



**Cristine Simões Felisbino**

**Medições de propagação em ambientes fechados nas  
faixas de 28 e 38 GHz para aplicação em sistemas celulares  
de 5ª geração**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2019



**Cristine Simões Felisbino**

**Medições de propagação em ambientes fechados nas  
faixas de 28 e 38 GHz para aplicação em sistemas celulares  
de 5ª geração**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

**Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello**  
**Orientador**

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

**Carlos Eduardo Orihuela Vargas**  
**Co-orientador**

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

**Prof. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos**  
Universidade Federal Fluminense

**Carlos Vinício Rodríguez Ron**  
INMETRO

Rio de Janeiro, 17 de dezembro de 2019.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

### **Cristine Simões Felisbino**

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações na Universidade Estácio de Sá em 2008. É oficial do Corpo de Engenheiros da Marinha com experiência nas áreas de telefonia, radioenlaces terrestres e comunicações interiores de meios navais.

#### Ficha Catalográfica

Felisbino, Cristine Simões

Medições de propagação em ambientes fechados nas faixas de 28 e 38 GHz para aplicação em sistemas celulares de 5ª geração / Cristine Simões Felisbino; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello. – 2019.

90 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2019.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Ondas milimétricas. 3. 28 GHz. 4. 38 GHz. 5. 5 G. 6. Quinta geração. I. Mello, Luiz A. R. da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

A Deus, à minha família e aos amigos queridos,  
meu sincero agradecimento.

## Agradecimentos

A Deus, por me sustentar nos momentos difíceis e por me conceder forças além do meu limite para não desistir, mesmo em convalescência no início do curso.

Aos meus pais, por todo o apoio e o incentivo para perseverar durante todo o mestrado e, acima de tudo, pela compreensão pela minha ausência nos últimos 2 anos.

À minha doce avó, que apesar de sua idade avançada e saúde debilitada, manteve-se firme na torcida pelo sucesso da neta.

Ao meu orientador, Professor Silva Mello, meu profundo e sincero agradecimento pela compreensão diante das dificuldades e por me ajudar a superá-las.

Aos amigos que fiz durante o curso, em especial Dailys Aronde e Laisa Carvalho, que muito me ajudaram no início, e ao Carlos Orihuela, meu sincero agradecimento pelo apoio durante a fase da dissertação.

À Marinha do Brasil, em especial à Diretoria de Comunicações e Tecnologia da Informação (DCTIM), pela oportunidade de realizar o curso.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## Resumo

Felisbino, Cristine Simões; Mello, Luis Alencar da Silva Mello. **Medições de propagação em ambientes fechados nas faixas de 28 e 38 GHz para aplicação em sistemas celulares de 5ª geração.** Rio de Janeiro, 2019. 90p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O uso de dispositivos móveis cresceu exponencialmente nos últimos anos, tornando-se um desafio a melhoria da qualidade de sinal e o pleno atendimento a serviços que exigem altas taxas de dados e baixa latência. A fim de atender a crescente demanda de tráfego, as faixas de frequências de ondas milimétricas começam a ser exploradas para aplicação à 5ª Geração de Comunicações Móveis. A partir de medições realizadas em ambientes fechados, nas faixas de frequências de 28 GHz e 38 GHz, foi possível analisar o canal de comunicação com base nos modelos propagação para as faixas de frequências de ondas milimétricas.

## Palavras-chave

Ondas milimétricas; 28 GHz; 38 GHz; 5 G; Quinta geração; Comunicações Móveis; Propagação em ambientes fechados.

## Abstract

Felisbino, Cristine Simões; Mello, Luis Alencar da Silva Mello (Advisor). **Indoor propagation measurements at 28 and 38 GHz for application in the 5th generation cellular systems.** Rio de Janeiro, 2019. 90p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Mobile usage has grown exponentially in recent years, making it a challenge to improve signal quality and fully support to services that require high data rates and low latency. In order to meet the growing traffic demand, millimeter-wave frequency bands are being explored for application to the 5th Generation of Mobile Communications. From measurements performed in indoor environments, in the 28 GHz and 38 GHz frequency range, it was possible to analyze the communication channel based on the propagation models for the millimeter wave frequency bands.

## Keywords

Millimeter waves; 28 GHz; 38 GHz; 5 G; Fifth generation; Mobile Communications; Propagation in indoor environments.

# Sumário

|   |    |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO  | 16 |
| 1.1. Demanda por novos serviços                               | 16 |
| 1.2. Otimização do uso do espectro de frequências             | 17 |
| 1.3. O que é 5G?  | 18 |
| 1.3.1. A Corrida para a Quinta Geração de Comunicações Móveis | 22 |
| 1.3.2. Padronização   | 24 |
| 1.4. Objetivos  | 25 |
| 1.5. Estrutura do trabalho                                    | 26 |
| 2 ONDAS MILIMÉTRICAS  | 27 |
| 2.1. Propagação das Ondas Milimétricas                        | 27 |
| 2.2. Desafio do Uso das Ondas Milimétricas                    | 29 |
| 2.3. Reflexão e Difração                                      | 31 |
| 2.4. Desvanecimento   | 33 |
| 2.5. Atenuação por Chuva e Absorção por Gases                 | 34 |
| 3 MODELOS DE PROPAGAÇÃO                                       | 38 |
| 3.1. Propagação em Ambientes <i>Outdoor</i>                   | 38 |
| 3.1.1. Modelo 3GPP  | 39 |
| 3.2. Propagação em Ambientes <i>Indoor</i>                    | 42 |
| 3.2.1. Modelo IEEE 802.15.3c                                  | 42 |
| 3.2.2. Modelo IEEE 802.11ad                                   | 50 |
| 4 MEDIÇÕES  | 53 |
| 4.1. Configuração das medições                                | 53 |
| 4.1.1. Cenário 1  | 61 |
| 4.1.2. Cenário 2  | 68 |
| 4.1.3. Cenário 3  | 75 |



|                              |    |
|------------------------------|----|
| 5 CONCLUSÃO                  | 83 |
| 5.1. Conclusões              | 83 |
| 5.2. Trabalhos Futuros       | 85 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 86 |

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1: Número de usuários de <i>smartphones</i> a nível mundial [46]            | 16 |
| Figura 1.2: Espectro de frequências do 5G no mundo [30]                              | 18 |
| Figura 1.3: Evolução das gerações da telefonia móvel celular                         | 19 |
| Figura 1.4: Principais aplicações do 5G [46]   | 20 |
| Figura 1.5: Micro <i>cell</i> , pico <i>cell</i> e macro <i>cell</i>                 | 21 |
| Figura 1.6: Exemplo de uma rede de telefonia móvel celular em ondas milimétricas [1] | 22 |
| Figura 1.7: Categorias das faixas de frequências 5G e o alcance de área de cobertura | 23 |
| Figura 1.8: Atribuição de Faixas de Frequências no Brasil [17]                       | 24 |
| Figura 1.9: 3GPP 5G Roadmap [27]   | 25 |
| Figura 2.1: Exemplo de antenas MIMO com recurso <i>Beamforming</i> [21]              | 28 |
| Figura 2.2: Propagação do sinal com componentes por multipercurso                    | 34 |
| Figura 2.3: Perda por absorção atmosférica [1 ] [10].                                | 35 |
| Figura 2.4: Atenuação por absorção atmosférica no nível do mar [1]                   | 36 |
| Figura 2.5: Atenuação por chuva [1] [2]  | 37 |
| Figura 4.1: <i>Print</i> de uma medição registrada pelo Labview                      | 56 |
| Figura 4.2: Configuração dos 3 cenários  | 57 |
| Figura 4.3: Diagrama esquemático   | 58 |
| Figura 4.4: Medição das perdas dos cabos e conectores                                | 60 |
| Figura 4.5: Configuração do Cenário 1  | 61 |
| Figura 4.6: (A) Antena transmissora; (B) antena receptora posicionada no ponto 3     | 62 |
| Figura 4.7: Resposta impulsiva do canal na faixa de frequência de 28 GHz             | 63 |
| Figura 4.8: Resposta impulsiva do canal na faixa de frequência de 38 GHz             | 63 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.9: Propagação do sinal por multipercurso dos enlaces do cenário 1                           | 64 |
| Figura 4.10: PL (medido) x distância para $f = 28$ GHz e $f = 38$ GHz                                | 65 |
| Figura 4.11: PL (CI) x distância para $f = 28$ GHz e $f = 38$ GHz                                    | 66 |
| Figura 4.12: PL(medido), PL ( $\alpha, \beta$ ), PL(CI) e FSPL, para a faixa de frequência de 28 GHz | 67 |
| Figura 4.13: PL(medido), PL ( $\alpha, \beta$ ), PL(CI) e FSPL, para a faixa de frequência de 38 GHz | 68 |
| Figura 4.14: Antena receptora posicionada na sala 2  | 69 |
| Figura 4.15: Configuração cenário 2  | 70 |
| Figura 4.16: PL(medido)x PL(CI) - $f = 28$ GHz   | 74 |
| Figura 4.17: Configuração do Cenário 3   | 76 |
| Figura 4.18: Alinhamento das antenas transmissora e receptora do cenário 3                           | 77 |
| Figura 5.10: (A) Antena transmissora. (B) Enlace entre o corredor e a sala 1, com a porta aberta     | 78 |
| Figura 4.20: Detalhe do cenário 3 para o enlace entre TX e RX3                                       | 78 |

## Lista de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1: Comparação da refletividade em diferentes materiais na faixa de frequência de 28 GHz [1][2][9].                      | 32 |
| Tabela 2.2: Perda por penetração em diferentes ambientes na faixa de frequência de 28 GHz [1] [2] [9].                           | 32 |
| Tabela 3.1: Modelos de perda de propagação para ambiente <i>outdoor</i> para $f = 28$ GHz [1] [13].                              | 40 |
| Tabela 3.2: Modelos de canal (MCX) IEEE 802.15.3c para vários ambientes <i>indoor</i> [1] [6].                                   | 45 |
| Tabela 3.3: Valores de $PL_0$ para modelos de canais em 60 GHz [1] [27].   | 45 |
| Tabela 3.4: Parâmetros chave dos modelos de canal 802.15.3c e 802.11ad [1].  | 46 |
| Tabela 3.5: Parâmetros usados nos MC1 e MC2 para o ambiente Residencial [1] [6].   | 47 |
| Tabela 3.6: Parâmetros usados nos MC3 e MC4 para o ambiente Escritório [1] [6].  | 48 |
| Tabela 3.7: Parâmetros usados nos MC5 e MC6 para o ambiente Biblioteca [1] [6].  | 48 |
| Tabela 3.8: Parâmetros usados nos MC7 e MC8 para o ambiente Mesa de Trabalho [1] [6].  | 49 |
| Tabela 3.9: Parâmetros usados no MC9 para o ambiente Quiosque [1] [6].   | 49 |
| Tabela 3.10: Parâmetros chave para o ambiente "Sala de Conferência" para o modelo de canal IEEE 802.11 ad [1] [13]               | 51 |
| Tabela 3.11: Número médio de <i>clusters</i> para o modelo de canal IEEE 802.11ad para o ambiente "Sala de Conferência" [1] [13] | 51 |
| Tabela 4.1: Relação dos equipamentos e instrumentos de medição   | 54 |
| Tabela 4.2: Potência recebida LOS e NLOS x distância   | 62 |
| Tabela 4.3: Perda de propagação x distância - cenário 1  | 64 |
| Tabela 4.4: Valores da perda de propagação – medido, FS, modelo CI e modelo $\alpha\beta$ .                                      | 68 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 4.5: Potência recebida x n° de paredes  | 71 |
| Tabela 4.6: Perda no espaço livre e potência recebida - cenário 2  | 72 |
| Tabela 4.7: Perda de propagação x n° de paredes - cenário 2  | 73 |
| Tabela 4.8: Perda de propagação modelo CI x n° de paredes - cenário 2                                      | 74 |
| Tabela 4.9: Potência recebida do cenário 3 x n° de paredes   | 76 |
| Tabela 4.10: Perda no espaço livre x potência recebida - enlace TX-RX3 do cenário 3                        | 79 |
| Tabela 4.11: Perda de propagação x obstáculos - cenário 3  | 79 |
| Tabela 4.12: Perda de propagação (medido), perda de penetração e fator de perda de propagação do cenário 3 | 81 |
| Tabela 4.13: Cenário 2 x Cenário 3   | 81 |

## Lista de Siglas

3GPP – *3rd Generation Partnership Project* (Projeto de Parceria da 3ª Geração)

5G NR – *5G New Radio*

5GPP – *5G Public-Private Partnership* (Parceria Pública-Privada da 5ª Geração)

Anatel – Agência Nacional de Telecomunicações

AOA – *Angle of Arrival* (Ângulo de chegada/recepção)

AOD – *Angle of Departure* (Ângulo de partida/transmissão)

BER – *Bit error Ratio* (Taxa de erro de bit)

CIR – *Channel Impulse Response* (Resposta Impulsiva do Canal)

D2D – *Device to Device*

ECC – *Electronic Communications Committee* (Comitê de Comunicações Eletrônicas)

ECL – *Excess Channel Loss* (Perda Excessiva do Canal)

EHF – *Extremely High Frequency* (Frequência Extremamente Alta)

EIRP – *Effective Isotropic Radiated Power* (Potência Efetiva Isotropicamente Irradiada)

eMBB – *enhanced Mobile Broadband* (Banda Larga Móvel aprimorada)

FSL – *Free Space Loss* (Perda no Espaço Livre)

GSMA – *Global System Mobile Association* (Associação Global de Sistema de Comunicações Móveis)

IETF – *Internet Engineering Task Force* (Força Tarefa da Engenharia da Internet)

IoT – *Internet of Things* (Internet das coisas)

ITU – *International Telecommunication Union* (União Internacional de Telecomunicações - UIT)

LOS – *Line of Sight* (Linha de Visada)

LTE – *Long Term Evolution*

MAA – *Modular Antenna Array* (Conjunto de Antenas Modulares)

MCSC – *Millimeter Wave Capable Small Cells* (Pequenas células aptas a ondas milimétricas)

MIMO – *Multiple-input and multiple-output* (Múltiplas entradas e múltiplas saídas)

NLOS – *NonLine of Sight* (Sem linha de visada)

MTC – *MetroTech Center*

OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais)

ORH – *Othmer Residence Hall*

RMS – *Root Mean Square* (Raizquadrada media ou média quadrática)

SC-FDE – *Single-Carrier Frequency Domain Equalization* (Equalização no domínio da frequência de Portadora Única).

SNR – *Signal-to-Noise Ratio*(Relação Sinal-Ruído)

STA-STA – *Station to Station* (Estação à Estação)

STA-AP – *Station to Point of Access* (Estação ao Ponto de Acesso)

WLAN – *Wireless Local Area Network* (Rede Local Sem Fio)

WPAN – *Wireless Personal Area Network* (Rede Pessoal Sem Fio)

WWH – *Warren Weaver Hall*

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Demanda por novos serviços

Com a contínua demanda por novos serviços na área de comunicações sem fio e a escassez de faixas de frequência disponíveis do espectro de frequências, tornou-se um desafio, e ao mesmo tempo uma necessidade, a busca por novas tecnologias e a evolução dos atuais sistemas de comunicações móveis.

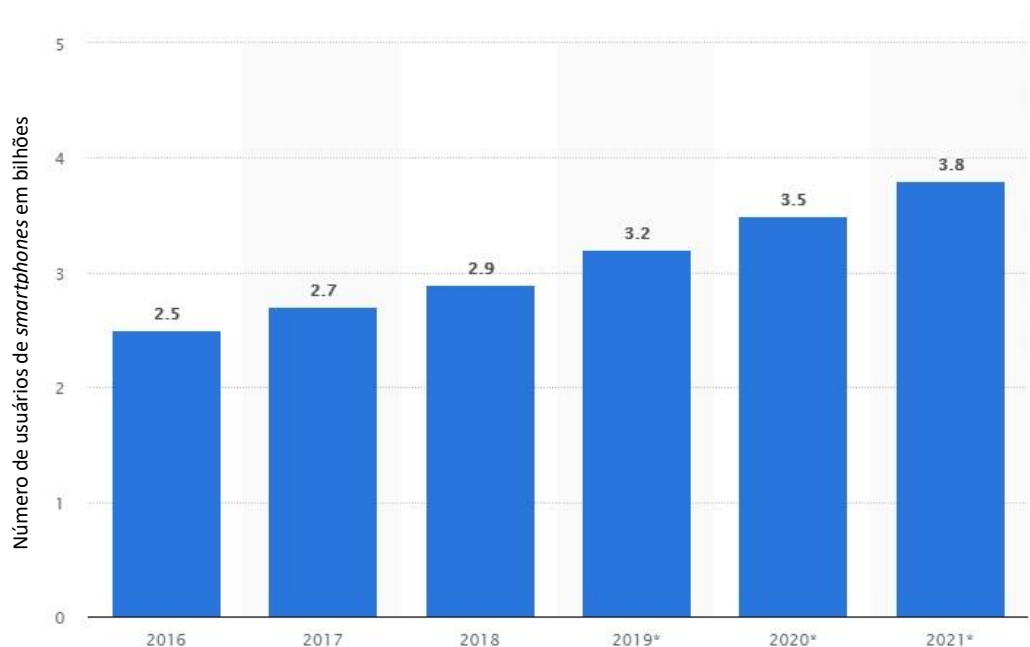


Figura 1.1: Número de usuários de *smartphones* a nível mundial [46]

De acordo com a GSMA (*Global Sytem Mobile Association*) [24], 9 bilhões de dispositivos móveis estarão, brevemente, conectados no mundo todo, superando a população mundial acima de 7 bilhões; não na proporção 1:1, estima-se que em torno de 66% deste número corresponde a um telefone celular ou *smartphone*. A expectativa é que haja um aumento crescente, de forma gradual, até 2025, com a entrada do 5G em vários países. Somado ao crescente número de aparelhos móveis, diversos tipos de informação trafegam simultaneamente: voz,



dados, vídeo, imagem. E cada vez mais, outros serviços são agregados, como streaming, vídeo-chamadas, entre outros.

Nos últimos anos, observou-se a seguinte mudança de cenário: aparelhos telefônicos celulares e *smartphones* deixaram de ser necessidade primária para comunicação e tornaram-se uma ferramenta para execução de tarefas rotineiras, como pagamento de contas e envio de e-mails. O que antes era um meio de chamadas de voz, hoje, é uma porta de acesso a internet e um espelho dos serviços realizados em computadores e notebooks, através de redes cabeadas ou sem fio e provedores de internet. Ademais, muitos dos serviços realizados via internet estão migrando para as redes sociais. Milhões de pessoas estão conectadas neste momento, trocando mensagens, enviando fotos, baixando vídeos, seja de um meio de transporte, andando na rua, seja de suas casas. Aqui, entra mais um desafio: a mobilidade associada à alta taxa de dados para que tudo isso seja possível.

## **1.2. Otimização do uso do espectro de frequências**

Somado ao fato da crescente demanda de tráfego, novas faixas de frequências, mais altas, começam a ser exploradas. Um dos maiores desafios para a implantação da 5ª geração de comunicações móveis é a disponibilidade de faixas de frequências do espectro de frequências.

Parte do espectro, hoje ocupado pela TV analógica, poderá ser reutilizada para a 5ª Geração. Desta forma, busca-se uma otimização do uso das faixas disponíveis; até então, não foi explorada a faixa de frequências altas, que corresponde às faixas de ondas milimétricas. Atribuía-se a este fato a falta de conhecimento em rádio propagação nesta faixa, antenas adequadas, circuitos e redes.

O uso da faixa de ondas milimétricas de 30 a 300 GHz [1] irá permitir um aumento da largura de banda devido à elevada disponibilidade espectral, conseqüentemente, um aumento considerável da taxa de dados e menor latência, que irão atender os requisitos dos novos serviços.

