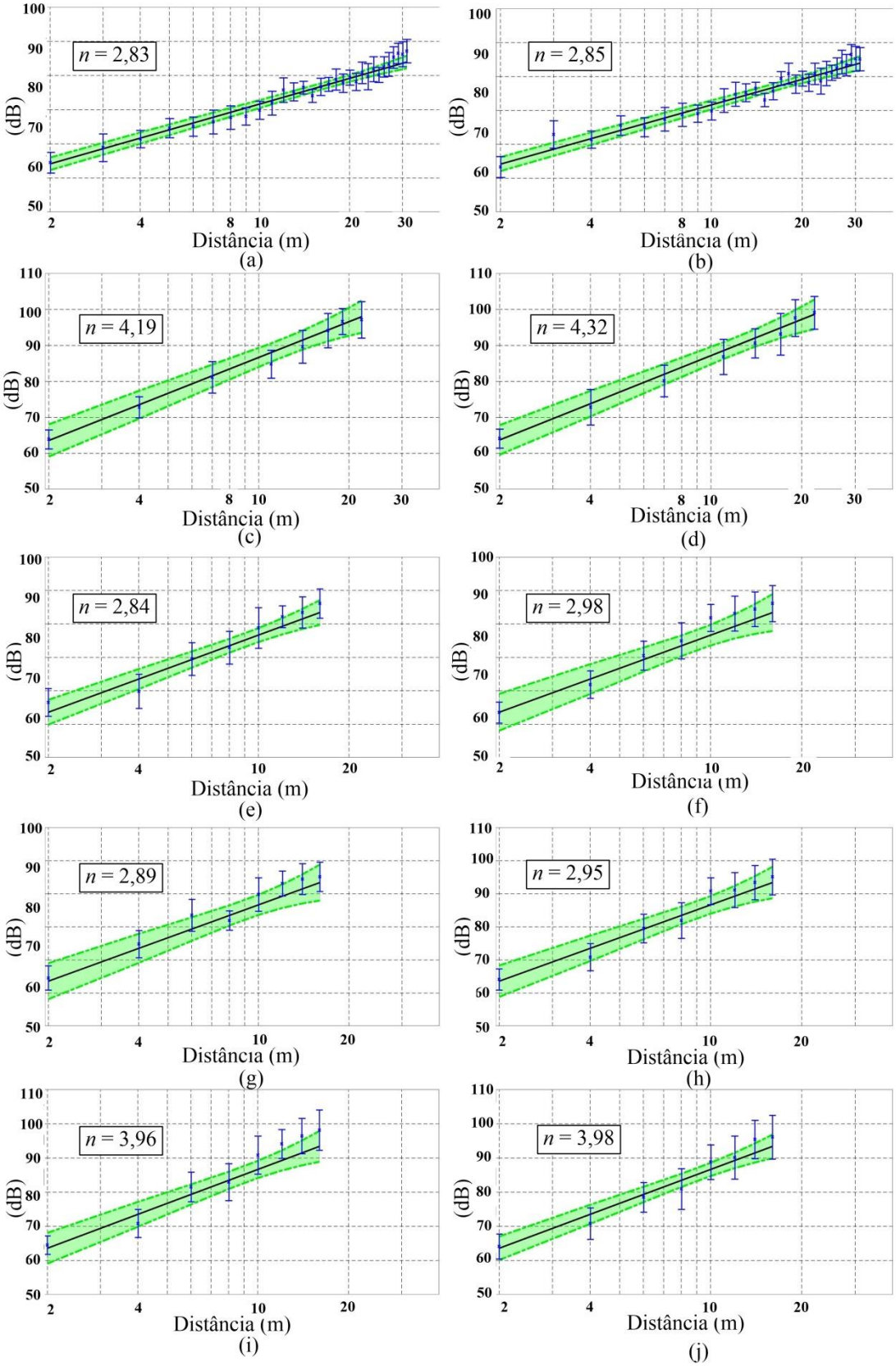


Figura A.7 – *Medições da perda de percurso em 28 GHz com sistema SIMO (com a antena de transmissão SWAA e a recepção com duas antenas cornetas).*