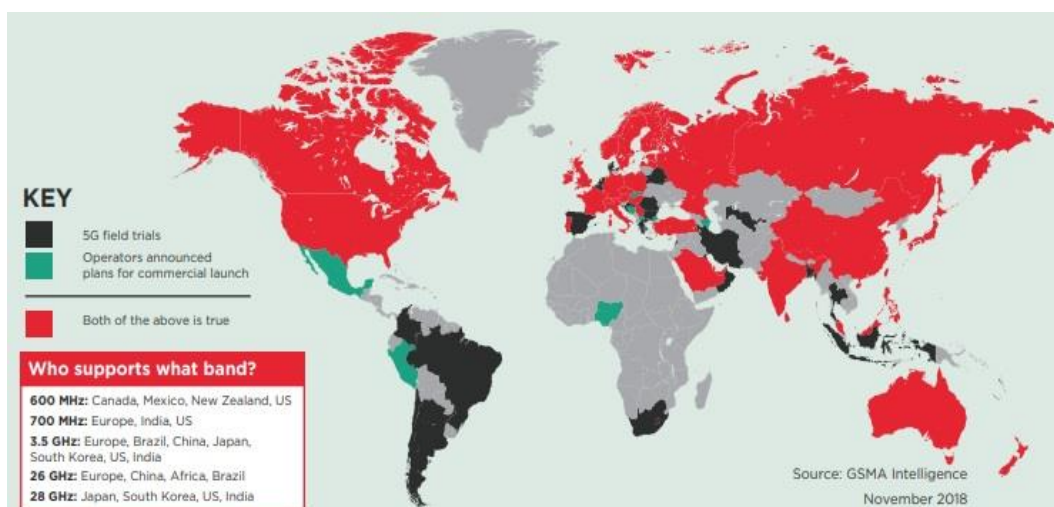


Figura 1.2: Espectro de frequências do 5G no mundo [30]

Apesar das ondas milimétricas serem mais susceptíveis a perdas, como a atenuação por absorção atmosférica, o uso de antenas diretivas, assim como novos arranjos de antenas, técnicas de modulação e redução da área de cobertura (tamanho da célula) irão possibilitar a transmissão e recepção de sinais nas faixas de frequências de ondas milimétricas.

Ressalta-se que a definição dos modelos de canal específicos para as faixas de frequências de ondas milimétricas irá permitir a otimização do desempenho dos novos sistemas nas faixas de frequências de ondas milimétricas.

### 1.3. O que é 5G?

Como já foi mencionado anteriormente, a demanda por novos serviços e a escassez de faixas de frequências disponíveis do espectro de frequências se tornaram um combustível para a busca por sistemas que atendam as novas necessidades de altas taxas de velocidade, menor latência, Internet das Coisas (IoT), além de inúmeros serviços.

Para atender essas novas demandas, será necessária a alocação de maior largura de banda e revisão do espectro finito de frequências, além da padronização dos novos sistemas em 5G [31].

A primeira geração de telefonia móvel celular permitia somente chamadas de voz. A partir da terceira geração, foi possível o acesso à internet a partir de dispositivos móveis. Com a chegada dos *smartphones* e da quarta geração, novos serviços com acesso a dados foram agregados à funcionalidade básica de chamadas de voz [29].

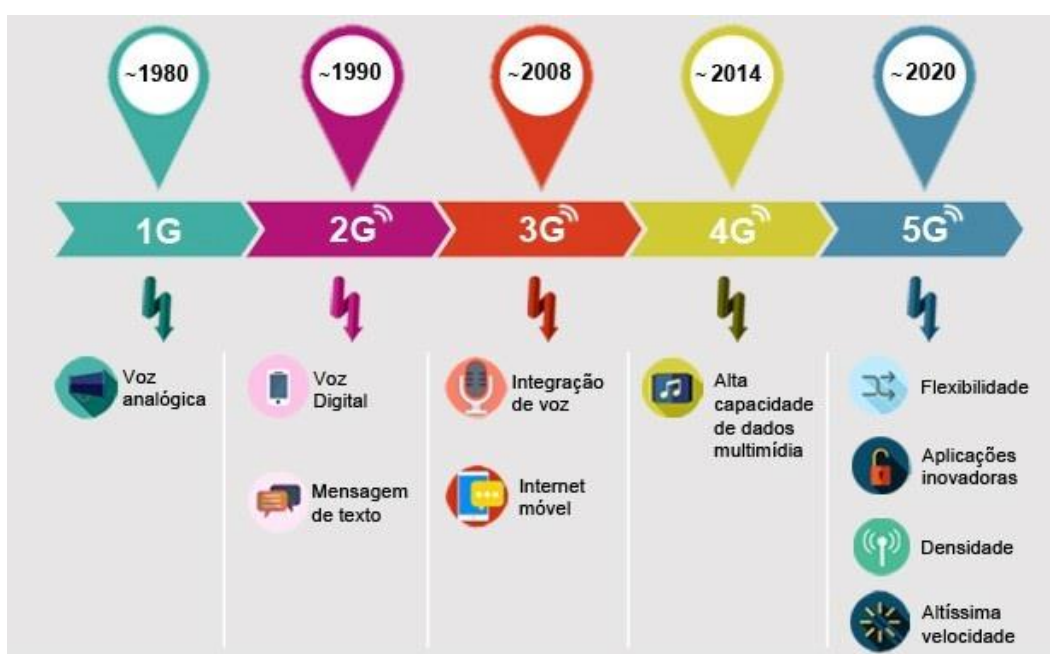


Figura 1.3: Evolução das gerações da telefonia móvel celular

A quinta geração de Comunicações Móveis é mais do que um salto em relação à quarta geração, segundo as palavras de Mats Granyard, Diretor da GSMA [25], representa uma transformação da forma como a telefonia móvel é utilizada pela sociedade.

O uso do 5G vai muito além da telefonia móvel e redes de dados móveis. Uma das maiores expectativas é que o 5G irá permitir o desenvolvimento da IoT com todas as suas funcionalidades e da banda larga móvel de alta capacidade e alta performance (eMBB – *Enhanced Mobile Broadband*), além de alavancar a

automação industrial com o fomento da Indústria 4.0, tornar realidade o uso de veículos autônomos e *Smart Grid*<sup>1</sup>[37].

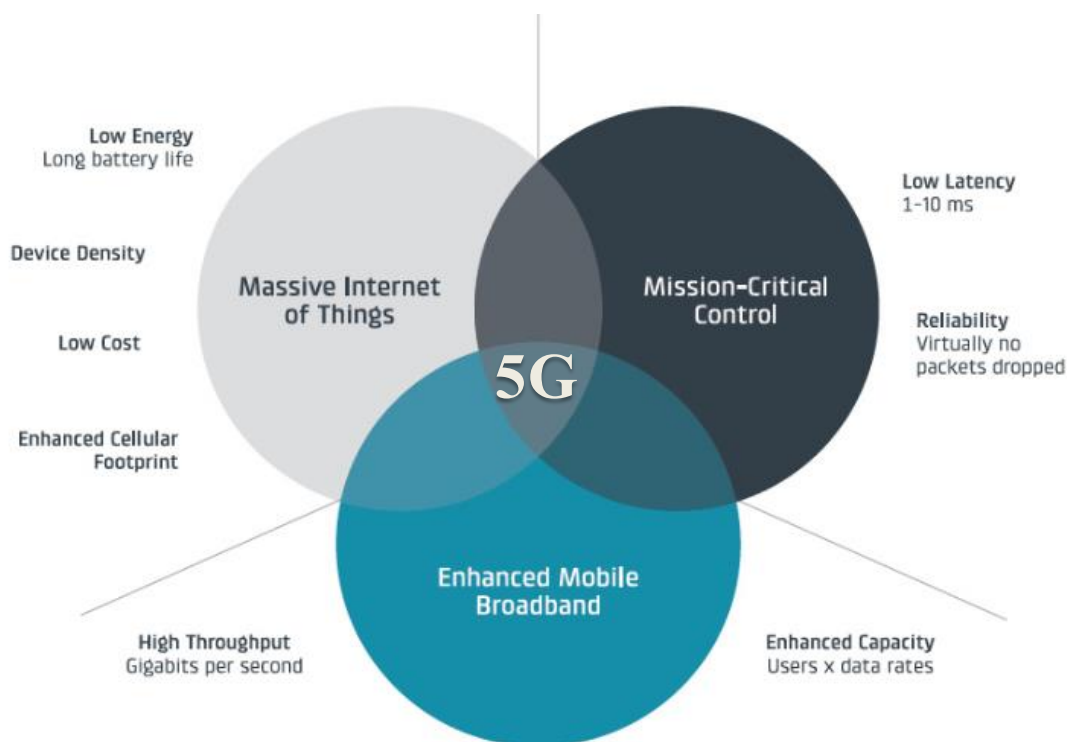


Figura 1.4: Principais aplicações do 5G [46]

A mudança gradual da quarta para a quinta geração irá ocorrer com o alcance de maiores taxas de velocidade e a redução da latência. Estes são os principais desafios do 5G: fornecer banda larga, confiável e segura, com taxas de velocidade acima de 1 Gbps e latência inferior a 10 ms [29].

Além do uso de novas faixas de frequências, será necessária também, uma readequação da topologia de rede dos sistemas de comunicações móveis. Novas estruturas baseadas em redes heterogêneas permitirão a integração da telefonia móvel celular, em ambientes *indoor* e *outdoor*, com redes via Wi-fi, fibra óptica e D2D (*Device to device*).

A tendência, a fim de reduzir perdas, é a redução do tamanho das células, permitindo o reuso das frequências e, conseqüentemente, será possível reduzir o custo das estações.

<sup>1</sup> Termo usado para redes elétricas inteligentes.

Adicionalmente, a estrutura de enormes torres de antenas para grandes áreas de cobertura será substituída por conjuntos de antenas (*antenn arrays*), com cobertura em áreas menores (*small cells* e *pico cells*), que permitirão a propagação em frequências mais altas (faixas de frequências de ondas milimétricas).

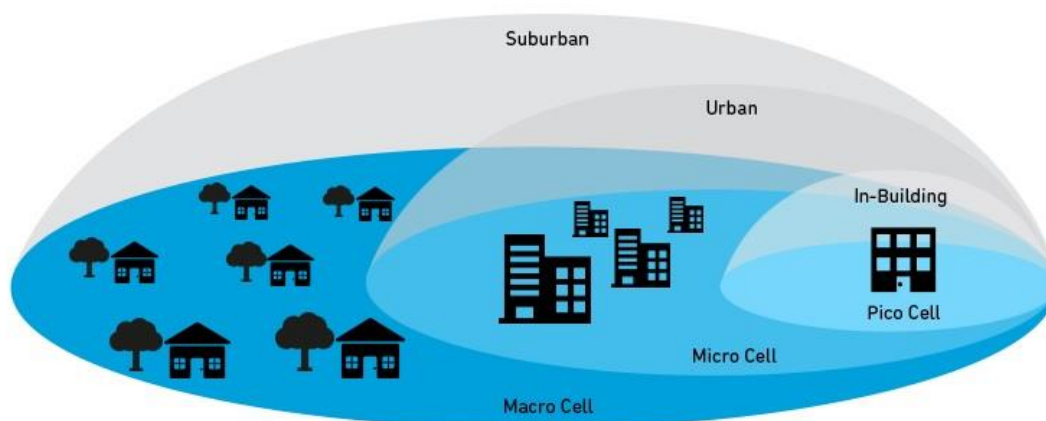


Figura 1.5: Micro cell, pico cell em macro cell

Os sistemas móveis celulares em ondas milimétricas podem fazer uso de frequências em microondas, implementando o conceito de “células fantasmas”, onde a informação de controle é enviada pelas frequências de microondas e dados, pelas frequências de ondas milimétricas, quando possível. A tendência é que novos sistemas sejam integrados aos que já estão implementados, constituindo sistemas híbridos, permitindo a coexistência das estruturas existentes, principalmente, a estrutura do 4G, que ainda se encontra em desenvolvimento em alguns países.

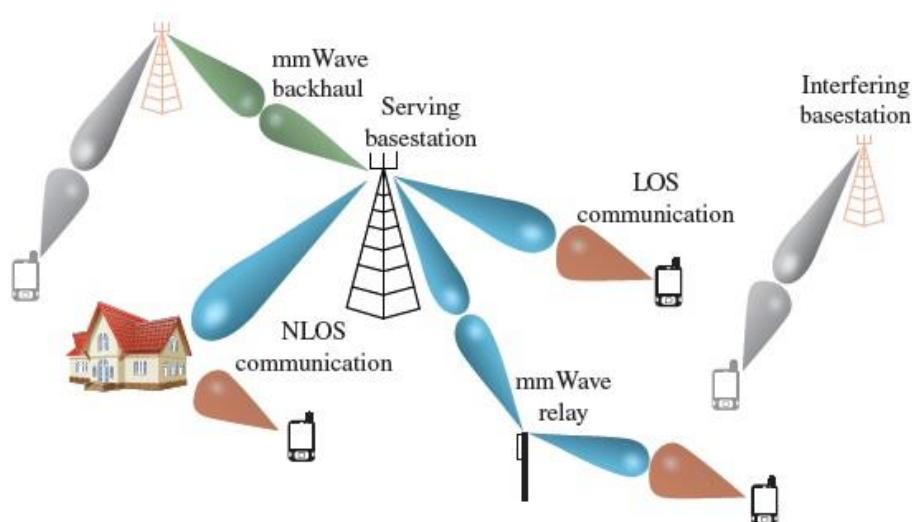


Figura 1.6: Exemplo de uma rede de telefonia móvel celular em ondas milimétricas [1]

Complementarmente, as Estações Base deverão estar preparadas para atender diferentes estruturas de rede e diferentes características, segmentando em *sites* para atender diferentes serviços: 3G, 4G, LTE-A e 5G. Assim, novas estruturas irão permitir a redução de custo por estação base com o crescimento da distribuição em áreas urbanas [2] [28].

### 1.3.1. A Corrida para a Quinta Geração de Comunicações Móveis

O processo regulatório do espectro de frequências a nível global ainda encontra-se em análise. A faixa de 60 GHz (não licenciada) oferece de 10 a 100 vezes mais banda do que redes sem fio locais. Nas faixas de frequências de 28 GHz, 38 GHz e 72 GHz, há uma expectativa de uso de 20 GHz do espectro para telefonia móvel celular e WLAN (*Wireless Local Area Network* – Rede Local Sem Fio). Acima de 100 GHz, muitos países ainda não regulamentaram o uso do espectro de frequências. Estima-se que muitos GHz serão destinados para as faixas acima de 70 GHz, a *E-Band* (*EHF Band*).

Houve um consenso por parte de organizações em relação à adoção da faixa de 3,5 GHz como alavanca na corrida do 5G, permitindo a harmonização e a

coexistência dos sistemas atuais em faixas próximas, enquanto que a operação em faixas mais altas exigiria maiores investimentos em infra-estrutura e desenvolvimento de novos equipamentos e dispositivos móveis [36].

Nesse contexto, o espectro de frequências do 5 G foi dividido em 3 blocos: “sub-1 GHz”, “1-6 GHz” e “Above6 GHz”. O bloco “sub-1 GHz” contempla a faixa 700 MHz; o bloco “1-6 GHz” agrupa as frequências mais baixas: 2,3 GHz, 3,5 GHz, 5 GHz; e o bloco “Above6GHz”, as frequências mais altas: 26 GHz, 28 GHz, 38 GHz, 40 GHz, 60 GHz, 72 GHz, que compreendem as ondas milimétricas [30] [36].

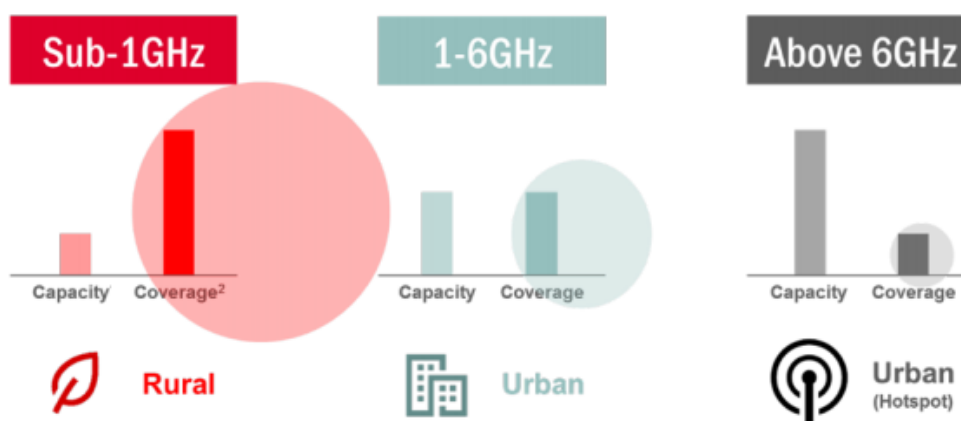


Figura 1.7: Categorias das faixas de frequências 5G e o alcance de área de cobertura

As faixas de frequências adotadas para a próxima geração de comunicações móveis no Brasil são 700 MHz; 2,3 GHz; 3,5 GHz; 26 GHz e 40 GHz. Assim como em outros países, a faixa de 3,5 GHz serviria como porta de entrada para o 5G, porém alguns entraves vêm atrasando a implementação no país. O principal é a interferência causada pelos sistemas de comunicações via satélite que operam na Banda C (entre 3,625 GHz e 6,425 GHz) [19]. Ademais, a interferência com as faixas do Serviço Fixo por Satélite (27,9 GHz a 28,4 GHz) motivou a adoção da faixa de frequência de 26 GHz em detrimento da faixa de 28 GHz.



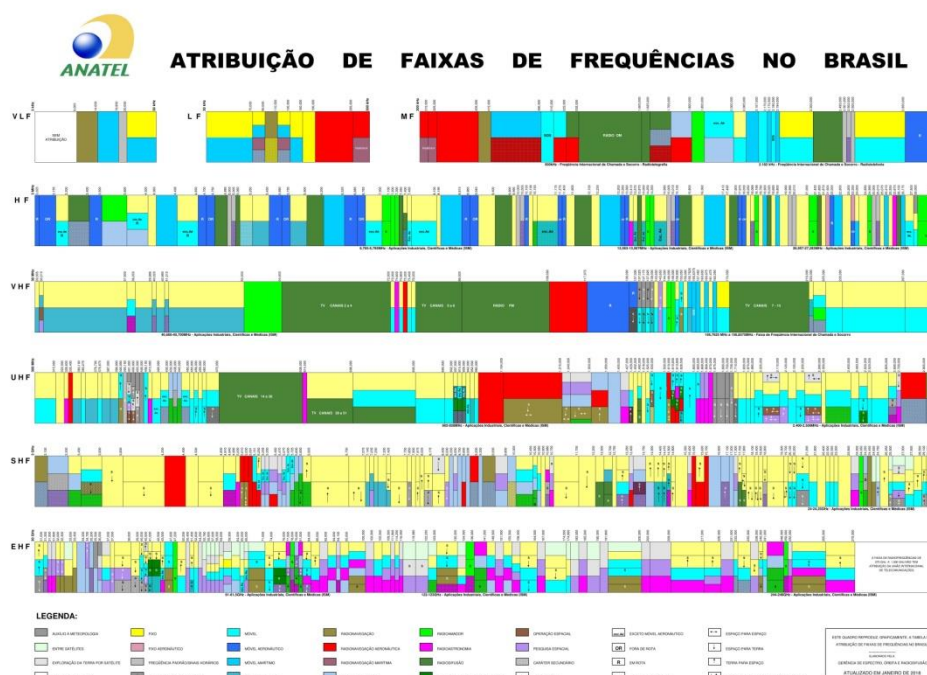


Figura 1.8: Atribuição de Faixas de Frequências no Brasil [17]

### 1.3.2. Padronização

Algumas empresas como Cisco, Ericsson, Intel, LG, Nokia, Qualcomm e Samsung tem investido em pesquisas de forma a preparar seus portfólios de produtos com a chegada do 5G [27].

Entretanto, faz-se necessário uma uniformização (padronização) dos parâmetros, funcionalidades e recursos para implementação da nova geração de Comunicações Móveis.

As principais organizações comprometidas no desenvolvimento das especificações técnicas do 5G são 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), ITU (*International Telecommunication Union* - União Internacional de Telecomunicações - UIT), IETF (*Internet Engineering Task Force*), sendo esta uma organização aberta [31]. Em 2017, o *Release15* [23] [3] [31], ou Fase 1, desenvolvido pela 3GPP, esboçava um conjunto de métricas a fim de orientar as pesquisas do 5G, além do início do desenvolvimento do 5GNR (*5G New Radio*), incluindo as definições das faixas de frequência, protocolos e arquitetura rádio,



confiabilidade, latência e eMBB. A previsão é que o Release 17 esteja disponível em 2021. Novas versões serão desenvolvidas e expandidas a fim de atender novos requisitos.

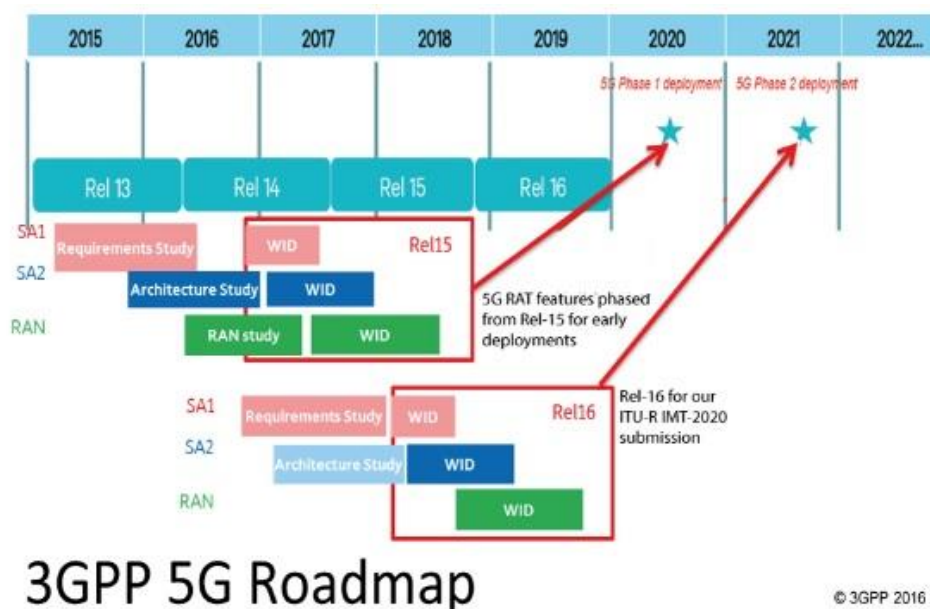


Figura 1.9: 3GPP 5G Roadmap [27]

O IETF está contribuindo com as especificações de funções para virtualização de redes, com a evolução de protocolos IP, que permitirá a vinculação de componentes virtualizados da arquitetura 5G (estação base, *gateway* de serviço e *gateway* de pacotes de dados) em um único caminho [31]. Ademais, o IETF, juntamente com a 3GPP, busca o desenvolvimento de novas aplicações das tecnologias existentes.

## 1.4. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo a cerca do canal de comunicação nas faixas de frequências de ondas milimétricas.

Com base em medições, será possível comparar os resultados com os modelos de propagação existentes e, a partir destes, fazer uma análise da aplicabilidade destes modelos.

As medições em ambientes *indoor*, nas faixas de frequências de 28 GHz e 38 GHz permitiram analisar o canal de comunicação nas faixas de frequências de ondas milimétricas.

### 1.5. Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em quatro capítulos: Ondas Milimétricas, Modelos de Propagação, Medições e Conclusões.

No segundo capítulo, são abordadas as principais características de propagação das ondas milimétricas. Adicionalmente, serão abordados os fenômenos aos quais o canal de propagação das ondas milimétricas está sujeito, como desvanecimento em pequena escala e larga escala, reflexão e difração, além dos principais desafios do uso das ondas milimétricas e a atenuação por chuva e absorção por gases.

No terceiro capítulo, serão apresentados os modelos de propagação em ambientes *outdoor* e *indoor* para as ondas milimétricas

No quarto capítulo, serão apresentadas as medições reais em ambiente *indoor*, em diferentes cenários, nas faixas de frequências de 28 GHz e 38 GHz. Complementarmente, será feita uma análise comparativa dos resultados das medições com os modelos de propagação adequados aos cenários propostos.

Por fim, no capítulo 6, serão apresentadas as conclusões e as sugestões para futuros trabalhos na área de comunicações móveis nas faixas de frequências de ondas milimétricas.

## 2. ONDAS MILIMÉTRICAS

A implementação da Quinta Geração de Comunicações Móveis será fundamental para a extensão do uso da banda larga em sistemas sem fio, aumentando a oferta de acesso à internet, com alta qualidade, baixa latência e maior velocidade.

Muitos estudos estão sendo conduzidos nas faixas de 26-28 GHz, 38-40 GHz, 60 GHz e 72 GHz. Espera-se que WLAN na faixa de 60 GHz, faixa não licenciada e utilizada como base para muitas pesquisas e estudos, WPAN (*Wireless Personal Area Network* – Rede Pessoal Sem Fio), *backhaul* e sistemas celulares em ondas milimétricas, que representam as versões iniciais da próxima geração de sistemas em ondas milimétricas, irão suportar larguras de banda ainda maiores e mais avanços em conectividade serão alcançados.

Ressalta-se que maiores larguras de banda disponíveis irão permitir maiores taxas de dados, ao passo que fornece mais recursos para serem compartilhados entre múltiplos usuários.

### 2.1. Propagação das Ondas Milimétricas

O canal de propagação em frequências de ondas milimétricas é mais suscetível a perdas devido aos efeitos atmosféricos e climáticos, além da refletividade de objetos comuns e das condições do ambiente e do meio de propagação.

Adicionalmente, a complexidade e as perdas previstas em ondas milimétricas irão demandar novas técnicas de detecção de pacote e de estimação de canal.

São esperadas muitas outras inovações a fim de atender os requisitos de estruturas de antenas com tecnologia MIMO que trabalhem tanto em canais NLOS como LOS, a fim de elevar as taxas de dados.

As antenas MIMO [1] [35] [21] [22] são amplamente utilizadas em sistemas de comunicações sem fio que utilizam os padrões IEEE 802.11n, 3GPP, LTE e 3GPP *LTE-Advanced*.

A diversidade é usada para fornecer maior confiabilidade ao enviar informações através das antenas. O recurso *beamforming* é usado para adaptar a forma dos conjuntos de antenas de transmissão e recepção para melhorar a comunicação, como por exemplo, ganho de diversidade. Para a transmissão e recepção em ondas milimétricas, o uso de *beamforming* híbrido é mais vantajoso, pois apresenta maior eficiência espectral em comparação ao digital, com o uso de equipamentos de menor complexidade e custo.

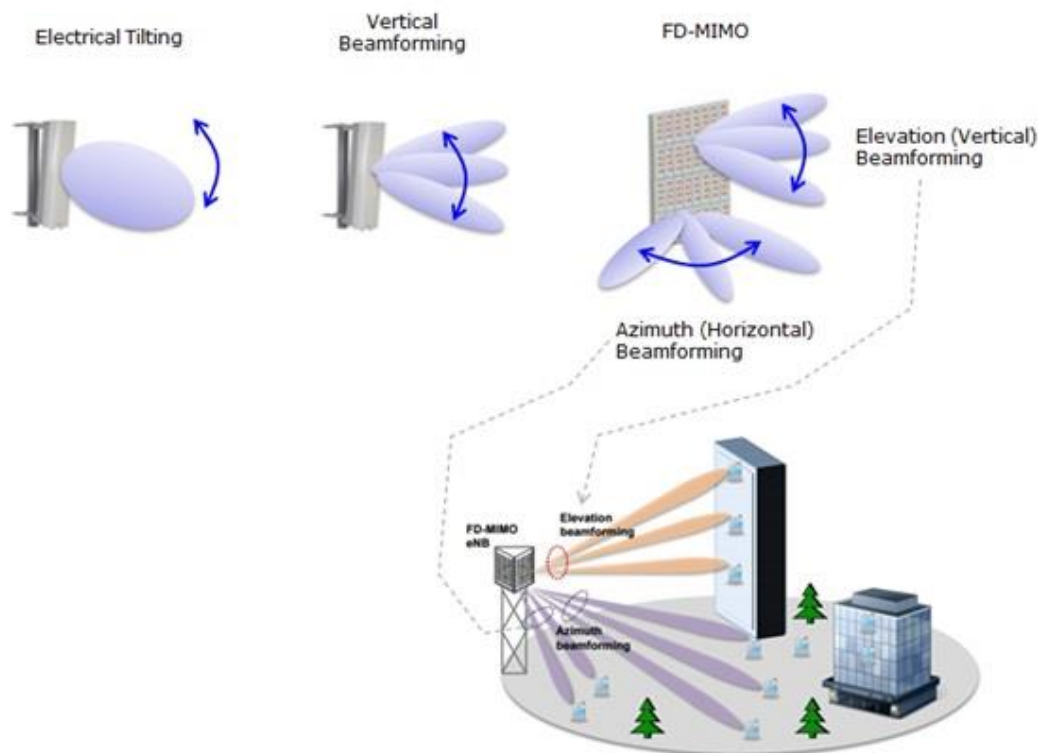


Figura 2.1: Exemplo de antenas MIMO com recurso *Beamforming* [21]

Os pequenos comprimentos de onda das frequências de ondas milimétricas permitem alcançar um grande número de antenas em uma área pequena. Isso permite o uso de grandes conjuntos de antenas no transmissor e no receptor.

A estrutura das ondas milimétricas difere, e muito, da estrutura dos *links* microondas. Como a tecnologia de circuitos analógicos está chegando ao seu limite e os *linkbudgets* estão mais limitados, é mais provável que seja considerado o modelo de ruído gaussiano aditivo (AGN - *Additive Gain Noise*) em sistemas lineares. Neste caso, a equalização permanecerá por meio da representação no domínio da frequência, embora as técnicas de modulação ou permaneçam no domínio da frequência, OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais), ou mudam para o domínio no tempo, SC-FDE (*Single-Carrier Frequency Domain Equalization* - Equalização no domínio da frequência de Portadora Única).

## 2.2. Desafio do Uso das Ondas Milimétricas

Um dos principais desafios do uso das ondas milimétricas é o desenvolvimento de produtos para altas frequências e altas taxas de dados [1]. Dispositivos que operam em altas frequências são geralmente caros e, apenas nos últimos anos, tornaram-se viáveis com o uso de silício de baixo custo.

Outro desafio que precisa ser levado em consideração é o padrão de uso de internet; parâmetros a serem considerados como limite do tráfego de dados determinado pelas operadoras, instabilidade das conexões e o alto custo dos provedores, ainda praticado no Brasil, afetam diretamente a adesão pelos consumidores.

Como já foi mencionado anteriormente, empresas de tecnologia como a Intel tem desenvolvido produtos, como o *multi mode* para uso em computadores, *gateways* domésticos, dispositivos móveis celulares e outros equipamentos de aplicação em IoT. Na área de telefonia móvel, a Qualcomm desponta no desenvolvimento de novos chips [28].

Dentre outros equipamentos, destacam-se as MCSC (*Millimeter Wave Capable Small Cells* - Pequenas células aptas a ondas milimétricas), usando a arquitetura de rádio MAA (*Modular Antenna Array* – Conjunto de Antenas Modulares) com *backhaul* de malha, que irá atender a necessidade por um grande aumento da capacidade, enquanto apresenta menor interferência e flexibilidade na implementação [1].

Para um receptor de ondas milimétricas operar adequadamente, o rádio deve adequar a SNR (*Signal-to-Noise Ratio* - Relação Sinal-Ruído) a fim de suportar a modulação utilizada pelo rádio; a potência do sinal não deve ser muito forte, a fim de não saturar o receptor. Cálculos adequados de *link budget* auxiliam na determinação da SNR requerida.

Em virtude do tamanho das ondas milimétricas, muitos objetos causam bloqueio do sinal entre o transmissor e o receptor, em percursos com visada (LOS). Entretanto, alguns fenômenos permitem a propagação de sinais em ondas milimétricas, como reflexão e espalhamento.

Além da forte influência de perdas pela absorção de O<sub>2</sub>, característica observada em portadoras na faixa de 60 GHz que interagem com o oxigênio da atmosfera durante a propagação, aponta-se, também, as perdas decorrentes das condições de propagação deficiente.

Ademais, ressaltam-se outras qualidades desfavoráveis da comunicação em ondas milimétricas [1]:

- aumento da perda de propagação no espaço livre;
- diminuição da penetração do sinal através de obstáculos;
- comunicação direcional devido a exigências de uso de antenas de alto ganho; e
- considerável interferência intersimbólica devido ao multipercurso do sinal.

Como foi mencionado anteriormente, uma das formas de amenizar os efeitos destrutivos sobre o sinal propagado em ondas milimétricas é o uso de antenas altamente diretivas, capazes de serem eletricamente dirigidas, com menores dimensões e integradas.

### 2.3. Reflexão e Difração

O efeito da difração é decorrente da propagação do sinal ao contornar um objeto, quando este bloqueia o sinal ou causa “sombreamento”, passando de uma condição de percurso com visada (LOS) para percurso sem visada (NLOS) [1].

Diferentemente da propagação em frequências mais baixas (faixa UHF e microondas), a difração é prejudicial ao canal em ondas milimétricas. Em medições realizadas em área urbana, foi observada uma diferença de mais de 40 dB do nível do sinal recebido na faixa de 28 GHz entre o transmissor e o receptor quando um dispositivo móvel contornou um edifício, com perda em visada direta [1]. O mesmo fato foi observado em ambientes *indoor*, em que a atenuação foi da ordem de 10 a 40 dB [9]. Dessa forma, a difração revelou-se ser um efeito não confiável para as ondas milimétricas.

Em compensação, o efeito da reflexão sobre muitos materiais nas frequências de ondas milimétricas contribui para a propagação em ambientes *indoor* e *outdoor*. Estudos realizados nas faixas de 28 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 73 GHz [1] [2] [9] mostraram que paredes, árvores, corpo humano e postes de iluminação são bons obstáculos reflexíveis, permitindo a propagação por multipercurso.

Além do multipercurso pelas reflexões do sinal transmitido, uma forma de compensar a perda de propagação e a atenuação em virtude da difração é a adoção de antenas altamente diretivas, com ganhos que superem as perdas por espaço livre.

Estes estudos demonstraram que as componentes refletidas e por multipercurso do sinal transmitido devem ser consideradas no processamento do canal em frequências de ondas milimétricas. No capítulo 4, serão apresentados os modelos de propagação que unem as componentes do sinal transmitido com visada (LOS) e sem visada (NLOS), oriundas do multipercurso e das reflexões.

A Tabela 2.1 apresenta os coeficientes de reflexão para materiais comuns:

Tabela 2.1: Comparação da refletividade em diferentes materiais na faixa de frequência de 28 GHz [1][2][9].

| Ambiente | Localização | Material            | Ângulo (°) | Coefficiente de Reflexão ( $ \Gamma_{  } $ ) |
|----------|-------------|---------------------|------------|--|
| Outdoor  | ORH         | Vidro pintado       | 10         | 0.896  |
|          |             | Concreto            | 10         | 0.815  |
|          |             |                     | 45         | 0.623  |
| Indoor   | MTC         | Vidro transparente  | 10         | 0.740  |
|          |             | Divisória (drywall) | 10         | 0.704  |
|          |             |                     | 45         | 0.628  |

Outro efeito importante a ser considerado é a penetração da onda milimétrica. Em certos objetos, a perda por penetração pode ser tão severa que poderá acarretar o bloqueio do sinal [2]. A Tabela 2.2 apresenta a perda por penetração em ambientes *indoor* e *outdoor*:

Tabela 2.2: Perda por penetração em diferentes ambientes na faixa de frequência de 28 GHz [1][2][9].

| Ambiente | Localização | Material           | Espessura (cm) | Potência de Recepção Espaço Livre (dBm) | Potência de Recepção Material (dBm) | Perda por Penetração (dB) |
|----------|-------------|--------------------|----------------|---|-------------------------------------|---------------------------|
| Outdoor  | ORH         | Vidro pintado      | 3.8            | -34,9                                   | -75.0                               | 40.1                      |
|          | WWH         | Parede (tijolo)    | 185.4          | -34,7                                   | -63.1                               | 28.3                      |
| Indoor   | MTC         | Vidro transparente | < 1.3          | -35.0                                   | -38.9                               | 3.9                       |
|          | WWH         | Vidro pintado      | < 1.3          | -34.7                                   | -59.2                               | 24.5                      |
|          |             | Vidro transparente | < 1.3          | -34.7                                   | -38.3                               | 3.6                       |
|          |             | Parede (drywall)   | 38.1           | -34.0                                   | -40.9                               | 6.8                       |

Observa-se na Tabela 2.2 que a perda por penetração em ambientes *indoor* é menor do que em ambientes *outdoor*. Taxas de 3 a 7 dB, em média, decorrentes da perda por penetração em materiais como vidro transparente e parede são relativamente pequenos se comparados à recepção em um local atrás de um elevador, que apresenta perda elevada de 40 dB (metais apresentam perdas maiores) [1]. Já em ambientes *outdoor*, as perdas podem chegar à ordem de 25 a 40 dB. Os resultados [1] [2] [9] mostraram que redes de comunicações móveis



*indoor* e *outdoor* poderão operar simultaneamente sem interferência co-canal, uma vez que a penetração do sinal externo será mais difícil em edifícios.

## 2.4. Desvanecimento

O desvanecimento ocorre quando alterações de amplitude do sinal transmitido e de percurso acarretam variações da potência do sinal no receptor [1].

O desvanecimento em grande escala, ou “sombreamento”, resulta na perda da potência do sinal no espaço livre, considerando a presença de obstáculos, em grandes distâncias entre transmissor e receptor.

O desvanecimento em pequena escala é caracterizado pelos efeitos da propagação em múltiplos percursos, com mudanças bruscas de amplitude e de fase do sinal, em consequência dos movimentos entre transmissor e receptor ou dos curtos intervalos de tempo. Como será feita a análise da propagação a partir de medições a serem realizadas em ambientes *indoor*, nas faixas de frequências de 28 GHz e 38 GHz, será ampliado o conceito de desvanecimento em pequena escala, que pode ser subdividido em espalhamento Doppler e de atraso RMS.

O espalhamento de atraso RMS [1] é caracterizado pela diferença entre o tempo de chegada da primeira componente do sinal propagado e das componentes do sinal mais atrasadas, obtendo-se um atraso médio.

Conforme mencionado anteriormente, o movimento relativo entre o transmissor e o receptor, ou dos obstáculos entre eles, resulta na propagação do sinal com múltiplos percursos e faz com que suas componentes apresentem um desvio de frequência, que caracteriza o desvio Doppler.

Cada componente recebida do sinal propagado por multipercurso pelo receptor irá apresentar amplitude e fase diferentes e independe das demais componentes, seja por percurso com visada (LOS) ou sem visada (NLOS).

## PROPAGAÇÃO POR MULTIPERCURSO

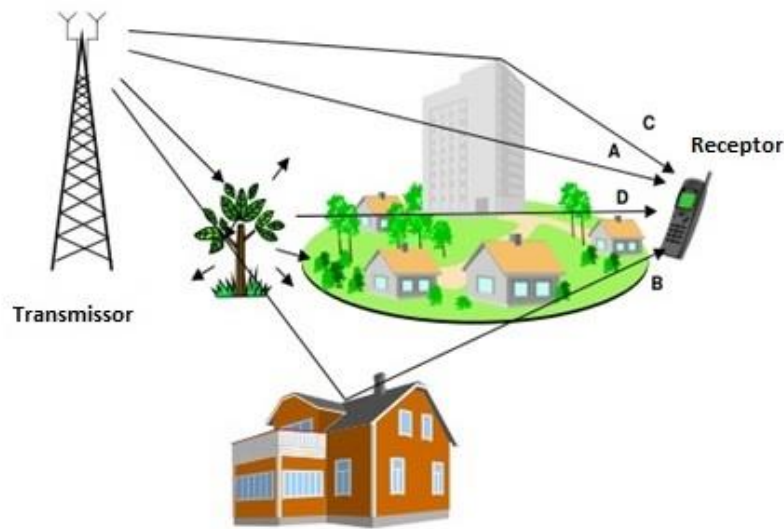


Figura 2.2: Propagação do sinal com componentes por multipercurso

Somado ao desvio de frequência, diferentes ângulos de incidência e diferentes caminhos resultam no desvanecimento Doppler rápido. Em outras palavras, a resposta ao impulso do canal sofre mudança rápida em relação à duração do símbolo, resultando na distorção do sinal e dispersão da frequência. Este tipo de desvanecimento é mais presente em canais de banda larga.