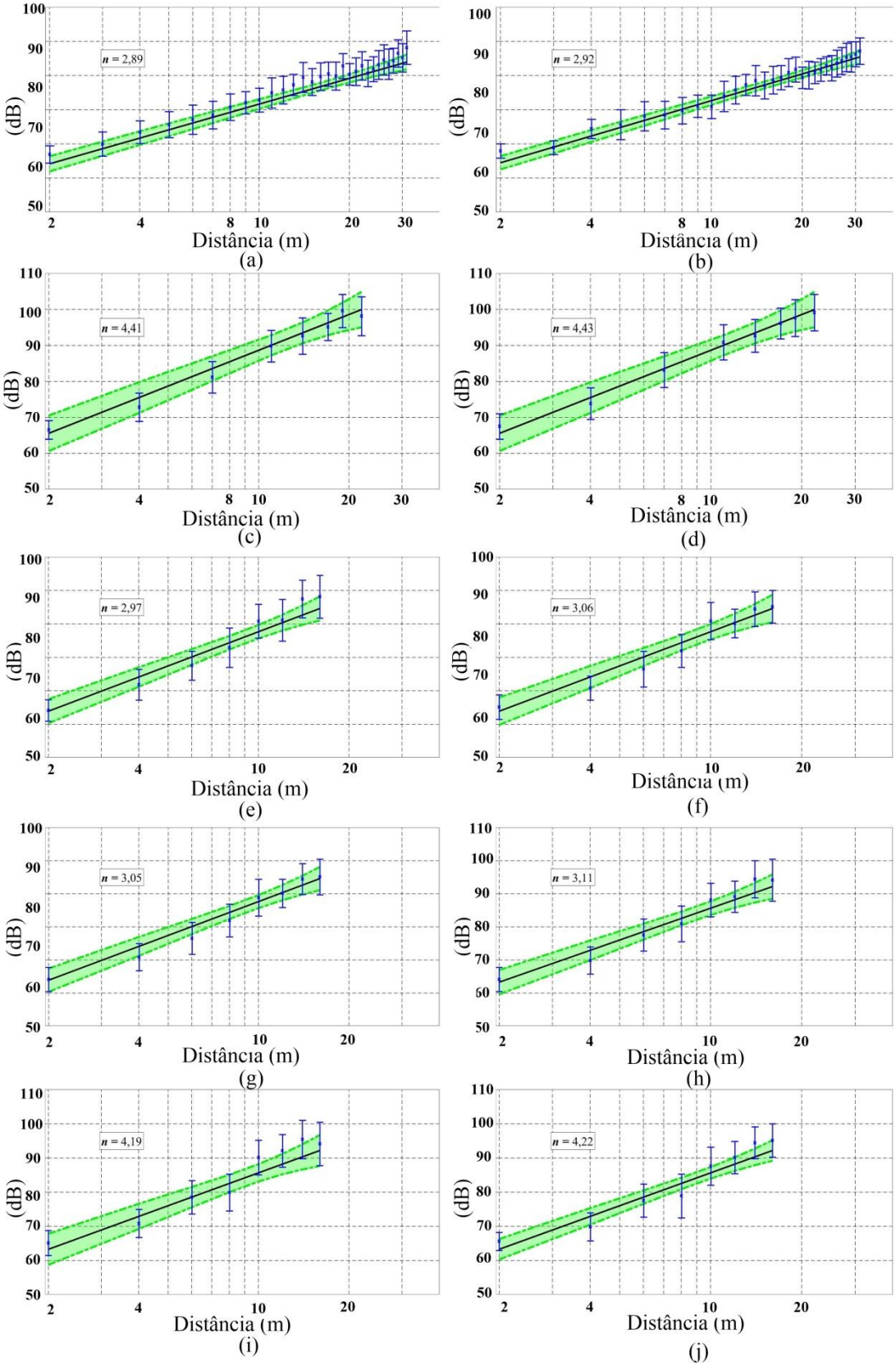


Figura A.8 – *Medições da perda de percurso em 38 GHz com sistema SIMO (com a antena de transmissão SWAA e a recepção com duas antenas cornetas).*

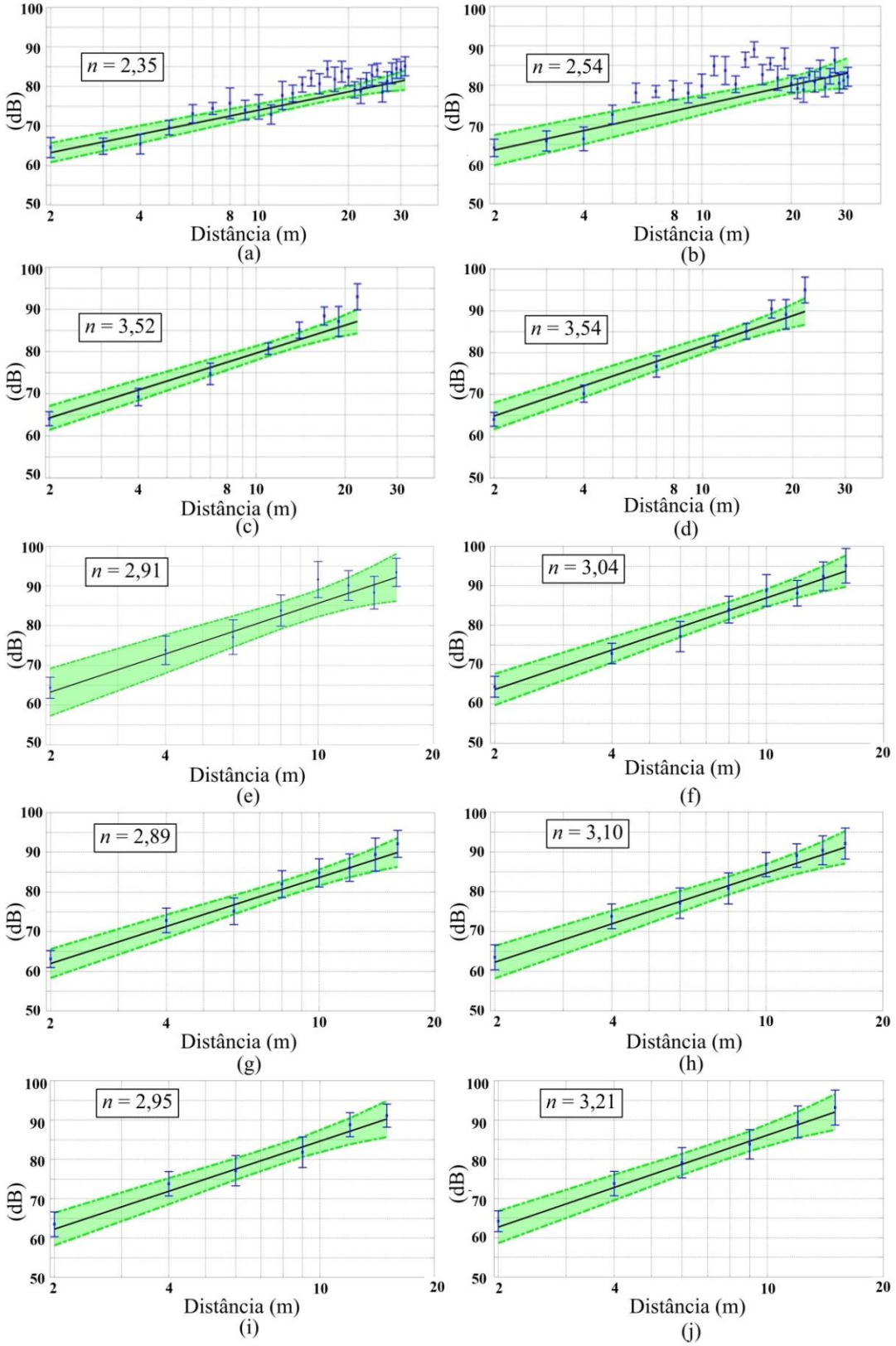


Figura A.9 – *Medições da perda de percurso em 28 GHz com sistema SIMO, (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção.*