O canal de banda larga, então, é formado pelas interferências construtivas e destrutivas da propagação do sinal, pelo percurso direto e pelos múltiplos percursos, com diferentes fases e diferentes amplitudes.

### 2.5. Atenuação por Chuva e Absorção por Gases

O comprimento de onda das ondas eletromagnéticas é tão pequeno que as moléculas da água e do ar podem exercer influência na propagação do sinal. Para sinais com frequências acima de 10 GHz, o efeito da chuva é um grande fator atenuante sobre o enlace.

Observa-se na figura a se seguir que a atenuação por absorção de  $O_2$  é elevada na faixa de 60 GHz [10]. Nas faixas de 180 e 320 GHz, a perda de propagação é maior devido à molécula de água.

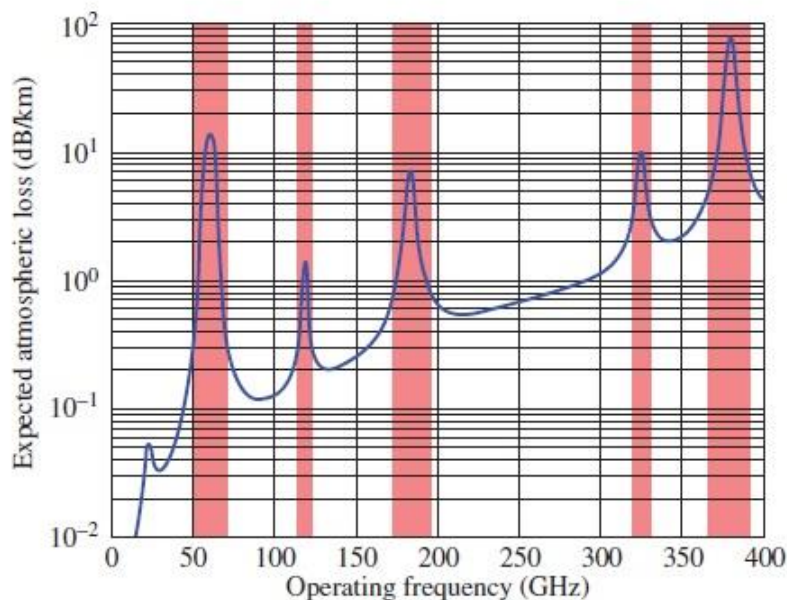


Figura 2.3: Perda por absorção atmosférica [1] [10].

Na figura 2.3, pode ser observado que a atenuação por absorção da molécula de oxigênio, na ordem de 20 dB/Km, não ocorre nas faixas de 28 GHz, 38 GHz ou 72 GHz, ideais para sistemas de comunicações móveis. A perda de absorção por  $O_2$  de até 20 dB/Km pode ser considerada desprezível para redes de até 100m, ou seja, células com raios menores. Na faixa de frequência de 28 GHz, a perda é 0,06 dB/km e na de 38 GHz, 0,08 dB/km, consideradas pequenas.

Outros parâmetros climáticos, como temperatura e umidade, devem ser considerados, pois aumentam a atenuação por absorção do sinal. Cabe acrescentar que a altura acima do solo (acima do nível do mar) também pode exercer influência sobre a perda por absorção atmosférica e, conseqüentemente, alterar a atenuação com a redução da temperatura e umidade [1].

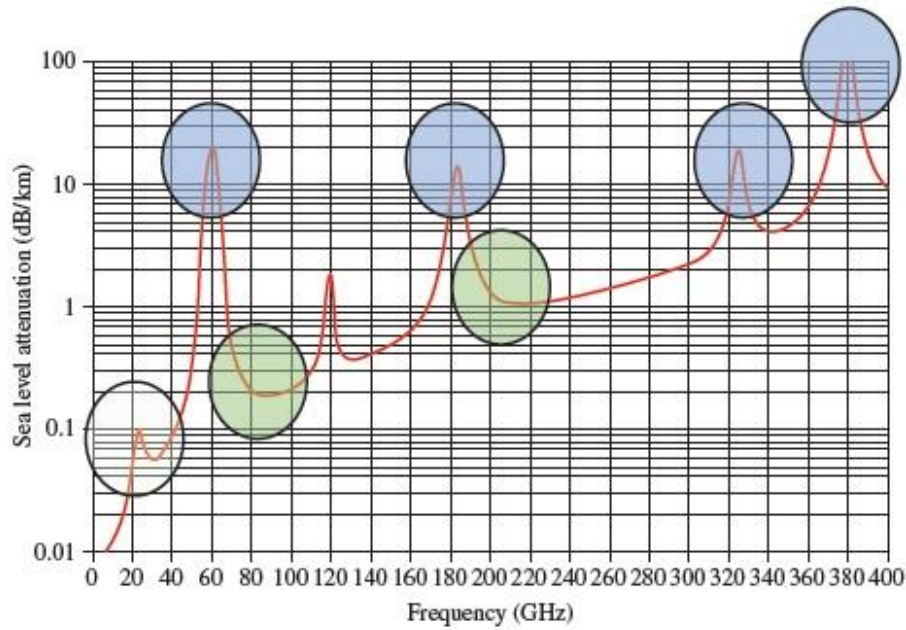


Figura 2.4: Atenuação por absorção atmosférica no nível do mar [1]

Além da atenuação por absorção atmosférica, a molécula da água, sob a forma de gota de chuva, granizo ou neve, tem grande impacto sobre a atenuação do sinal. Somado a essa consideração, o formato da gota e o índice pluviométrico, também, contribuem com a atenuação. Na faixa de frequência de 28 GHz, a perda é de 1,4 dB em 200 m, conforme é ilustrado e ressaltado na Fig. 2.5. Dessa forma, o efeito da chuva sobre as ondas milimétricas nas faixas de 28 GHz e 38 GHz será mínimo em curtas distâncias, conseqüentemente, em pequenas células [1].

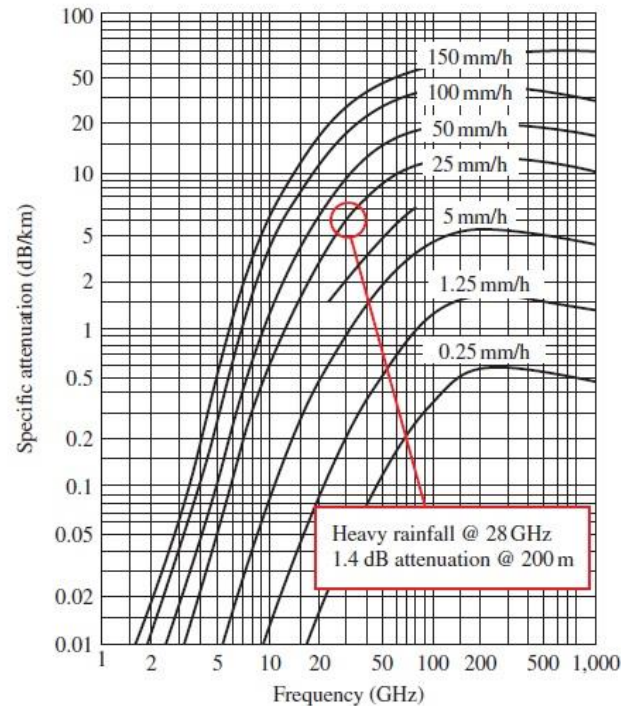


Figura 2.5: Atenuação por chuva [1] [2]

A redução do raio de cobertura em centros urbanos, formando micro e pico células, ameniza as limitações da propagação das ondas milimétricas devido a perdas por absorção de gases e pela molécula da chuva que interferem na atenuação por espaço livre.

Nesse contexto, a integração de conjunto de antenas, o uso de antenas direcionais e adaptáveis, principalmente, com ganhos elevados a fim de compensar as perdas, e a propagação por multipercurso possibilitam a propagação de sinais em faixas de ondas milimétricas em ambientes denso urbanos, mesmo com a presença de obstáculos como prédios, veículos e grandes estruturas, e em condições climáticas desfavoráveis para a transmissão e a recepção do sinal.

### 3. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Neste capítulo, serão abordados os principais modelos de canal para ambientes *outdoor* e *indoor*. Nos últimos anos, muitos estudos foram conduzidos por grupos e organizações, como a 3GPP, IEEE e a mais recente 5GPP, em prol do desenvolvimento de modelos de canal para as faixas de frequências de ondas milimétricas.

Para a modelagem em ambientes *indoor*, será dada ênfase a informações nas faixas de frequências de 28 GHz e 38 GHz, que servirão como base para as medições a serem apresentadas no próximo capítulo. Também, foram incluídos alguns resultados publicados em artigos e livros nestas faixas de frequências, como referência, tanto para ambientes *outdoor* quanto para ambientes *indoor*.

#### 3.1. Propagação em Ambientes *Outdoor*

No capítulo anterior, foram apresentados alguns desafios em relação à propagação nas faixas de frequências em ondas milimétricas. Um ponto observado em medições realizadas na faixa de 38 GHz [1] [12], por exemplo, é que o uso de antenas direcionais, com maior ganho e ângulo de azimute adequado (preciso) ao enlace, compensou as perdas de propagação, mostrando que é possível o uso de frequências mais altas em áreas urbanas.

Complementarmente, além destes fatores, a adoção de técnicas de modulação OFDM, que permite reduzir a sensibilidade à seletividade de frequência, propicia o uso de partes do canal que não sofreram desvanecimento.

O uso de modelos estatísticos de canais com antenas omnidirecionais possibilitou que os mesmos fossem aplicados em sistemas com antenas que utilizam tecnologia MIMO e *beamforming*; através de análises e simulações, é possível, também, determinar a capacidade e a cobertura do canal [1]. Estes

modelos reúnem as informações de perda total de propagação e dos raios dos percursos, tempo de atraso, direção de partida e de chegada dos múltiplos percursos.

Ademais, a aplicação de metodologias adequadas aos cenários em ambientes *outdoor* permite a redução de custo e tempo em medições reais em detrimento de simulações e pesquisas.

### 3.1.1. Modelo 3GPP

O modelo de canal 3GPP segue duas metodologias para ambientes *outdoor* em larga escala [1]. A primeira metodologia, ou o primeiro modelo, descreve a perda de propagação no espaço livre de um canal ao longo da distância, tendo como base um ponto de referência próximo (*Close-In*). Em contrapartida, o modelo *floating intercept* ou *floating point* (ponto variável) procura ajustar os dados obtidos em medições, representados graficamente em uma reta, tendo como referência no espaço livre um ponto variável.

Então, a perda de propagação no espaço livre em relação à distância próxima de referência (*Close-in Free Space Reference Distance Path Loss*) [4] [7] [8] [13] [14] é definida como:

$$PL^{CI}(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 10 n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma} \quad (1)$$

onde,

$$PL(d_0)[dB] = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (2)$$

em que  $PL^{CI}(d)$  é a perda de propagação CI em relação a  $d$ ;  $d_0$  é a distância de referência no espaço livre em m, geralmente igual a 1 m (a partir de medições realizadas com antenas no campo distante, foi especificado  $d_0 = 1$  m) [1];  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor;  $n$  é o coeficiente da perda de

propagação;  $X_\sigma$  é a variável aleatória log-normal;  $\sigma$  é o desvio padrão para modelagem em larga escala; e  $\lambda$  é o comprimento de onda da portadora e é definido por:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 [\text{m/s}]}{f [\text{Hz}]} \quad (3)$$

O modelo de ponto variável  $PL(\alpha, \beta)$  ou  $PL^{FI}$  descreve uma reta com os dados obtidos em medições, representados em um gráfico que relaciona a potência recebida com a distância [1] [4] [8] [14]. A perda de propagação segundo o modelo  $PL^{FI}$  é descrita como:

$$PL^{FI}[\text{dB}](d) = \alpha[\text{dB}] + 10 \beta \log_{10}(d) + X_\sigma[\text{dB}] \quad (4)$$

onde  $PL^{FI}$  (*PL Floating Intercept*) ou  $PL(\alpha, \beta)$  é a perda de propagação segundo os pontos  $\alpha$  e  $\beta$ ;  $\alpha$  é o ponto variável em dB e  $\beta$  é a inclinação. Analogamente,  $\beta$  é a inclinação da reta e  $\alpha$  é o coeficiente linear.

A Tabela 3.1 reúne os principais dados obtidos de medições realizadas na faixa de frequência de 28 GHz, tanto para o modelo de perda de propagação CI ( $PL^{CI}(d)$ ) quanto para o modelo de ponto variável ( $PL(\alpha, \beta)$ ), em cenários LOS e NLOS.

Tabela 3.1: Modelos de perda de propagação para ambiente *outdoor* para  $f = 28$  GHz [1] [13].

| Modelos de perda de propagação para $f = 28$ GHz |      |                     |      |
|--|------|---------------------|------|
| $PL^{CI}(d)$                                     | LOS  | $n$                 | 2.1  |
|  |      | $\sigma[\text{dB}]$ | 3.6  |
|  | NLOS | $n$                 | 3.4  |
|  |      | $\sigma[\text{dB}]$ | 9.7  |
| $PL(\alpha, \beta) \quad 30 < d < 200 \text{ m}$ | NLOS | $\alpha[\text{dB}]$ | 79.2 |
|  |      | $\beta$             | 2.6  |
|  |      | $\sigma[\text{dB}]$ | 9.6  |

Com base nos dados da Tabela 3.1 e segundo a Eq. (1), a perda de propagação na faixa de frequência de 28 GHz [1] é:



$$PL^{CI}LOS_{f=28GHz}(d)[dB] = 61,4 \text{ dB} + 21 \log_{10}(d) + X_{\sigma}, [\sigma = 3,6 \text{ dB}] \quad (5)$$

$$PL^{CI}NLOS_{f=28GHz}(d)[dB] = 61,4 \text{ dB} + 34 \log_{10}(d) + X_{\sigma}, [\sigma = 9,7 \text{ dB}] \quad (6)$$

O modelo  $\alpha\beta\gamma$  [4] [14] pode ser considerado uma evolução do modelo  $\alpha\beta$ . A diferença está na inclusão do coeficiente da perda de propagação em função da frequência.

$$PL(\alpha, \beta, \gamma)[dB] = 10 \beta \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + \alpha[dB] + 10 \gamma \log_{10}(f) + X_{\sigma}^{\alpha\beta\gamma}[dB] \quad (7)$$

onde  $PL(\alpha, \beta, \gamma)$  é a perda de propagação segundo os pontos  $\alpha, \beta$  e  $\gamma$ ;  $\alpha$  é o ponto variável em dB;  $\beta$  é a inclinação da reta de PL;  $\gamma$  é o coeficiente da perda em função da frequência e  $X_{\sigma}^{\alpha\beta\gamma}$  é a variável aleatória log-normal. Quando não há variação da frequência ao longo do percurso após  $d_0$ ,  $\gamma$  é igual a 2.

Cabe acrescentar que, apesar da perda de propagação de canais com antenas omnidirecionais, cujo ganho é 0 dBi, apresentarem baixo coeficiente de perda ( $n$ ), que representa a perda da potência recebida em função da distância entre o transmissor e o receptor, sua área de cobertura será menor em relação aos canais com antenas direcionais, cuja perda de propagação é maior, porém é compensada pelos ganhos das antenas transmissora e receptora

Outro fator importante que contribui para a confiabilidade da propagação em ambientes *outdoor* é a posição da antena transmissora em relação ao solo. Antenas com alturas mais elevadas permitem a redução do espalhamento por atraso RMS. Complementarmente, o ângulo de apontamento, assim como a direção do feixe da antena, exerce influência sobre o enlace entre o transmissor e o receptor.

### 3.2. Propagação em Ambientes *Indoor*

Para sinais com frequência de operação acima de 5 GHz [1], recomenda-se que sejam consideradas, além do nível do sinal recebido, as componentes de multipercurso e seus ângulos de recepção.

Observou-se em alguns estudos [1] que o uso de antenas diretivas, em ambientes fechados (*indoor*), permitia a redução da contribuição das componentes do multipercurso do sinal, além da redução do espalhamento por atraso RMS. Em contrapartida, haveria a necessidade do perfeito alinhamento entre as antenas transmissoras e receptoras.

Adicionalmente, os modelos de propagação *indoor* para canais em ondas milimétricas contemplam a perda por penetração e os coeficientes de reflexão.

Neste capítulo, serão apresentados os modelos de canal IEEE 802.15.3c e IEEE 802.11.ad para as faixas de frequências de ondas milimétricas.

#### 3.2.1. Modelo IEEE 802.15.3c

O modelo de canal IEEE 802.15.3c [1] é baseado em *clusters* no domínio do tempo e do espaço. O modelo consiste na inclusão de uma componente LOS entre o transmissor e o receptor de maior intensidade, sobrepondo as demais componentes, além de considerar os ângulos de chegados raios (percursos) e dos *clusters*.

O raio primário (mais forte) de um *cluster* é chamado de *curser*. Os raios predecessores são chamados de *pre-curser* e sucessores, *post-curser*. Os raios são clusterizados de forma angular, ou seja, os raios chegam com um desvio angular representado por  $\Phi_l$ .

Em medições realizadas na faixa de frequência de 60 GHz [1], foi verificado que a componente LOS é dominante e a componente NLOS mais forte não sobrepõe a componente LOS. Foi observado, também, que o uso de antenas

direcionais destacou a componente LOS sobre as componentes NLOS, em relação ao uso de antenas omnidirecionais.

Quando não são utilizadas antenas direcionais, as componentes dos múltiplos percursos de cada *cluster* decaem exponencialmente. Ressalta-se que raios refletidos e dispersos podem mudar a polarização, possibilitando que uma antena transmissora com polarização vertical se comunique com uma antena receptora com polarização horizontal.

Considerando os efeitos da polarização da antena e dos ângulos de chegada (AOA – *Angle of Arrival*) e de partida (AOD – *Angle of Departure*), a resposta impulsiva do canal (CIR) é representada por uma matriz 2 x 2 em função do tempo:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}(t, \phi_{TX}, \phi_{RX}) = & \beta \delta(t, \Phi_{LOS}) \mathbf{I} \\ & + \sum_{l=0}^L \mathbf{H}^{(l)} \sum_{k=0}^K a_{k,l} \delta(t - T_l - \tau_{k,l}) \delta(\phi_{RX} - \Phi_{l,RX} \\ & - \psi_{k,l,RX}) \delta(\phi_{TX} - \Phi_{l, TX} - \psi_{k,l, TX}) \end{aligned} \quad (8)$$

em que  $\mathbf{h}(t, \phi_{TX}, \phi_{RX})$  representa a CIR;  $\mathbf{H}$  é a matriz 2 x 2 em que representa as características das polarizações *co* e *cross* cruzadas do  $l$ -ésimo *cluster*;  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade que representa a componente LOS, cuja polarização não sofre alteração entre as antenas transmissora e receptora;  $\beta$ , que é o ganho da componente LOS para o atraso  $t$  acima de zero e azimuth  $\Phi_{LOS}$ , depende do ganho e da orientação das antenas; os *clusters* NLOS são representados pelos 2 somatórios  $\sum_{l=0}^L \sum_{k=0}^K$ ;  $L$ , parâmetro estatístico, representa os *clusters* individuais;  $K$  representa as componentes de multipercurso de cada cluster; e  $T_l + \tau_{k,l}$  corresponde ao atraso de cada raio; o ângulo de cada raio é dado por  $\Phi_l + \psi_{k,l}$ ; os ângulos  $\Phi_{l, TX}$  e  $\Phi_{l, RX}$  representam os ângulos de azimuth de saída e de chegada, respectivamente do raio  $K, l$ -ésimo; os *clusters* evoluem a uma taxa  $a$  de  $1/T_l$ . Em complemento, a amplitude dos clusters decai a uma taxa exponencial de  $\tau$ .