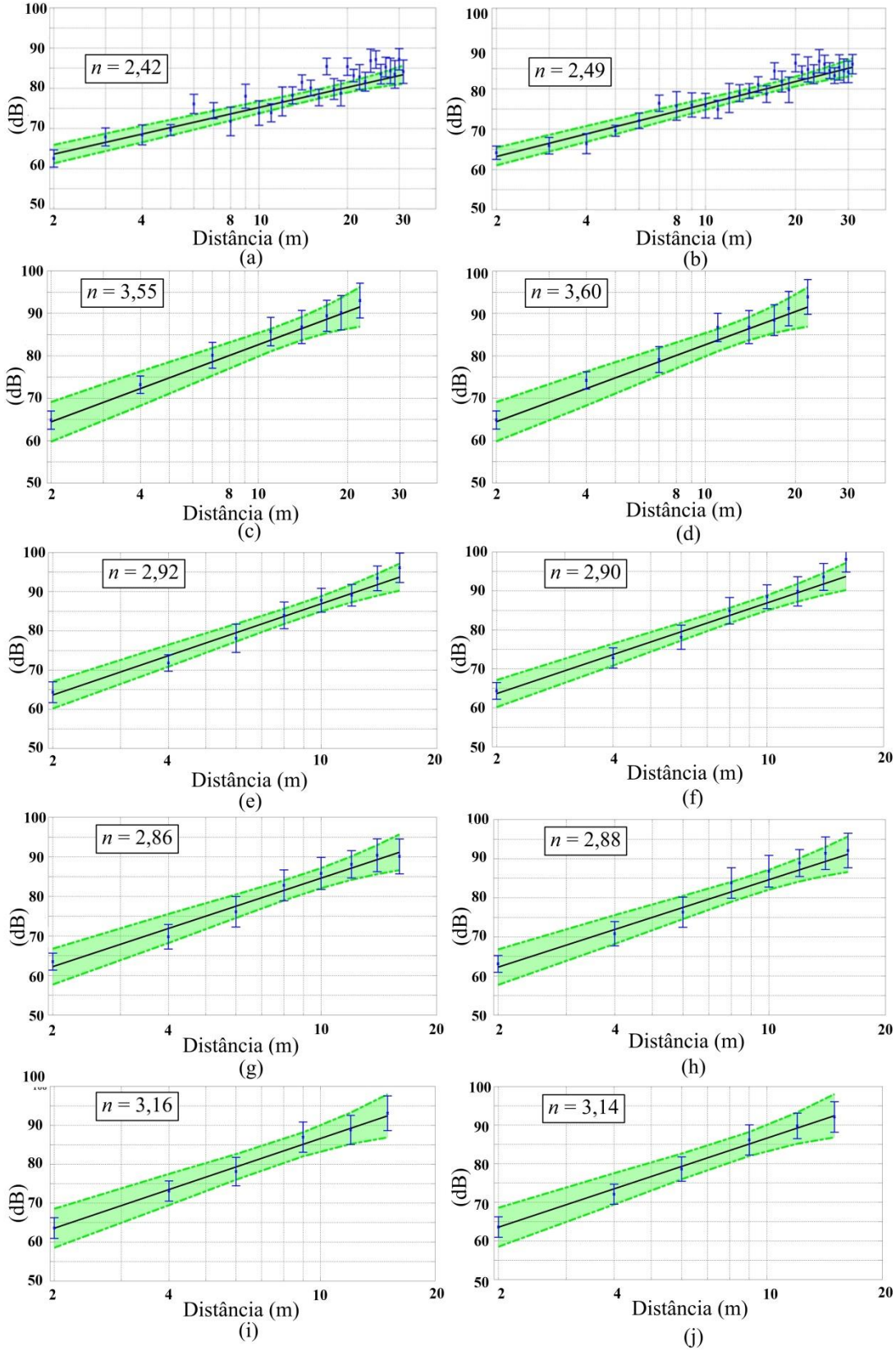


Figura A.10 – *Medições da perda de percurso em 28 GHz com sistema SIMO, (utilizando antenas cornetas de características idênticas na transmissão e recepção).*

Referências Bibliográficas

[1] Cisco Systems Inc., "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021," *White Paper*, Feb. 2017.

[2] ITU-R, " M.2370-0 IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030," 2015.

[3] T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, M. K. Samimi, and S. Sun, "Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design," *IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS*, vol. 63, pp. 3029-3056, Sep. 2015.

[4] X. Pang, et al., "100 Gbit/s hybrid optical fiber-wireless link in the W-band (75–110 GHz)," *Optics Express*, vol. 19, no. 25, pp. 24944-24949, Dec. 2011.

[5] International Telecommunications Union. (2018, Feb.) www.itu.int. [Online]. https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2019/Pages/default.aspx

[6] A. C. S. Jr, "5G, Fotônica de Micro-ondas Aplicada a Redes [Artigo Convidado]," *18 SBMO - Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 13 CBMAG - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, pp. 95-101, Aug. 2018.

[7] J. A. J. Ribeiro, *Propagação das Ondas Eletromagnéticas - Principios e Aplicações*, 2nd ed. São Paulo, Brasil: Érica, 2004.

[8] C. Phillips, D. Sicker, and D. Grunwald, "A Survey of Wireless Path Loss Prediction and Coverage Mapping Methods," *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, vol. 15, no. 1, Feb. 2013.