A perda de propagação deve considerar todos os raios da resposta impulsiva do canal, segundo distribuição log-normal. As amplitudes dos raios individuais e das somas das amplitudes dos raios, resumidas em uma amplitude média de um *cluster*, também, seguem distribuição log-normal. Assim sendo, o valor médio da perda de propagação ( $PL$ ) pode ser descrito por [1]:

$$PL(d, f) = PL_0 + 10K \log_{10} \left( \frac{f}{f_0} \right) + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (9)$$

onde  $PL_0$  é a perda de propagação na frequência  $f_0$  e na distância  $d_0$  (distância referência) entre transmissor e receptor, geralmente igual a 1m (Eq. 2);  $K$  é o fator de perda de frequência, geralmente igual a 2;  $n$  é o coeficiente de perda de propagação que descreve o quanto a perda de propagação aumenta com o aumento da distância entre o transmissor e o receptor, em relação a  $d_0$ ;  $X_\sigma$  é a variável aleatória log-normal que descreve as características de sombreamento (*shadowing*) do canal, que varia de 0,4 a 2,1. Para antenas posicionadas muito acima do nível do chão,  $n$  apresentará valores mais baixos. Os parâmetros de ganho das antenas transmissora e receptora devem ser adicionados na equação, para estudo e análise de medições em cenários de ambientes *indoor*.

Reescrevendo a Eq. (9), a perda de propagação ( $PL$ ), em função da frequência, é:

$$PL(d, f) = PL_0 + 20 \log_{10}(f) + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (10)$$

A parcela  $[20 \log_{10}(f)]$  de  $PL$  pode ser suprimida para cenários não dependentes da frequência. O coeficiente  $n$  pode ser obtido a partir da Tabela 3.3, que se encontra mais adiante, para a faixa de frequência de 60 GHz [1] [6].

O modelo de canal IEEE 802.15.3c contempla 9 ambientes diferentes [1] [6] LOS e NLOS, conforme a tabela a Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Modelos de canal (MCX) IEEE 802.15.3c para vários ambientes *indoor* [1] [6].

| Modelo de canal | Cenário | Ambiente         | Descrição   |
|-----------------|---------|------------------|---|
| MC1             | LOS     | Residencial      | Casa com cômodos mobiliados. Comparável em tamanho a um pequeno escritório. Paredes de alvenaria(concreto, tijolo) ou madeira e piso com tapete ou carpete. Pode haver janelas e portas.                              |
| MC2             | NLOS    |                  |   |
| MC3             | LOS     | Escritório       | Computadores, várias cadeiras e mesas para escritório. Estantes, gabinetes e armários. Paredes de metal / alvenaria(concreto, tijolo). Pode haver estações de trabalho. Corredores longos que interligam escritórios. |
| MC4             | NLOS    |                  |   |
| MC5             | LOS     | Biblioteca       | Muitas mesas e prateleiras de metal / madeira com livros. Pode haver janelas amplas em um ou mais lados. Portões amplos.  |
| MC6             | NLOS    |                  |   |
| MC7             | LOS     | Mesa de trabalho | Baías para escritório com mesa e computador.  |
| MC8             | NLOS    |                  |   |
| MC9             | LOS     | Quiosque         | Estação em um shopping ou outro local público. Os usuários devem estar posicionados diretamente na frente ou próximo, em torno de 1 a 2 m do quiosque.  |

Tabela 3.3: Valores de  $PL_0$  para modelos de canais em 60 GHz [1] [ 27].

| Ambiente            | LOS /NLOS | $n$  | $PL_0$ | $X_\sigma$ | Dependente da frequência | Antenas                    |
|---------------------|-----------|------|--------|------------|--------------------------|----------------------------|
| Residencial         | LOS       | 1.53 | 75.1   | 1.5        | Não                      | TX 72° HPBW<br>RX 60° HPBW |
| Residencial         | NLOS      | 2.44 | 86.0   | 6.2        | Não                      | TX 72° RX 60°<br>HPBW      |
| Escritório          | LOS       | 1.16 | 84.6   | 5.4        | Não                      | TX Omni<br>RX 30° HPBW     |
| Escritório          | NLOS      | 3.74 | 56.1   | 8.6        | Não                      | TX Omni<br>RX 30° HPBW     |
| Sala de Conferência | LOS       | 2.0  | 32.5   | N / A      | $20 \log_{10}(f)$        | N / A                      |
| Sala de Conferência | NLOS      | 0.6  | 51.5   | N/A        | $20 \log_{10}(f)$        | N/A                        |

A Tabela 3.4 reúne os principais parâmetros definidos tanto para o modelo de canal IEEE 802.15.3c quanto para o modelo de canal IEEE 802.11ad.

Tabela 3.4: Parâmetros chave dos modelos de canal 802.15.3c e 802.11ad [1].

| Parâmetro     | Descrição  |
|---------------|--|
| $PL_0$        | Perda de propagação - distância de referência igual a 1m.                    |
| $n$           | Coeficiente de perda de propagação   |
| $X_\sigma$    | Desvio padrão de sombreamento ( <i>shadowing</i> )                           |
| $\beta$       | Ganho do primeiro raio LOS   |
| $\alpha$      | Taxa de chegada entre <i>clusters</i>  |
| $\lambda$     | Taxa de chegada intra <i>cluster</i> (entre os raios)                        |
| $\lambda_f$   | Taxa de chegada de raios pré-curser intra <i>cluster</i>                     |
| $\lambda_b$   | Taxa de chegada de raios pós-curser intra <i>cluster</i>                     |
| $\Gamma$      | Taxa de decaimento entre <i>clusters</i>                                     |
| $\Upsilon$    | Taxa de decaimento intra <i>clusters</i>                                     |
| $\Upsilon_f$  | Taxa de crescimento pré-curser intra <i>clusters</i>                         |
| $\Upsilon_b$  | Taxa de decaimento pós-curser intra <i>clusters</i>                          |
| $\sigma_c$    | Desvio padrão log-normal do <i>cluster</i>                                   |
| $\sigma_r$    | Desvio padrão log-normal do raio   |
| $\sigma_\phi$ | Ângulo de espalhamento ou desvio padrão da distribuição do ângulo de azimuth |
| $\bar{L}$     | Número médio de clusters   |
| $P(L)$        | Distribuição do número de clusters   |
| $d$           | Distância entre o transmissor e o receptor                                   |
| $h_1$         | Altura do transmissor  |
| $h_2$         | Altura do receptor   |
| $G_T$         | Ganho do transmissor   |
| $G_R$         | Ganho do receptor  |
| $\Delta_k$    | Fator Rice do raio   |

O valor de  $\beta$ , que representa o ganho do percurso LOS da resposta impulsiva do canal (Eq. (8)), é expandido na Eq. (11):

$$\beta[\text{dB}] = 20\log_{10} \left[ \frac{\mu_d}{d} \left| \sqrt{G_{t1}G_{r1}} + \sqrt{G_{t2}G_{r2}}\Gamma_0 \exp\left(\frac{j2\pi 2h_1h_2}{\lambda_f d}\right) \right| \right] - PL_d(\mu_d) \quad (11)$$

onde  $\mu_d$  é a distância média entre o transmissor e o receptor;  $\Gamma_0$  é o coeficiente de reflexão;  $G_{t1}$  e  $G_{t2}$  são os ganhos das antenas transmissoras;  $G_{r1}$  e  $G_{r2}$  são os ganhos das antenas receptora;  $h_1$  e  $h_2$  correspondem às alturas do transmissor e do receptor;  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor e  $PL_d(\mu_d)$ , perda média de propagação, é definido por:

$$PL_d(\mu_d)[dB] = PL_d(d_0)[dB] + 10 n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (12)$$

e  $PL_d(d_0)$ :

$$PL_d(d_0) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi g_i}{\lambda_f} \right) + A_{NLOS} \quad (13)$$

em que  $A_{NLOS}$  corresponde à constante de atenuação para os percursos NLOS;  $g_i$  é a perda por reflexão; e  $\lambda_f$  corresponde ao comprimento de onda e é obtido a partir da frequência de operação (Eq. (3)).

As Tabelas 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 reúnem os dados dos principais parâmetros dos ambientes residencial, escritório, mesa de trabalho, biblioteca e quiosque, respectivamente [1] [6].

Tabela 3.5: Parâmetros usados nos MC1 e MC2 para o ambiente Residencial [1] [6].

| Residencial       | LOS (MC1)                     |                              |                              |                              |                                | NLOS (MC2) | Comentários                      |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|
|                   | TX - 360°<br>RX - 15°<br>NICT | TX - 60°<br>RX - 15°<br>NICT | TX - 30°<br>RX - 15°<br>NICT | TX - 15°<br>RX - 15°<br>NICT | TX - 360°<br>RX - 15°<br>NICTA |            |                                  |
| $\Lambda$ [1/ns]  | 0.191                         | 0.194                        | 0.144                        | 0.045                        | 0.21                           | N / A      | -                                |
| $\lambda$ [1/ns]  | 1.22                          | 0.90                         | 1.17                         | 0.93                         | 0.77                           | N / A      | -                                |
| $\Gamma$ [ns]     | 4.46                          | 8.98                         | 21.50                        | 12.60                        | 4.19                           | N / A      | -                                |
| $Y$ [ns]          | 6.25                          | 9.17                         | 4.35                         | 4.98                         | 1.07                           | N / A      | -                                |
| $\sigma_c$ [dB]   | 6.28                          | 6.63                         | 3.71                         | 7.34                         | 1.54                           | N / A      | -                                |
| $\sigma_r$ [dB]   | 13.00                         | 9.83                         | 7.31                         | 6.11                         | 1.26                           | N / A      | -                                |
| $\sigma_\phi$ [°] | 49.80                         | 119.0                        | 46.20                        | 107.00                       | 8.32                           | N / A      | -                                |
| $\bar{L}$         | 9                             | 11                           | 8                            | 4                            | 4                              | N / A      | -                                |
| $\Delta_k$ [dB]   | 18.80                         | 17.40                        | 11.90                        | 4.60                         | N / A                          | N / A      | -                                |
| $\Omega(d)$ [dB]  | -88.70                        | -108.00                      | -111.00                      | -110.70                      | N / A                          | N / A      | $\Omega_0$ foi definido para 3 m |
| $n_d$             | 2                             | 2                            | 2                            | 2                            | N / A                          | N / A      | -                                |
| $A_{NLOS}$        | 0                             | 0                            | 0                            | 0                            | N / A                          | N / A      | -                                |

Tabela 3.6: Parâmetros usados nos MC3 e MC4 para o ambiente Escritório [1] [6].

| Escritório        | LOS (MC3)                     |                              | NLOS (MC4)                   |                              |                               | Comentários |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------|
|                   | TX - 360°<br>RX - 15°<br>NICT | TX - 60°<br>RX - 15°<br>NICT | TX - 30°<br>RX - 15°<br>NICT | TX - 15°<br>RX - 15°<br>NICT | TX -360°<br>RX - 15°<br>NICTA |             |
| $\Lambda$ [1/ns]  | 0.041                         | 0.027                        | 0.032                        | 0.028                        | 0.07                          | -           |
| $\lambda$ [1/ns]  | 0.971                         | 0.293                        | 3.45                         | 0.76                         | 1.88                          | -           |
| $\Gamma$ [ns]     | 49.80                         | 38.80                        | 109.20                       | 134.00                       | 19.44                         | -           |
| $\Upsilon$ [ns]   | 45.20                         | 64.90                        | 67.90                        | 59.00                        | 0.42                          | -           |
| $\sigma_c$ [dB]   | 6.60                          | 8.04                         | 3.24                         | 4.37                         | 1.82                          | -           |
| $\sigma_r$ [dB]   | 11.30                         | 7.95                         | 5.54                         | 6.66                         | 1.88                          | -           |
| $\sigma_\phi$ [°] | 102.00                        | 66.40                        | 60.20                        | 22.20                        | 9.10                          | -           |
| $\bar{L}$         | 6                             | 5                            | 5                            | 5                            | 6                             | -           |
| $\Delta_k$ [dB]   | 21.90                         | 11.40                        | 19.00                        | 19.20                        | N / A                         | -           |
| $\Omega(d)$ [dB]  | -3.27d -<br>85.80             | -0.303d<br>-90.30            | -109.00                      | -107.20                      | N / A                         | -           |
| $n_d$             | 2.00                          | 2.00                         | 3.35                         | 3.35                         | N / A                         | -           |
| $A_{NLOS}$        | 0                             | 0                            | 5.56@3m                      | 5.56@3m                      | N / A                         | -           |

Tabela 3.7: Parâmetros usados nos MC5 e MC6 para o ambiente Biblioteca [1] [6].

| Biblioteca        | LOS (MC5) | NLOS (MC6) | Comentários |
|-------------------|-----------|------------|-------------|
| $\Lambda$ [1/ns]  | 0.25      | N / A      | -           |
| $\lambda$ [1/ns]  | 4.00      | N / A      | -           |
| $\Gamma$ [ns]     | 12.00     | N / A      | -           |
| $\Upsilon$ [ns]   | 7.00      | N / A      | -           |
| $\sigma_c$ [dB]   | 5.00      | N / A      | -           |
| $\sigma_r$ [dB]   | 6.00      | N / A      | -           |
| $\sigma_\phi$ [°] | 10.00     | N / A      | -           |
| $\bar{L}$         | 9         | N / A      | -           |
| $K_{LOS}$         | 8         | N / A      | -           |



Tabela 3.8: Parâmetros usados nos MC7 e MC8 para o ambiente Mesa de Trabalho [1] [6].

| Mesa de trabalho  | LOS (MC7)                                   |   | LOS (MC7)<br>Omni-TX<br>RX-21 dBi | NLOS (MC8) |
|-------------------|---|---|-----------------------------------|------------|
|                   | TX - 30°<br>RX - 30°                        | TX - 60°<br>RX - 60°                        |                                   |            |
| $\Lambda$ [1/ns]  | 0.037                                       | 0.047                                       | 1.72                              | N / A      |
| $\lambda$ [1/ns]  | 0.641                                       | 0.373                                       | 3.14                              | N / A      |
| $\Gamma$ [ns]     | 21.10                                       | 22.30                                       | 4.01                              | N / A      |
| $Y$ [ns]          | 8.85  | 17.20                                       | 0.58                              | N / A      |
| $\sigma_c$ [dB]   | 3.01  | 7.27  | 2.70                              | N / A      |
| $\sigma_r$ [dB]   | 7.69  | 4.42  | 1.90                              | N / A      |
| $\sigma_\phi$ [°] | 34.60                                       | 38.10                                       | 14.00                             | N / A      |
| $\bar{L}$         | 3   | 3   | 14                                | N / A      |
| $\Delta_k$ [dB]   | 11.0  | 17.20                                       | N / A                             | N / A      |
| $\Omega(d)$ [dB]  | 4.44d – 105.4                               | 3.46d – 98.4                                | N / A                             | N / A      |
| $h_1$             | faixa de distância<br>uniforme: 0-0.3       | faixa de distância<br>uniforme: 0-0.3       | N / A                             | N / A      |
| $h_2$             | faixa de distância<br>uniforme: 0-0.3       | faixa de distância<br>uniforme: 0-0.3       | N / A                             | N / A      |
| $d$               | faixa de distância<br>uniforme: d $\pm$ 0.3 | faixa de distância<br>uniforme: d $\pm$ 0.3 | N / A                             | N / A      |
| $G_{T1}$          | GSS   | GSS   | N / A                             | N / A      |
| $G_{R1}$          | GSS   | GSS   | N / A                             | N / A      |
| $G_{T2}$          | GSS   | GSS   | N / A                             | N / A      |
| $G_{R2}$          | GSS <sup>1</sup>                            | GSS   | N / A                             | N / A      |
| $n_d$             | 2   | 2   | N / A                             | N / A      |
| $A_{NLOS}$        | 0   | 0   | N / A                             | N / A      |

<sup>1</sup> GSS é um modelo de antena Gaussiana.

Tabela 3.9: Parâmetros usados no MC9 para o ambiente Quiosque [1] [6].

| Quiosque          | LOS (MC9)                          |                                    | Comentários                      |
|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
|                   | TX - 30°<br>RX - 30°<br>Ambiente 1 | TX - 30°<br>RX - 30°<br>Ambiente 2 |                                  |
| $\Lambda$ [1/ns]  | 0.0546                             | 0.0442                             | -                                |
| $\lambda$ [1/ns]  | 0.917                              | 1.01                               | -                                |
| $\Gamma$ [ns]     | 30.20                              | 64.20                              | -                                |
| $Y$ [ns]          | 36.50                              | 61.10                              | -                                |
| $\sigma_c$ [dB]   | 2.23                               | 2.66                               | -                                |
| $\sigma_r$ [dB]   | 6.88                               | 4.39                               | -                                |
| $\sigma_\phi$ [°] | 34.20                              | 45.80                              | -                                |
| $\bar{L}$         | 5                                  | 7                                  | -                                |
| $\Delta_k$ [dB]   | 11.00                              | 9.10                               | -                                |
| $\Omega(d)$ [dB]  | -98.0                              | -107.80                            | $\Omega_0$ foi derivado para 1 m |
| $n_d$             | 2                                  | 2                                  | -                                |
| $A_{NLOS}$        | 0                                  | 0                                  | -                                |

Tendo como referência o conceito do efeito Doppler em canais com desvanecimento em pequena escala, explicitado anteriormente, pode ser definido como tempo de coerência o inverso do espalhamento Doppler, que corresponde ao tempo em que as propriedades do canal se mantêm constantes [1]. Tanto no modelo do canal IEEE 802.15.3c quanto no modelo 802.11ad, o tempo de coerência é maior do que a duração do símbolo. Em uma sequência de símbolos, formando um bloco, fará com que o canal apresente a característica de desvanecimento em bloco ou desvanecimento lento.

Cabe acrescentar que a perda por penetração do corpo humano, que não representa um bloqueio para o canal, pode aumentar a atenuação demasiadamente, como por exemplo, valores obtidos de 18 a 36 dB na faixa de 60 GHz [1]. Como consequência, há o impacto sobre o enlace, reduzindo a SNR e elevando a BER.

### 3.2.2. Modelo IEEE 802.11ad

O modelo de canal IEEE 802.11ad é similar ao modelo IEEE 802.15.3c, portanto também é baseado em *clusters* no domínio do tempo e do espaço. Tendo como ferramenta de apoio a modelagem por *Ray-tracing* (traçamento de raios), não mencionado até então por ser limitante a ambientes específicos, o modelo IEEE 802.11ad contempla os efeitos espaciais e temporais (parâmetros de transmissão e recepção, ângulos de azimute e de elevação), as características de amplitude, fase e polarização do canal.

O modelo IEEE 802.11ad caracteriza os *clusters* como “Estação à Estação” (STA-STA – *Station to Station*) e “Estação ao Ponto de Acesso” (STA-PA – *Station to Point of Access*) [1] [13]. O modelo IEEE 802.11.ad, define os ambientes (cenários) como “Sala de Estar”, “Baías de Escritório” e “Sala de Conferência” [13]. Para cada cenário, os percursos LOS e NLOS são considerados, além das reflexões dos raios entre o transmissor e o receptor.

As reflexões dos múltiplos percursos são classificadas como de primeira ordem e de segunda ordem. A reflexão de primeira ordem corresponde à reflexão

do raio que só reflete uma vez, seja na parede, teto ou chão, saindo do transmissor até o receptor; a de segunda ordem, o raio reflete 2 vezes.