[9] X. Zhao, Q. Wang, S. Li, M. Wang, and S. Sun, "Wideband Millimeter-Wave Channel Characterization in an Open Office at 26 GHz," *Wireless Pers Commun - Springer*, Aug. 2017.

[10] J. Karjalainen, et al., "Challenges and opportunities of mm-wave

communication in 5G networks," *International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), IEEE*, no. 9, p. 372–376, Jun. 2014.

[11] Y. Azar, et al., "28 GHz Propagation Measurements for Outdoor Cellular Communications Using Steerable Beam Antennas in New York City," *IEEE International Conference on Communications (2013 ICC)*, p. 9–13, Jun. 2013.

[12] T. S. Rappaport , et al., "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!," *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, May 2013.

[13] T. S. Rappaport, et al., "Broadband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Models Using Adaptive-Beam Antennas for Outdoor Urban Cellular Communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 4, pp. 1850-1859, Apr. 2013.

[14] E. Ben-Dor, T. S. Rappapor, Y. Qiao, and S. J. Lauffenburger, "Millimeter-Wave 60 GHz Outdoor and Vehicle AOA Propagation Measurements Using a Broadband Channel Sounder," *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), IEEE*, Jan. 2011.

[15] S. Piersanti , L. A. Annoni , and D. Cassioli, "Millimeter waves channel measurements and path loss models," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Jun. 2012.

[16] K. Haneda , et al., "5G 3GPP-Like Channel Models for Outdoor Urban Microcellular and Macrocellular Environments," *IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, May 2016.

[17] T. S. Rappaport, *Comunicações sem fio*, 2nd ed. São Paulo: Pearson Brasil, 2009.

[18] L. Zhou, et al., "Path loss model based on cluster at 28 GHz in the indoor and outdoor environments," *SCIENCE CHINA Information Sciences (SCIS)*, vol. 60, Aug. 2017.

[19] G. R. MacCartney, S. Deng, S. Sun, and T. S. Rappaport, "Indoor Office Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models at 28 GHz and 73 GHz for Ultra-Dense 5G Wireless Networks," *NYU WIRELESS TR 2015-002 Technical Report*, Oct. 2015.

[20] H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," *Proceedings of the IRE* , vol. 34, no. 5, pp. 254-256, May 1946.

[21] International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU-R), *ITU-R P.525 - Calculation of free-Space Attenuation*. 1978.

[22] J. J. Egli, "Radio Propagation above 40 MC over Irregular Terrain," *Proceedings of the IRE*, vol. 45, no. 10, pp. 1383-1391, Oct. 1957.

[23] O. Y. , O. E. , K. T., and F. K. , "Field strengh and its variability in VHF and UHF land mobile radio service," *Rev .Electr. Commun. Lab.*, vol. 16, p. 825–873, 1968.

[24] E. R., D. J., and G. D.H., "Selection of intermodulation-free frequencies for multiple-channel mobile radio systems," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 116, no. 8, pp. 1311-1318, Aug. 1969.

[25] K. Allsebrook and J. D. Parsons, "Mobile radio propagation in British cities at frequencies in the VHF and UHF bands," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 26, no. 4, pp. 313-323, Nov. 1977.

[26] International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU-R), *ITU-R P.530 - Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*. 1978.

[27] M. Hata, "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services," *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOG*, vol. 29, no. 3, pp. 317-325, Aug. 1980.

[28] H. G.A., L. A.G., and K. W.A. , "A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode," *Technica Report NTIA*, Apr.

1982.

[29] I. Joseph and B. Michael, "Statistical tuning of walfisch-bertoni pathloss prediction model based on building and street geometry sensitivity parameters in built-up terrains," *American Journal of Physics and Applications*, Jun. 2013.

[30] A. J. Motley and J. M. P. Keenan, "Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz," *Electronics Letters IEEE*, vol. 24, no. 12, pp. 763-764, Jun. 1988.

[31] S. R. Saunders and F. R. Bonar, "Explicit multiple building diffraction attenuation function for mobile radio wave propagation," *Electronics Letters IEEE*, vol. 27, pp. 1276-1277, Jul. 1991.

[32] W. Daniel and H. Wong, "Propagation in suburban areas at Miles," *Federal Communications Commission*, Jan. 1991.

[33] D. J. Cichon and T. Kurner, "Digital mobile radio towards future generation systems: Cost 231 final report," *Technical report COST European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research*, 1999.

[34] Ericsson Radio Systems AB, *GSM Cell Planning EN/LZT 123 3315 R3B*. 1999.

[35] V. Erceg, et al., "An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* , vol. 17, no. 7, pp. 1205-1211, Jul. 1999.

[36] L. J. Greenstein and V. Erceg, "Gain reductions due to scatter on wireless paths with directional antennas," *IEEE Communications Letters*, vol. 3, no. 6, pp. 169-171, Jun. 1999.

[37] A. Medeisis and A. Kajackas, "On the use of the universal Okumura-Hata propagation prediction model in rural areas," *Vehicular Technology Conference Proceedings IEEE*, May 2000.

[38] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, *MIMO-OFDM Wireless*

Communications With MatLab, 1st ed., I. Press, Ed. Republic of Korea: John Wiley & Sons, 2010.

[39] International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU-R), *ITU-R P.1546 - Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz*. Geneva, 2001.

[40] International Telecommunication Union - RADIOCOMMUNICATION (ITU-R), *Terrestrial land mobile radiowave propagation in the VHF/UHF bands*. Geneva : Printed in Switzerland, 2002.

[41] D. B. Green and A. S. Obaidat, "An accurate line of sight propagation performance model for ad-hoc 802.11 wireless LAN (WLAN) devices," *IEEE International Conference on Communications, 2002. ICC 2002.* , vol. 5, p. 3424–3428, Aug. 2002.

[42] Electronic Communication Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations - REPORT 33, *The Analysis of the Coexistence of Point-to-Multipoint FWS Cells in the 3.4 - 3.8 GHz Band*. 2003.

[43] M. Riback, J. Medbo, and J. .-E. Berg, "Carrier Frequency Effects on Path Loss," *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring IEEE 63rd*, May 2006.

[44] ITU-R P.452, *Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz*, 16th ed. Geneva, 2015.

[45] EBITG, TUI, UOULU, CU/CRC, NOKIA , "IST-4-027756 WINNER II D1.1.2 V1.2 WINNER II Channel Models," 1.1, 2007.

[46] R. S. de Souza and R. D. Lins, "A new propagation model for 2.4 GHz wireless LAN," *14th Asia-Pacific Conference on Communications, 2008. APCC 2008.* , Oct. 2008.

[47] International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU-R), *ITU-R 1812 - A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands* . Geneva, 2009.

[48] K. T. Herring, J. W. Holloway, D. H. Staelin, and D. W. Bliss, "Path-Loss Characteristics of UrbanWireless Channels," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* , vol. 58, pp. 171-177, Jan. 2010.

[49] M. Ballester, J. J. Giménez, N. Cardona, T. Jansen, and D. M. Rose, "A Multi-Wall Approach for the Indoor Propagation in LTE Femto-cell Scenarios," Feb. 2013.

[50] International Telecommunication Union - Radiocommunication, *ITU-R P.1238 - Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz*. Geneva, 2017.

[51] V. Degli-Esposti, E. M. Vitucci, and R. Martin, "A Simple and Versatile Field Prediction Model for Indoor and Indoor-to-Outdoor Propagation," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 13270-13276, Jun. 2017.

[52] H. Xu, "Terrestrial Radio Wave Propagation at Milimeter-Wave Frequencies," 2000.

[53] F. C. C. .-. FCC. (2018) General Auction Data. [Online]. http://www.fcc.gov/wtb/auctions/

[54] E. T. S. I. .-. ETSI. (2018) Broadband Radio Access Networks. [Online]. http://www.etsi.org/

[55] H. Zhao, et al., "28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York city," *IEEE International Conference on Communications (ICC)* , Jun. 2013.

[56] E. J. Violette , R. H. Espeland , R. O. DeBolt, and F. K. Schwering, "Millimeter-wave propagation at street level in an urban environment," *IEEE*

Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 26, no. 3, pp. 368-380, May 1988.

[57] C. R. Anderson and T. S. Rappaport, "In-Building Wideband Partition Loss Measurements at 2.5 GHz and 60 GHz," *IEEE Transactions on Wireless Communications* , vol. 3, no. 3, pp. 922-928, May 2004.

[58] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge, USA: Cambridge University Press, 2004.

[59] ITU-R Standard P.676-11, "Attenuation by atmospheric gases," 2016.

[60] J. Rodriguez, *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. Wiley, 2015.

[61] ITU-R Standard P.838-3, "Specific Attenuation model for rain for use in prediction methods," 2005.