Na Tabela 3.10, são descritos os principais parâmetros usados no modelo IEEE 802.11ad:

Tabela 3.10: Parâmetros chave para o ambiente “Sala de Conferência” para o modelo de canal IEEE 802.11 ad [1] [13]

| Parâmetro   | Notação | Valor                  |
|---|---------|------------------------|
| Fator K dos raios precursores                         | $K_f$   | 5 dB                   |
| Tempo de decaimento da potência dos raios precursores | $g_f$   | 1.3 ns                 |
| Taxa de chegada dos raios precursores                 | $I_f$   | $0.20 \text{ ns}^{-1}$ |
| Distribuição da amplitude dos raios precursores       | -       | Rayleigh               |
| Número de raios precursores                           | $N_f$   | 2                      |
| Fator K dos raios pós-cursor                          | $K_b$   | 10 dB                  |
| Tempo de decaimento da potência dos raios pós-cursor  | $g_b$   | 2.8 ns                 |
| Taxa de chegada dos raios pós-cursor                  | $I_b$   | $0.12 \text{ ns}^{-1}$ |
| Distribuição da amplitude dos raios pós-cursor        | -       | Rayleigh               |
| Número de raios pós-cursor                            | $N_b$   | 4                      |

A Tabela 3.11 apresenta, a partir da modelagem *Ray-tracing*, o número médio obtido dos *clusters* para STA-STA e STA-AP para o ambiente “Sala de Conferência”.

Tabela 3.11: Número médio de *clusters* para o modelo de canal IEEE 802.11ad para o ambiente “Sala de Conferência” [1] [13]

| Tipo de <i>cluster</i>                          | Número de <i>clusters</i> para o sub-cenário STA-STA | Número de <i>clusters</i> para o sub-cenário STA-AP |
|---|--|---|
| Percurso LOS                                    | 1  | 1   |
| Reflexões de primeira ordem de paredes          | 4  | 4   |
| Reflexões de segunda ordem de 2 paredes         | 8  | 8   |
| Reflexão de primeira ordem do teto              | 1  | -   |
| Reflexões de segunda ordem de paredes e do teto | 4  | -   |

A perda de propagação para ambientes com visada pode ser obtida pela Equação de Friss:

$$PL_{LOS}[\text{dB}] = G_{TX}[\text{dBi}] + G_{RX}[\text{dBi}] + 20 \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (14)$$

onde  $PL_{LOS}$  é a perda de propagação do percurso LOS;  $G_{TX}$  é o ganho da antena transmissora e  $G_{RX}$ , da receptora;  $\lambda$  é o comprimento de onda de operação (Eq. (3));  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor.

O ganho dos percursos ou componentes NLOS do canal é representado por:

$$\beta_i[\text{dB}] = 20 \log_{10} \left( \frac{g_i \lambda}{4\pi(d + R)} \right) \quad (15)$$

onde  $\beta_i$  é o ganho do  $i$ -ésimo percurso;  $\lambda$  é o comprimento de onda;  $g_i$  é a perda por reflexão do  $i$ -ésimo percurso;  $d$  é a distância LOS entre o transmissor e o receptor e  $R$ , a distância NLOS.

## 4. MEDIÇÕES

No capítulo anterior, foram apresentados os modelos de propagação para ambientes *outdoor* e *indoor*, os principais parâmetros, além de dados obtidos de medições realizadas por diversos autores, como base de referência e estudo.

Conforme foi abordado ao longo do trabalho, as faixas de frequências de 28 GHz e 38 GHz, que compreendem as faixas de frequências em ondas milimétricas do espectro de frequências, mostraram-se ser extremamente vantajosas para ambientes *indoor*, pois irão permitir o alcance de altas taxas de dados, baixa latência e maiores larguras de banda, além de baixa perda por penetração em materiais comuns e, para ambientes *outdoor*, apresentam baixas perdas por absorção atmosférica e por absorção da molécula da água (gota de chuva). Ademais, o canal de propagação nestas faixas de frequências beneficia-se do efeito de reflexão, permitindo que o sinal se propague ao longo da distância, mesmo em locais sem visada.

Neste capítulo, serão apresentadas as medições da potência recebida nas faixas de frequências de 28 GHz e 38 GHz, em ambientes *indoor*, os cálculos dos principais parâmetros do canal de propagação nestas faixas de frequências e a análise comparativa dos resultados com os dados de referência apresentados no capítulo anterior.

### 4.1. Configuração das medições

As medições foram realizadas na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC – RJ), edifício Leme, 3º andar, nos meses de janeiro, fevereiro e outubro de 2019.

Buscou-se, então, elaborar um conjunto de cenários (ambientes) que tivessem certa similaridade com os cenários propostos dos modelos IEEE 802.15.3c e IEEE 802.11ad. Com base na descrição do modelo IEEE 802.15.3c, o

local das medições se enquadra no ambiente “Escritório” (Tabela 3.2), com carteiras, mesas e cadeiras, que contempla os modelos de canais 3 e 4 (MC3 e MC4 da Tabela 3.6). Em relação ao modelo IEEE 802.11ad, os cenários, que serão descritos a seguir, possuem características semelhantes ao ambiente “Sala de Conferência”.

Os equipamentos e instrumentos de medição utilizados nos 3 cenários estão reunidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Relação dos equipamentos e instrumentos de medição

| Equipamento   | Descrição  |
|---|--|
|   | <p><u>Antena Pasternack PE 9850/2F-20 [40]:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• antena tipo corneta;</li> <li>• modelo PE 9850/2F-20;</li> <li>• fabricante Pasternack;</li> <li>• <math>G = 20 \text{ dBi}</math>;</li> <li>• <math>f = 26,5 \text{ GHz}</math> a <math>40 \text{ GHz}</math>.</li> </ul>  |
|  | <p><u>Cabo RF Pasternack PE-360-100CM [42]:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• cabo RF;</li> <li>• modelo PE-360-100CM;</li> <li>• fabricante Pasternack;</li> <li>• <math>A = 2,47 \text{ dB}</math>, <math>f = 26 \text{ GHz}</math>;</li> <li>• <math>A = 3,19 \text{ dB}</math>, <math>f = 40 \text{ GHz}</math>;</li> <li>• <math>c = 100 \text{ cm}</math>.</li> </ul> |
|  | <p><u>Cabo RF Pasternack PE-361-100CM [41]:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• cabo RF;</li> <li>• modelo PE-361-100CM;</li> <li>• fabricante Pasternack;</li> <li>• <math>A = 2,4 \text{ dB}</math>, <math>f = 20 \text{ GHz}</math>;</li> <li>• <math>A = 3,61 \text{ dB}</math>, <math>f = 40 \text{ GHz}</math>;</li> <li>• <math>c = 100 \text{ cm}</math>.</li> </ul>  |

|   |  |
|---|--|
|    | <p><u>DC Block 50 <math>\Omega</math> 3 1089:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conector tipo <i>Block</i>;</li> <li>• Modelo: 3 1089;</li> <li>• Impedância: 50 <math>\Omega</math>;</li> <li>• A = 1,5 dB.</li> </ul>                             |
|    | <p><u>Adaptador V-K Anritsu 34VK50 [45]</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• adaptador conector V para conector K;</li> <li>• modelo 34VK50;</li> <li>• fabricante Anritsu;</li> <li>• A = 1,17 dB.</li> </ul>   |
|    | <p><u>Gerador de sinais MG3690 [43]:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• gerador de sinais de microondas;</li> <li>• fabricante Anritsu;</li> <li>• modelo MG3690;</li> <li>• f = 0,1 Hz a 67 GHz.</li> </ul>   |
|  | <p><u>Analizador de espectro Anritsu MS2668C [44]:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analizador de espectro;</li> <li>• fabricante Anritsu;</li> <li>• modelo MS2668C;</li> <li>• f = 9 KHz a 40 KHz;</li> <li>• Sensibilidade -100 dBm.</li> </ul> |

As medições foram registradas no programa Labview<sup>2</sup> (Fig.4.1).

<sup>2</sup> O LabVIEW é um programa da *National Instruments* que permite a leitura de medições, análises gráficas e testes.

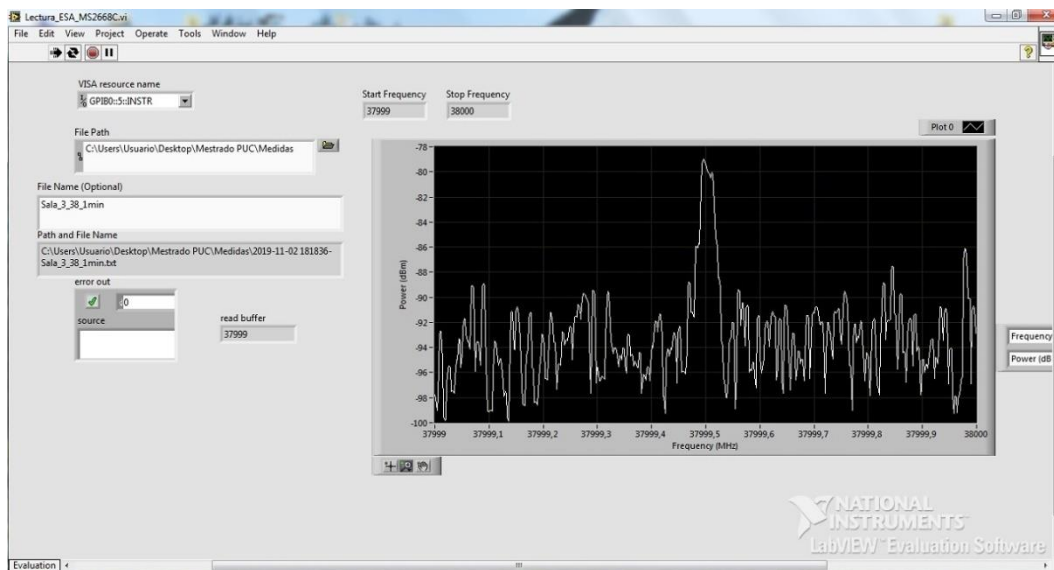


Figura 4.1: *Print* de uma medição registrada pelo Labview

Assim, as medições foram divididas em 3 conjuntos de medições, representados por 3 cenários, compreendendo as salas 324, 325, 328, 330, 332 e 336 do 3º andar do Bloco Leme e o corredor que as interliga, conforme Fig. 4.2. Todas as salas possuem carteiras, mesas e cadeiras, ilustradas nessa figura (a imagem não está em escala e não retrata a quantidade exata do mobiliário). Cada cenário está representado pelas setas indicativas descritas na legenda ao lado da imagem da Fig. 4.2. As salas se encontravam vazias (não havia pessoas), assim como o corredor.

Cada conjunto de medições, que corresponde a 1 cenário, foi dividido em 2 etapas: uma etapa para a faixa de frequência de 28 GHz e outra, para a faixa de 38 GHz, que serão detalhados nos próximos itens.



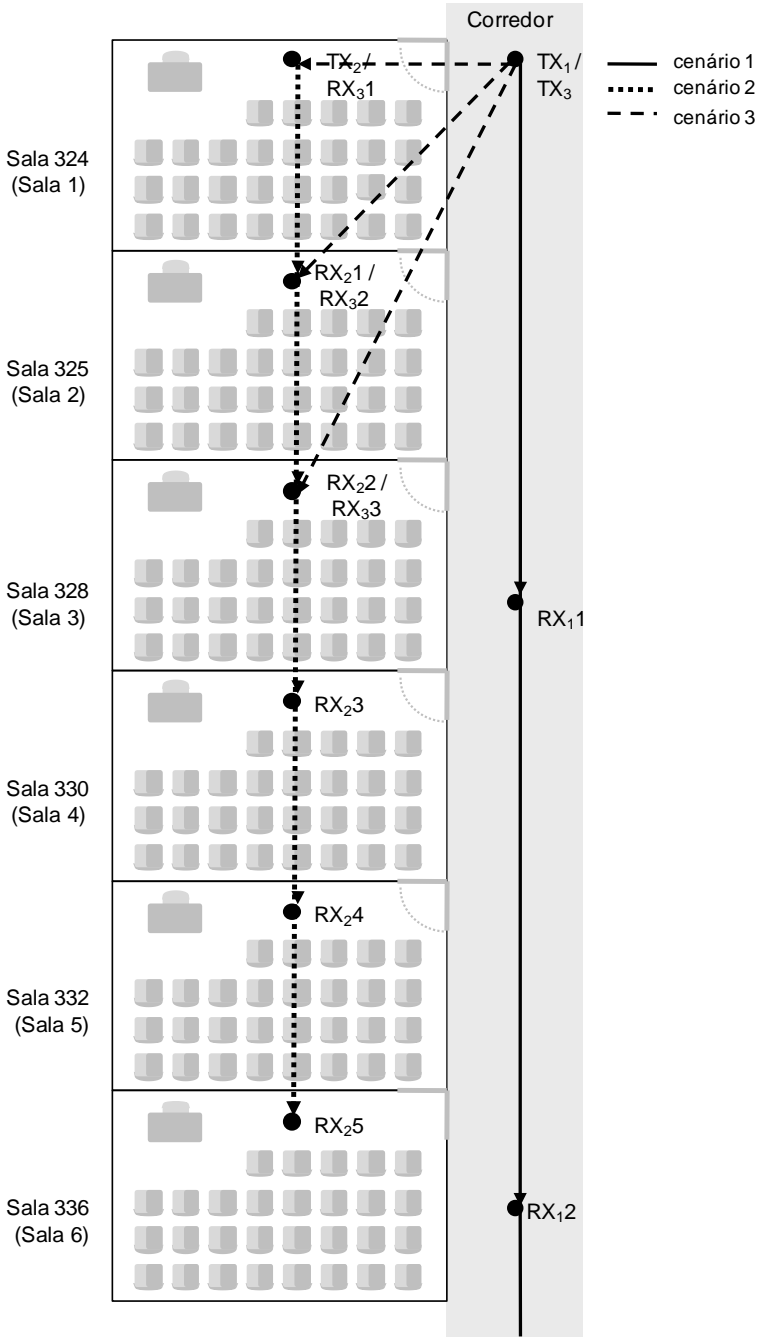


Figura 4.2: Configuração dos 3 cenários

O diagrama esquemático abaixo ilustra a configuração do sistema TX-RX, para os 3 cenários:

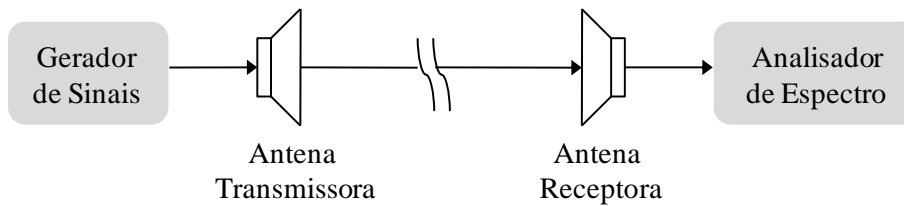


Figura 4.3: Diagrama esquemático

O sinal gerado pelo Gerador de Sinais (transmissor) é enviado à antena transmissora através de um cabo RF. A potência de transmissão foi configurada para 0 dBm para as 2 faixas de frequências de 28 GHz e 38 GHz, nos 3 cenários. Então, o sinal transmitido é recebido pela antena receptora e enviado ao analisador de espectro (receptor), pelo cabo RF. Na saída do gerador de sinais (*RF Output*) foi acoplado um adaptador para conector V-K e no analisador de espectro, um *block*, para impedir a passagem do nível DC para o cabo RF, na entrada “*RF Input 50Ω*”.

As medições foram registradas pelo programa Labview, através de um notebook conectado ao analisador de espectro (saída HDMI). Para todas as medições, as antenas transmissora e receptora foram afixadas sobre um tripé a 1,5 m do chão (1 tripé para cada antena), evitando quaisquer alterações angulares e instabilidade das 2 antenas. Os ângulos de elevação e de azimute não foram alterados, ambos permanecendo 0°, exceto no cenário 2 (item 4.1.2).

Para cada cenário, buscou-se acompanhar a evolução do sinal transmitido e os efeitos da perda de propagação sobre o canal de propagação ao longo da distância, em pontos com visada e sem visada, com e sem a presença de obstáculos, e a necessidade de ajuste dos ângulos de azimute a fim de permitir melhor alinhamento entre as antenas transmissora e receptora.

Com base nos parâmetros das antenas, da potência do transmissor, dos valores das distâncias entre as antenas transmissora e receptora e das medidas da potência recebida, além da atenuação induzida pelos cabos e conectores, é possível, então, calcular a perda de propagação pelo *link budget*, fazendo o balanceamento dos enlaces, de acordo com as características de configuração de cada cenário:

$$\begin{aligned}
 RSL_{Min}[\text{dBm}] &= EIRP[\text{dBW}] - L_P[\text{dB}] \\
 \underbrace{(PR - G_R + L_R)} &= \underbrace{(P_T + G_T - L_T)} - \underbrace{(PL + PP + B_L)}
 \end{aligned} \quad (16)$$

$$PR[\text{dBm}] = P_T[\text{dBm}] - L_T[\text{dB}] + G_T[\text{dBi}] + G_R[\text{dBi}] - L_R[\text{dB}] - L_P[\text{dB}] \quad (17)$$

onde  $RSL_{Min}$  é a sensibilidade do receptor,  $EIRP$  é a potência efetiva isotropicamente irradiada do transmissor;  $P_R$  é a potência recebida no receptor;  $P_T$  é a potência do transmissor;  $L_T$  é a perda dos cabos e conectores do transmissor;  $G_T$  é o ganho da antena transmissora;  $G_R$  é o ganho da antena receptora;  $L_R$  é a perda dos cabos e conectores do receptor; e  $L_P$  é a perda por percurso que contempla a perda de propagação ( $PL$ ), a perda por penetração ( $PP$ ) em objetos ou materiais e a perda relativa ao corpo humano ( $B_L$  - *Body Loss*).

Reescrevendo a Eq. (17), obtém-se  $PL$ :

$$\begin{aligned}
 PL[\text{dB}] &= P_T[\text{dB}] + G_T[\text{dBi}] - L_T[\text{dB}] - PR[\text{dBm}] + G_R[\text{dBi}] - L_R[\text{dB}] - \\
 &\quad PP[\text{dB}] - B_L[\text{dB}] \quad (18)
 \end{aligned}$$

Os dados dos parâmetros da Eq. (18) são:

$$P_T = 0 \text{ dBm};$$

$$G_T = G_R = 20 \text{ dBi};$$

$$L_T + L_R(f = 28 \text{ GHz}) = 7,61 \text{ dB};$$

$$L_T + L_R(f = 38 \text{ GHz}) = 9,47 \text{ dB}; \text{ e}$$

$$B_L = 0 \text{ dB (não havia pessoas nas salas nem no corredor)}.$$

Como estes valores são constantes para todos os enlaces, podemos agrupá-los em uma constante  $K$  para as faixas de frequência de 28 GHz e 38 GHz. Para o primeiro cenário, a perda por percurso será igual à perda de propagação ( $B_L = 0 \text{ dB}$  e  $PP = 0 \text{ dB}$ ); reescrevendo a Eq. (18), obtém-se  $PL$  para as faixas de frequência de 28 GHz e 38 GHz:

$$PL_{f=28\text{GHz}}[\text{dB}] = 32,39 - PR[\text{dBm}] \quad (19)$$

$$PL_{f=38\text{GHz}}[\text{dB}] = 30,53 - PR[\text{dBm}] \quad (20)$$

A fim de ratificar as perdas dos cabos e conectores a serem utilizados nas medições e, caso necessário, ajustar os cálculos dos parâmetros da caracterização do canal, o gerador de sinais foi ligado diretamente ao analisador de espectro, através dos 2 cabos descritos anteriormente, e acoplados a estes, o adaptador e o *block*, conforme Fig. 4.4. Assim, os valores medidos da potência recebida de 7,9 dB, na faixa de frequência de 28 GHz, e 8,45 dB, na faixa de frequência de 38 GHz, correspondem, neste caso, à perda total induzida ao canal pelos cabos e conectores.



Figura 4.4: Medição das perdas dos cabos e conectores

Cabe acrescentar, então, que a diferença entre os valores calculados da perda por percurso com base nos dados das especificações dos cabos e conectores e os valores medidos de 7,9 dB, na faixa de frequência de 28 GHz, e de 8,45, na faixa de 38 GHz, conforme apresentado no item 5.1. Portanto, a diferença de 0,29 dB, que corresponde a  $(L_T + L_R)_{teórico} - (L_T + L_R)_{medido}$ , deverá ser deduzida de

$PL$ , na faixa de frequência de 28 GHz, e a diferença de 1,02 dB deverá ser acrescida em  $PL$ , na faixa de frequência de 38 GHz. Assim, reescrevendo as Eq. (19) e (20):

$$PL_{medido_{f=28\text{GHz}}}[\text{dB}] = 32,1 - PR_{medido}[\text{dBm}] \quad (21)$$

$$PL_{medido_{f=38\text{GHz}}}[\text{dB}] = 31,55 - PR_{medido}[\text{dBm}] \quad (22)$$

As Eq. (21) e (22) serão utilizadas para o cálculo da perda de propagação do sinal nos cenários 1, 2 e 3, descritos a seguir.

#### 4.1.1. Cenário 1

No cenário 1, buscou-se analisar a evolução do sinal transmitido de acordo com a variação da distância, em um corredor longo, em pontos com visada (LOS), a cada 15 m, e em pontos sem visada (NLOS) entre as antenas transmissora e receptora.

Assim, a antena transmissora foi fixada no ponto TX, conforme Fig. 4.5, os pontos LOS foram fixados em RX1 em  $d_1 = 15$  m, RX2 em  $d_2 = 30$  m, RX3 em  $d_3 = 45$  m, RX4 em  $d_4 = 60$  m, RX5 em  $d_5 = 75$  e RX6 em  $d_6 = 90$  m. O ponto NLOS, RX7 corresponde ao ponto do corredor após a curva, onde a antena receptora foi apontada para o ponto de reflexão na parede, em  $d = 130$  m.

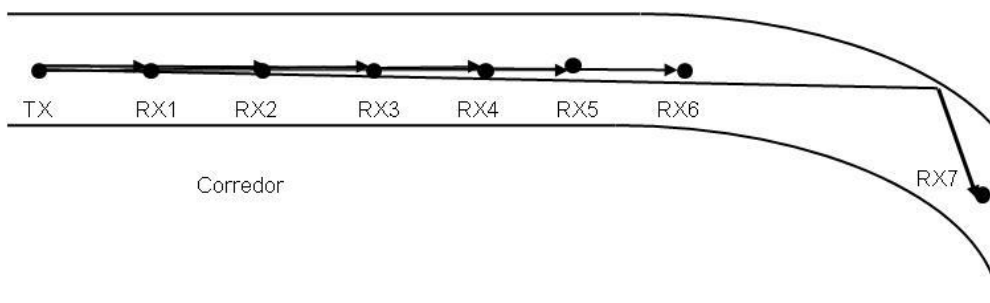


Figura 4.5: Configuração do Cenário 1

As medições foram registradas pelo analisador de espectro e gravadas no programa Labview. Cada medição teve a duração de 30 seg., ou seja, foram registradas 30 medições da potência recebida, permitindo a obtenção de seu valor médio e análise do espectro do sinal recebido, cuja representação gráfica será apresentada a seguir.



Figura 4.6: (A) Antena transmissora; (B) antena receptora posicionada no ponto 3

Os valores medidos da potência recebida estão agrupados na Tabela 4.2, de acordo com a distância:

Tabela 4.2: Potência recebida LOS e NLOS x distância

| LOS / NLOS | d [m]            |     | PR              | PR <sub>medido</sub> [dBm]<br>f = 28 GHz | PR <sub>medido</sub> [dBm]<br>f = 38 GHz |
|------------|------------------|-----|-----------------|--|--|
| LOS        | d <sub>RX1</sub> | 15  | PR <sub>1</sub> | -66,47                                   | -59,21                                   |
|            | d <sub>RX2</sub> | 30  | PR <sub>2</sub> | -65,21                                   | -61,92                                   |
|            | d <sub>RX3</sub> | 45  | PR <sub>3</sub> | -63,12                                   | -70,86                                   |
|            | d <sub>RX4</sub> | 60  | PR <sub>4</sub> | -68,65                                   | -63,35                                   |
|            | d <sub>RX4</sub> | 75  | PR <sub>5</sub> | -64,72                                   | -61,36                                   |
|            | d <sub>RX6</sub> | 90  | PR <sub>6</sub> | -67,94                                   | -84,32                                   |
| NLOS       | d <sub>RX7</sub> | 130 | PR <sub>7</sub> | -82,57                                   | -83,82                                   |

Assim, os valores da potência recebida, podem ser representados graficamente na Fig. 4.7, para a faixa de frequência de 28 GHz e na Fig. 4.8, na faixa de frequência de 38 GHz. Os gráficos foram gerados no programa Qti Plot<sup>3</sup>.

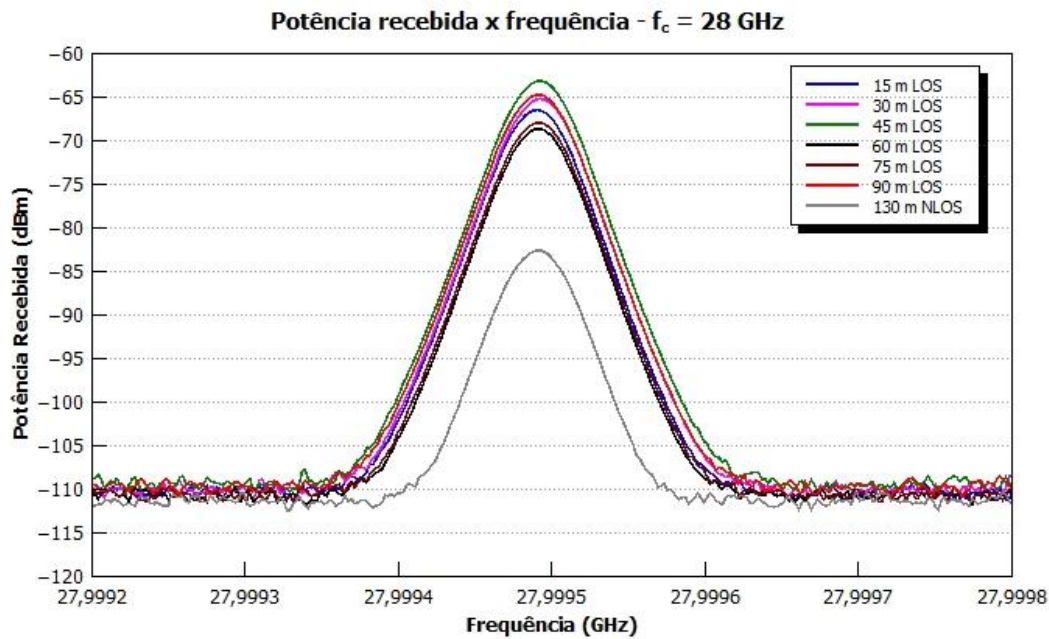


Figura 4.7: Resposta impulsiva do canal na faixa de frequência de 28 GHz

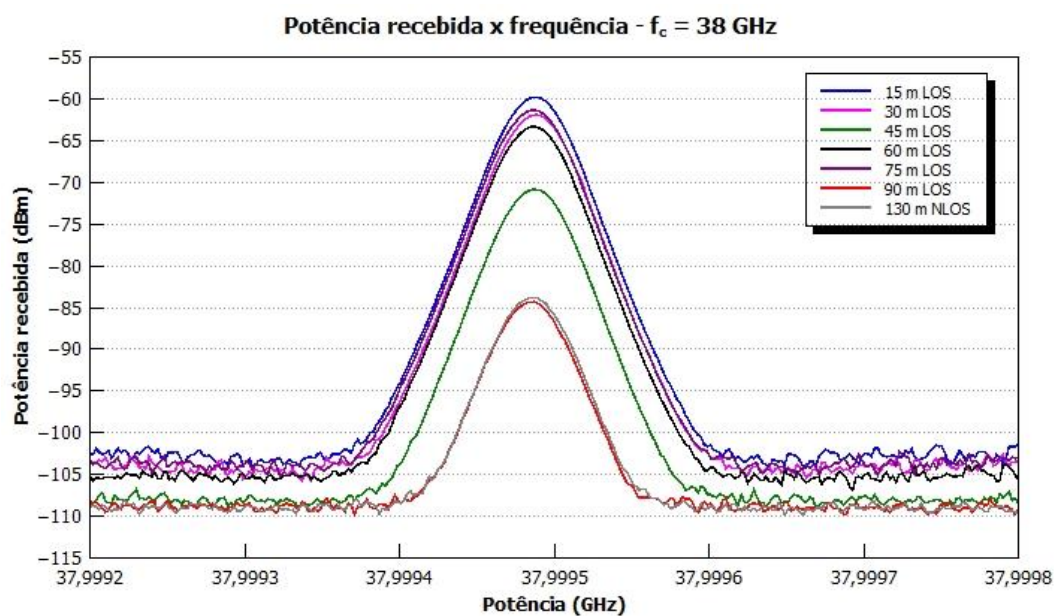


Figura 4.8: Resposta impulsiva do canal na faixa de frequência de 38 GHz

<sup>3</sup> O Qtiplot é um software livre (*open source*) para análise de dados e plotagem gráfica.

Os valores de  $PL$  do cenário 1, com base nas Eq. (21) e (22) estão reunidos na tabela abaixo, em complemento à Tabela 4.2:

Tabela 4.3: Perda de propagação x distância - cenário 1

| LOS / NLOS | d [m]     |     | $PL_{RX}$  | $PL_{medido}$ [dB] |            |
|------------|-----------|-----|------------|--------------------|------------|
|            |           |     |            | f = 28 GHz         | f = 38 GHz |
| LOS        | $d_{RX1}$ | 15  | $PL_{RX1}$ | 98,57              | 90,76      |
|            | $d_{RX2}$ | 30  | $PL_{RX2}$ | 97,31              | 93,47      |
|            | $d_{RX3}$ | 45  | $PL_{RX3}$ | 95,22              | 102,41     |
|            | $d_{RX4}$ | 60  | $PL_{RX4}$ | 100,75             | 94,9       |
|            | $d_{RX5}$ | 75  | $PL_{RX5}$ | 96,82              | 92,91      |
|            | $d_{RX6}$ | 90  | $PL_{RX6}$ | 100,04             | 115,87     |
| NLOS       | $d_{RX7}$ | 130 | $PL_{RX7}$ | 114,67             | 115,37     |

Ao longo do trabalho, foi enfatizado o efeito da reflexão na propagação das ondas milimétricas. Assim, no cenário 1, a propagação do sinal transmitido se dá por multipercurso, ou seja, os enlaces entre o transmissor e o receptor são compostos por múltiplos percursos, devido à presença de materiais reflexíveis ao longo do corredor, como quadro de avisos em madeira, armários de ferro, portas de madeira e as próprias laterais do corredor (de alvenaria). Logo, a potência recebida não segue uma ordem linear, se comparada à propagação no espaço livre, assim como a perda de propagação, representada por pontos aleatórios na Fig. 4.10, não segue uma ordem de linearidade.

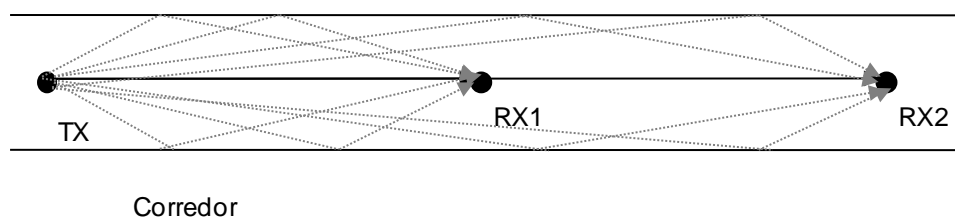


Figura 4.9: Propagação do sinal por multipercurso dos enlaces do cenário 1

Assim, a perda de propagação pode ser representada graficamente na Fig. 4.10, com base nos valores da Tabela 4.3:



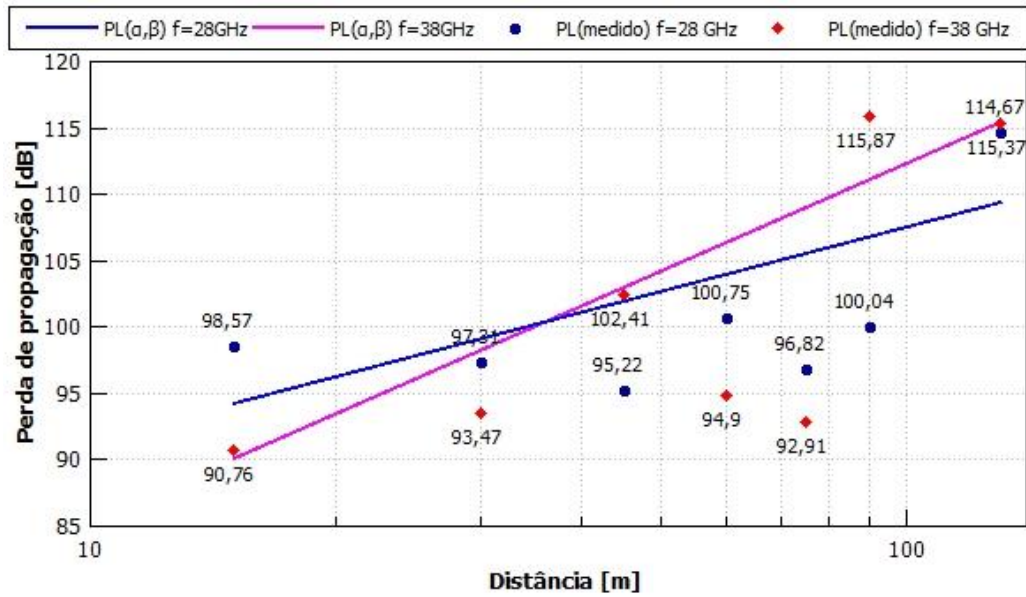


Figura 4.10: PL (medido) x distância para  $f = 28$  GHz e  $f = 38$  GHz

Segundo os pontos destacados de  $PL_{\text{medido}}$ , no gráfico da Fig 4.10 e a partir da função *Linear Fit* do programa Qti Plot (*Linear Fit* >>  $y = ax + b$ ), o modelo de propagação com base no ponto variável  $PL(\alpha, \beta)$ , apresentado no capítulo 3, pode ser determinado a partir da inclinação  $\beta$  da reta e do coeficiente linear  $\alpha$ .

Para a faixa de frequência de 28 GHz, os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  são  $\beta = 1,32$  e  $\alpha = 92,24$  e para a faixa de frequência de 38 GHz,  $\beta = 2,2$  e  $\alpha = 86,81$ . Logo, com base na Eq. (4),  $PL(\alpha, \beta)$  é:

$$PL(\alpha, \beta)_{f=28\text{GHz}}[\text{dB}] = 92,24 + 13,2 \log_{10}(d) + X_{\sigma}[\text{dB}] \quad (23)$$

$$PL(\alpha, \beta)_{f=38\text{GHz}}[\text{dB}] = 86,81 + 22 \log_{10}(d) + X_{\sigma}[\text{dB}] \quad (24)$$

A perda de propagação do cenário 1 também pode ser determinada a partir do modelo CI, conforme a Eq (1). Primeiramente, calcula-se o valor de  $n$  para a configuração do cenário 1, com base nos valores medidos da perda de propagação (Tabela 4.3), para as faixas de frequência de 28 GHz e 38 GHz, considerando  $X_{\sigma} = 0$ .

$$PL_{medido}[\text{dB}] = PL(d_0)[\text{dB}] + 10 n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right)$$

$$n = \frac{PL_{medido}[\text{dB}] - PL(d_0)[\text{dB}]}{10 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right)} \quad (25)$$

O valor do coeficiente da perda de propagação ( $n$ ) será a média dos valores obtidos [15] para cada valor de  $PL_{medido}$ . O valor de  $PL(d_0)$  é obtido a partir da Eq. (2). Para a faixa de frequência de 28 GHz, o valor de  $\bar{n}$  é 2,32 e para a faixa de 38 GHz,  $\bar{n}$  é 2,13; coerentes ( $n > 2$ ) para enlaces com reflexão em ambientes *indoor*. Assim, reescrevendo a Eq. (1), para as faixas de frequência de 28 GHz e 38 GHz, PL será:

$$PL^{CI}(d)_{f=28\text{GHz}}[\text{dB}] = 61,4 + 23,2 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}[\text{dB}] \quad (26)$$

$$PL^{CI}(d)_{f=38\text{GHz}}[\text{dB}] = 64,04 + 21,3 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}[\text{dB}] \quad (27)$$

Logo, a perda de propagação segundo o modelo CI pode ser representada no gráfico abaixo:

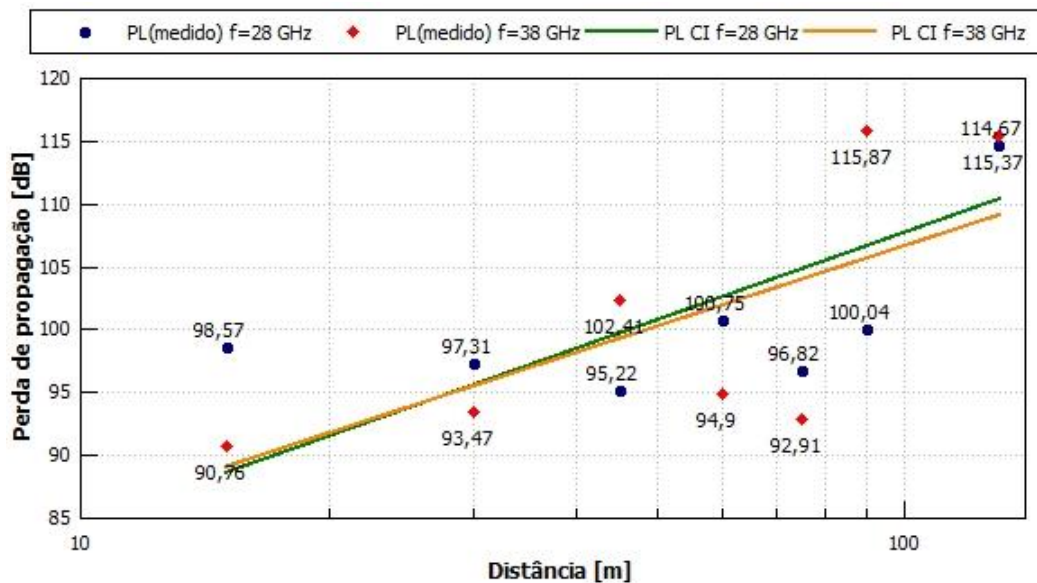


Figura 4.11: PL (CI) x distância para f = 28 GHz e f = 38 GHz

Como as frequências foram mantidas em 28 GHz e 38 GHz, a perda de propagação no cenário 1, cujas características estão de acordo com a Tabela 3.2, também pode ser descrita segundo o modelo IEEE 802.15.3c, suprimindo a parcela em função da frequência da Eq. (10). Então, com base nos valores calculados de  $n$  e na Eq. (2),  $PL(d, f)$  é igual a:

$$PL(d, f = 28 \text{ GHz})[\text{dB}] = 61,4 + 23,2 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}[\text{dB}] \quad (28)$$

$$PL(d, f = 38 \text{ GHz})[\text{dB}] = 64,04 + 21,3 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}[\text{dB}] \quad (29)$$

Os valores das perdas de propagação segundo os modelos CI,  $\alpha\beta$ , FSPL, além dos valores medidos, estão representados, graficamente, nas Fig. 4.12 e 4.13, para as faixas de frequência de 28 GHz e 38 GHz, respectivamente.