[62] J. A. J. Ribeiro, *Engenharia de Antenas - Fundamentos, Projetos e Aplicações*, 1st ed. São Paulo: Érica, 2012.

[63] O. L. Unknown, M. J. F. Unknown, and T. S. R. Unknown, "In situ microwave reflection coefficient measurements for smooth and rough exterior wall surfaces," *Vehicular Technology Conference, IEEE*, no. 43, May 1993.

[64] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 15270 - Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria*. 2017.

[65] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão*. 2004.

[66] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 7199, Vidros na construção civil — Projeto, execução e aplicações*. 2016.

[67] J. Lee, M.-D. Kim, J. Liang, J.-J. Park, and B. Park, "Frequency range extension of the ITU-R NLOS path loss models applicable for urban street environments with 28 GHz measurements," *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, vol. 10, Apr. 2016.

[68] J. Wells, "Faster than fiber: The future of multi-G/s wireless," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 10, no. 3, pp. 104-112, May 2009.

[69] G. R. MacCartney, S. Deng, and T. S. Rappaport, "Indoor Office Plan Environment and Layout-Based mmWave Path Loss Models for 28 GHz and 73 GHz," *Vehicular Technology Conference*, no. 83, May 2016.

[70] D. A. Guimarães, *Digital Transmission - A Simulation-Aided Introduction with VisSim/Comm*, 1st ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag , 2009.

[71] J. M. Unknown, R. F. Unknown, N. C. Unknown, and J. G. Unknown, "Effect of Shadowing Correlation Modeling on the System Level Performance of Adaptive Radio Resource Management Techniques," *International Symposium on Wireless Communication Systems IEEE*, no. 2, Dec. 2005.

[72] S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, "Millimeter Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges," *Proceedings of the IEEE*, vol. 3, no. 102, pp. 366-385, Feb. 2014.

[73] G. R. MacCartney, J. Zhang, S. Nie, and T. S. Rappaport, "Path loss models for 5G millimeter wave propagation channels in urban microcells," *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013 IEEE*, Dec. 2013.

[74] S. Nie , G. R. MacCartney, S. Sun, and T. S. Rappaport, "72 GHz millimeter wave indoor measurements for wireless and backhaul communications," *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, no. 24, Sep. 2013.

[75] C. Dehos, J. L. González, A. De Domenico, D. Kténas , and L. Dussopt, "Millimeter-wave access and backhauling: the solution to the exponential data traffic increase in 5G mobile communications systems?," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 9, pp. 88-95, Sep. 2014.

[76] S. Sun , G. R. MacCartney, and T. S. Rappaport, "Millimeter-wave distance-dependent large-scale propagation measurements and path loss models for outdoor and indoor 5G systems," *European Conference on Antennas and*

Propagation (EuCAP) IEEE, no. 10, Apr. 2016.

[77] M. K. Samimi and T. S. Rappaport, "Local Multipath Model Parameters for Generating 5G Millimeter-Wave 3GPP-like Channel Impulse Response," *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) IEEE*, no. 10, Apr. 2016.

[78] F. Khan and Z. Pi, "mmWave mobile broadband (MMB): Unleashing the 3–300GHz spectrum," *Sarnoff Symposium, IEEE*, no. 34, May 2011.

[79] H. Zhao, et al., "28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York city," *International Conference on Communications (ICC), IEEE* , Jun. 2013.

[80] T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, M. K. Samimi, and S. Sun, "Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 9, pp. 3029-3056, Sep. 2015.

[81] M. Gudmundson, "Correlation model for shadow fading in mobile radio," *Electronics Letters*, vol. 27, no. 23, p. 2145–2146, Nov. 1991.

[82] C. A. Balanis, *Antenna Theory - Analysis and Design*, 2nd ed. USA: John Wiley & Sons, 1997.

[83] T. S. Rappaport, *Comunicações sem fio - Princípios e práticas*, 2nd ed. São Paulo, Brasil: Pearson Brasil, 2009.

[84] X. Cai and G. B. Giannakis, "A Two-Dimensional Channel Simulation Model for Shadowing Processes," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 52, no. 6, pp. 1558-1567, Nov. 2003.

[85] Z. P. Farooq Khan, "mmWave Mobile Broadband (MMB): Unleashing the 3-300GHz Spectrum," *Sarnoff Symposium, 34th IEEE*, May 2011.

[86] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, 2nd ed. Chichester ,

UK: Wiley, 2000.

[87] K. Bullington, "Radio Propagation Fundamentals ," *Bell System Tech. J.*, vol. 36, pp. 593-626, May 1957.

[88] N. Amitay, "Modeling and computer simulation of wave propagation in lineal line-of-sight microcells," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. VT-41, no. 4, p. 337–342, Nov. 1992.

[89] J. M. Unknown, R. F. Unknown, N. C. Unknown, and J. G. Unknown, "Effect of Shadowing Correlation Modeling on the System Level Performance of Adaptive Radio Resource Management Techniques," *International Symposium onWireless Communication Systems, IEEE* , no. 2, Sep. 2005.

[90] L. J. G. S. Y. T. S. R. P. A. G. B. K. A. A. J. R. B. V. Erceg, "An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 7, pp. 1205-1211, Jul. 1999.

[91] C. C. Pu , S. Y. Lim, and P. C. Ooi, "Measurement arrangement for the estimation of path loss exponent in wireless sensor network," *International Conference on Computing and Convergence Technology (ICCCT) - IEEE*, Jun. 2013.

[92] Y. Hu and G. Leus, "Self-Estimation of Path-Loss Exponent in Wireless Networks and Applications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology* , vol. 64, no. 11, pp. 5091-5102, Dec. 2014.

[93] M. D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*. London: CRC Press, 1993.

[94] A. J. Goldsmith, L. J. Greenstein, and G. J. Foschini, "Error statistics of real-time power measurements in cellular channels with multipath and shadowing," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 43, no. 3, pp. 439-446, Aug. 1994.

[95] T. S. Rappaport, E. Ben-Dor, J. N. Murdock, and Y. Qiao, "38 GHz and 60 GHz angle-dependent propagation for cellular & peer-to-peer wireless communications," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Nov. 2012 .

[96] S. Galli, "A Novel Approach to the Statistical Modeling of Wireline Channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 5, pp. 1332-1345, May 2011.

[97] R. A. A. de Souza, A. M. O. Ribeiro, and D. A. Guimarães, "On the Efficient Generation of α-κ-μ and α-η-μ White," *International Journal of Antennas and Propagation*, Aug. 2014.

[98] Mathworks. (2016) Matlab R2016a.

[99] S. Sun, et al., "Investigation of Prediction Accuracy, Sensitivity, and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Wireless Communications," *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, vol. 65, no. 5, pp. 2843-2860, May 2016.

[100] E. R., D. J., and G. D.H., "Selection of intermodulation-free frequencies for multiple-channel mobile radio systems," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 116, no. 8, pp. 1311-1318, Aug. 1969.

[101] E. O. T. K. K. F. Y. Okumura, "Field strengh and its variability in VHF and UHF land mobile radio service," *Rev .Electr. Commun. Lab.*, vol. 16, p. 825–873, 1968.

[102] A. G. L. W. A. K. G.A. Hufford, "A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode," *Technica Report NTIA*, Apr. 1982.

[103] Y. Oda, K. Tsunekawa, and M. Hata, "Advanced LOS path-loss model in microcellular mobile communications," *IEEE transactions of vehicular technology*, vol. 49, no. 6, Nov. 2000.

[104] 3GPP, "TR 36.873, V12.1.0 Study on 3D Channel Model for LTE (Rel. 12)," Mar. 2015.

[105] C. Phillips, D. Sicker, and D. Grunwald, "A Survey of Wireless Path Loss Prediction and Coverage Mapping Methods," *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, vol. 15, pp. 255-270, Mar. 2013.

[106] Altair Engineering, Inc. (2017) WinProp for Windows, version 14.1.

[107] A. C. Sodré Jr., I. F. da Costa, R. A. dos Santos, H. R. D. Filgueiras, and D. H. Spadoti, "Waveguide-Based Antenna Arrays for 5G Networks," *International Journal of Antennas and Propagation - IJAP*, vol. 2018, 2018.

[108] A. C. S. Jr., "Antenna Development for 5G Networks [invited Paper]," *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Aug. 2017.

[109] P. Njemcevic and V. Lipovac, "Estimation of radio signal spatial local mean," *International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, no. 24, Sep. 2016.

[110] D. J. Cichon and T. Kurner, "Digital mobile radio towards future generation systems: Cost 231 final report," *Technical report COST European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research*, 1999.

[111] SOONG, T.t.. Fundamentals Of Probability And Statistics For Engineers**.** Singapore: John Wiley & Sons, 2004.