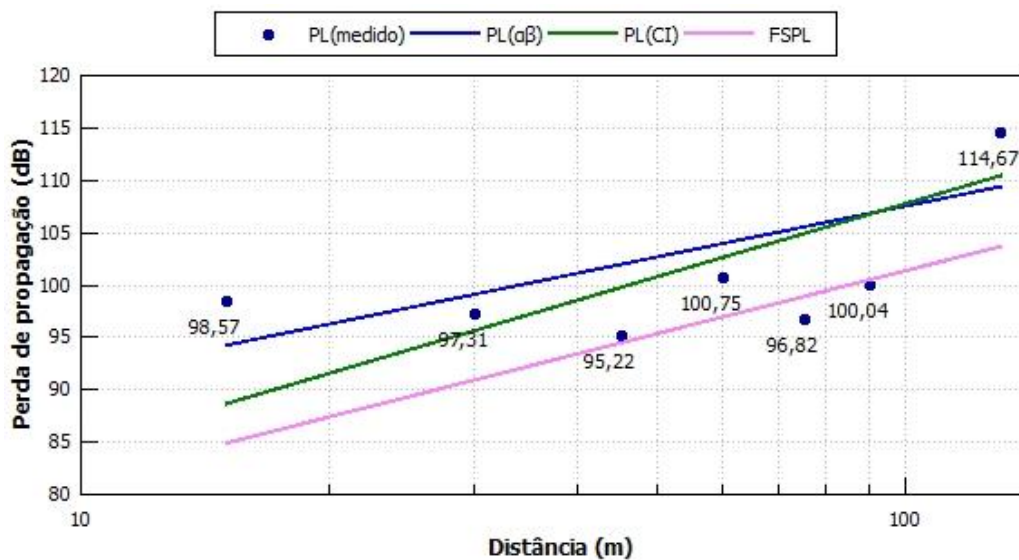


Figura 4.12: PL(medido), PL ( $\alpha\beta$ ), PL(CI) e FSPL, para a faixa de frequência de 28 GHz

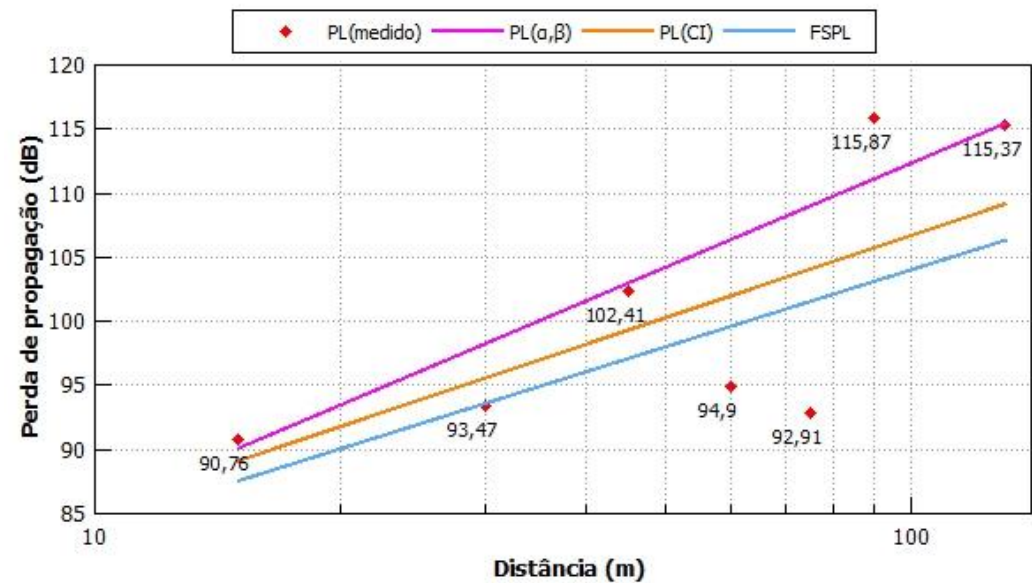


Figura 4.13: PL(medido),PL (α,β),PL(CI) e FSPL, para a faixa de frequência de 38 GHz

Os valores das perdas de propagação representados nos gráficos acima, segundo os modelos CI,  $\alpha \beta$ , FSPL, inclusive os valores medidos, estão reunidos na Tabela 4.4 para as faixas de frequência de 28 GHz e 38 GHz.

Tabela 4.4: Valores da perda de propagação – medido, FS, modelo CI e modelo  $\alpha\beta$ .

| d (m) | f = 28 GHz                |           |                           | f = 38 GHz                |          |                          |
|-------|---------------------------|-----------|---------------------------|---------------------------|----------|--------------------------|
|       | PL <sub>medido</sub> [dB] | FSPL [dB] | PL <sup>CI</sup> (d) [dB] | PL <sub>medido</sub> [dB] | FSPL[dB] | PL <sup>CI</sup> (d)[dB] |
| 15    | 98,57                     | 84,92     | 88,68                     | 90,76                     | 87,57    | 89,14                    |
| 30    | 97,31                     | 90,94     | 95,66                     | 93,47                     | 93,59    | 95,57                    |
| 45    | 95,22                     | 94,46     | 99,75                     | 102,41                    | 97,11    | 99,33                    |
| 60    | 100,75                    | 96,96     | 102,65                    | 94,9                      | 99,61    | 101,99                   |
| 75    | 96,82                     | 98,89     | 104,89                    | 92,91                     | 101,55   | 104,06                   |
| 90    | 100,04                    | 100,48    | 106,73                    | 115,87                    | 103,13   | 105,75                   |
| 130   | 114,67                    | 103,67    | 110,44                    | 115,37                    | 106,32   | 109,16                   |

4.1.2. Cenário 2

No cenário 2, a antena transmissora foi posicionada na sala 324 (sala 1), a 4 m da parede onde fica a porta; a antena receptora foi posicionada,

seqüencialmente, nas salas 325 (sala 2) a 6 m de TX, 328 (sala 3) a 13 m de TX, 330 (sala 4) a 20 m de TX e sala 332 (sala 5) a 27 m de TX (Fig. 4.15), ou seja, a cada 7 m (incluindo as paredes). Cada parede possui, aproximadamente, 38 cm de espessura. A antena receptora foi posicionada no sentido contrário à antena transmissora, à mesma distância da parede, conforme representado na Fig. 4.14.



Figura 4.14: Antena receptora posicionada na sala 2

O objetivo dessa configuração é observar o declínio da potência recebida, em virtude da presença de obstáculos (paredes) entre as salas. Logo, as medições foram divididas em 5 etapas correspondentes aos enlaces entre as salas 1 e 2, 1 e 3, 1 e 4 e 1 e 5, para as faixas de frequências de 28 GHz e 38 GHz cada etapa. A fim de obter a potência média recebida, a duração das medições para essa configuração foi 60 seg, que corresponde a 60 medições ou 1 amostra por segundo.

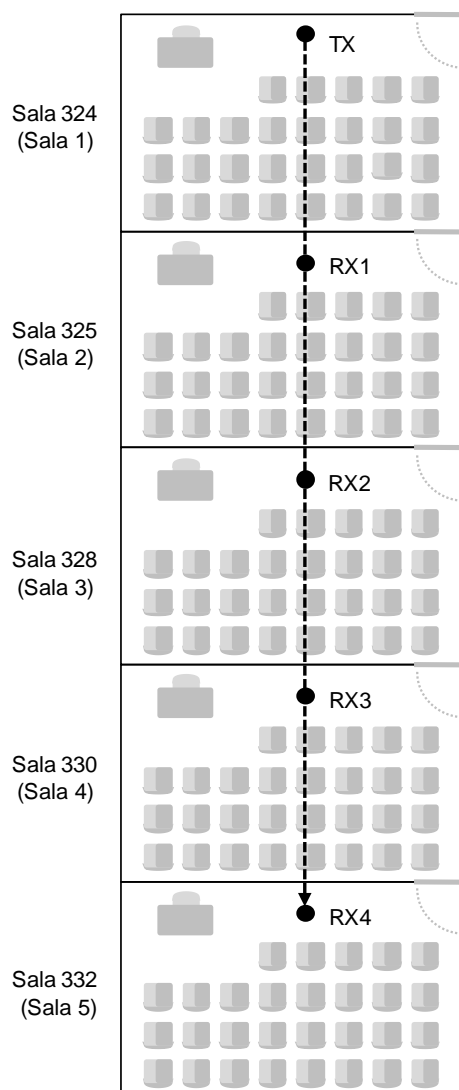


Figura 4.15: Configuração cenário 2

Observou-se que não havia sinal na sala 336, ou seja, não é possível a recepção do sinal acima de 27 m de distância e 5 paredes entre as salas, entre o receptor e o transmissor.

Ademais, na faixa de frequência de 28 GHz, o sinal recebido na sala 5 era instável e fraco. Já na faixa de 38 GHz, o sinal recebido na sala 4 era muito fraco e, na sala 5, não havia mais sinal. Tal fato se deve à sensibilidade do analisador de espectro, em torno de -100 dBm para as faixas de frequência de 28 GHz e 38 GHz. Para valores próximos da potência recebida a -90 dBm, a leitura do sinal recebido no analisador de espectro era instável, resultando em um sinal fraco. Para valores próximos a -100 dBm, já não havia mais sinal.

Complementarmente, o teto e o chão das salas funcionam como bases refletoras para o sinal, graças ao concreto, permitindo o confinamento do sinal e a propagação ao longo das salas. Apesar de haver carteiras, mesas e cadeiras nas salas, estas não obstruíram a direção do sinal transmitido, porém funcionam como pontos de reflexão devido à natureza do material: madeira e metal.

A Tabela 4.5 contém os valores medidos da potência recebida, para as faixas de frequências de 28 GHz e 38 GHz de cada etapa, além do n° de paredes entre as salas e a distância entre as antenas transmissora e receptora.

Tabela 4.5: Potência recebida x n° de paredes

| Enlace entre salas | N° de paredes | Distância [m] | PR <sub>medido</sub> [dBm]<br>f = 28 GHz | PR <sub>medido</sub> [dBm]<br>f = 38 GHz |
|--------------------|---------------|---------------|--|--|
| Enlace salas 1-2   | 1             | 6             | -55,86                                   | -60,42                                   |
| Enlace salas 1-3   | 2             | 13            | -61,54                                   | -77,22                                   |
| Enlace salas 1-4   | 3             | 20            | -85,99                                   | Sinal fraco                              |
| Enlace salas 1-5   | 4             | 27            | Sinal fraco                              | Sem sinal                                |

As paredes entre as salas induzem uma perda adicional de penetração (PP) sobre o canal. Para determinar a PP de cada enlace, de acordo com o n° de paredes e a distância entre TX e RX, primeiramente, determina-se a perda de propagação no espaço livre (*FSPL – Free Space Path Loss*) entre as antenas transmissora e receptora.

$$FSPL[\text{dB}] = 92,45 + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad (30)$$

onde *FSPL* é a perda de propagação no espaço livre; *f* é a frequência de operação, em GHz, e *d* é a distância entre as antenas transmissora e receptora, em km.

Reescrevendo a Eq. (30) para as faixas de frequência de 28 GHz e 38 GHz:

$$FSPL_{f=28\text{GHz}}[\text{dB}] = 121,39 + 20 \log(d) \quad (31)$$

$$FSPL_{f=38\text{GHz}}[\text{dB}] = 124,05 + 20 \log(d) \quad (32)$$

Segundo as Eq. (21) e (22), determina-se a PR para os enlaces na condição de propagação no espaço livre, para as 2 faixas de frequência:

$$PR_{FSf=28\text{GHz}}[\text{dBm}] = 32,1 - FSPL_{f=28\text{GHz}}[\text{dB}] \quad (33)$$

$$PR_{FSf=38\text{GHz}}[\text{dBm}] = 31,55 - FSPL_{f=38\text{GHz}}[\text{dB}] \quad (34)$$

Os valores da perda de propagação no espaço livre (FSPL) e da potência recebida ( $PR_{FS}$ ), nas faixas de frequência de 28 GHz e 38 GHz, estão reunidos na Tabela 4.6, de acordo com a distância entre TX e RX, e o n° de paredes entre as salas. Ressalta-se que na condição de espaço livre não há obstáculos, portanto não há perda de penetração.

Tabela 4.6: Perda no espaço livre e potência recebida - cenário 2

| Enlace entre salas | Distância (m) | N° de paredes | FSPL [dB]  |            | PR <sub>FS</sub> [dBm] |            |
|--------------------|---------------|---------------|------------|------------|------------------------|------------|
|                    |               |               | f = 28 GHz | f = 38 GHz | f = 28 GHz             | f = 38 GHz |
| TX-RX1             | 6             | 1             | 76,95      | 79,61      | -44,85                 | -48,06     |
| TX-RX2             | 13            | 2             | 83,67      | 86,33      | -51,57                 | -54,78     |
| TX-RX3             | 20            | 3             | 87,41      | -          | -55,31                 | -          |

A perda de penetração é obtida a partir da diferença entre a potência recebida na condição de propagação no espaço livre ( $PR_{FS}$  da Tabela 4.6) e a potência recebida na condição de propagação da configuração do cenário 2 ( $PR_{medido}$  da Tabela 4.5) [5].

$$PP [\text{dB}] = PR_{FS}[\text{dBm}] - PR_{medido}[\text{dBm}] \quad (35)$$

Assim, os valores de  $PL_{medido}$  estão agrupados na Tabela 4.7, conforme as Eq. (21) e (22) e a Tabela 4.6, para as faixas de frequência de 28 GHz e 38 GHz, respectivamente, além das perdas por penetração, para cada enlace e faixa de frequência.



Tabela 4.7: Perda de propagação x n° de paredes - cenário 2

| Enlace entre salas | Distância (m) | N° de paredes | PP [dB]    |            | PL <sub>medido</sub> [dB] |            |
|--------------------|---------------|---------------|------------|------------|---------------------------|------------|
|                    |               |               | f = 28 GHz | f = 38 GHz | f = 28 GHz                | f = 38 GHz |
| TX-RX1             | 6             | 1             | 11,01      | 12,36      | 87,96                     | 91,97      |
| TX-RX2             | 13            | 2             | 9,97       | 22,44      | 93,64                     | 108,77     |
| TX-RX3             | 20            | 3             | 30,68      | -          | 118,09                    | -          |

Constatou-se que a perda por penetração induzida pelas paredes entre as salas do cenário 2 interfere na propagação do sinal com o aumento do n° de paredes entre o transmissor e o receptor, além da variação da distância.

Pode-se afirmar, então, que a perda de penetração não depende somente do material do obstáculo; ou seja, a perda de penetração está associada ao conjunto formado pelo tipo de material e suas características (formato, espessura, densidade), quantidade do material ou objeto que compõe o obstáculo, à distância entre o transmissor e o receptor e às condições da medição. Logo, cada enlace TX-RX do cenário 2 corresponde a um sub-cenário, formado por  $x$  paredes entre TX e RX a uma distância  $d$ .

Diante disso, a perda por percurso do cenário 2 deverá considerar as perdas de penetração de cada enlace TX-RX. Primeiramente, de forma análoga ao cenário 1, determina-se o valor médio do coeficiente da perda de propagação ( $n$ ) para os enlaces TX-RX1, TX-RX2 e TX-RX3, a partir da Eq. (25). Os valores de  $\bar{n}$  para as faixas de frequência de 28 GHz e 38 GHz são, respectivamente, 3,56 e 3,8.

Com base na Eq. (1), determina-se a perda de propagação segundo o modelo CI, para as faixas de frequência de 28 GHz e 38 GHz.

$$PL^{CI}(d)_{f=28GHz}[\text{dB}] = 61,4 + 35,6 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}[\text{dB}] \quad (36)$$

$$PL^{CI}(d)_{f=38GHz}[\text{dB}] = 64,04 + 38 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}[\text{dB}] \quad (37)$$

Os valores de  $PL^{CI}$  estão agrupados na Tabela 4.8, considerando a perda de penetração de cada enlace TX-RX (Tabela 4.7).

Tabela 4.8: Perda de propagação modelo CI x n° de paredes - cenário 2

| Enlace entre salas | Distância[m] | N° de paredes | PP [dB]    |            | PL <sup>CI</sup> [dB] |            |
|--------------------|--------------|---------------|------------|------------|-----------------------|------------|
|                    |              |               | f = 28 GHz | f = 38 GHz | f = 28 GHz            | f = 38 GHz |
| TX-RX1             | 6            | 1             | 11,01      | 12,36      | 89,10                 | 93,61      |
| TX-RX2             | 13           | 2             | 9,97       | 22,44      | 101,06                | 106,40     |
| TX-RX3             | 20           | 3             | 30,68      | -          | 107,72                | -          |

Analogamente ao cenário 1, a perda de propagação no cenário 2 segundo o modelo IEEE 802.15.3c, não dependente da frequência (frequências mantidas em 28 38 GHz), e com base nos valores calculados de  $n$  e na Eq. (2) é igual a:

$$PL(d, f = 28 \text{ GHz})[\text{dB}] = 61,4 + 35,6 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}[\text{dB}] \tag{38}$$

$$PL(d, f = 38 \text{ GHz})[\text{dB}] = 64,04 + 38 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}[\text{dB}] \tag{39}$$

O gráfico da Fig. 4.16 representa a perda de propagação segundo o modelo CI (Tabela 4.8) e os valores obtidos a partir das medições (Tabela 4.7) para a faixa de frequência de 28 GHz.

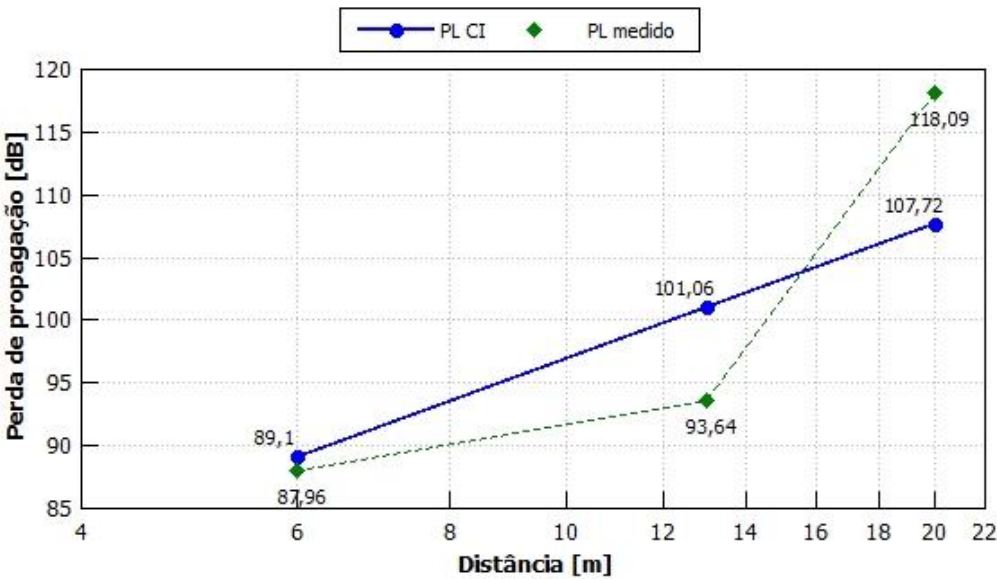


Figura 4.16: PL(medido)x PL(CI) - f = 28 GHz

Como não houve sinal captado para a distância de 20 m na faixa de frequência de 38 GHz, a perda de propagação não será representada graficamente.

Complementarmente, ao comparar a perda de penetração (PP) do enlace TX-RX1 onde há 1 parede entre as salas, na faixa de frequência de 28 GHz, observou-se que a PP de 11,01 dB é maior que a PP definida pelo autor Rappaport [1] para o obstáculo “parede”, de 6,8 dB em ambiente *indoor*, de acordo com a Tabela 3.2. Entretanto, este valor de perda de penetração foi obtido a partir de uma série de medições em condições diferentes (material da parede, local das medições, equipamentos) [1]; ou seja, este valor não se aplicaria à perda por percurso do enlace TX-RX1 segundo a configuração do cenário 2.

#### 4.1.3. Cenário 3

Neste cenário, a antena transmissora foi posicionada no corredor e a antena receptora, posicionada nas salas 1, 2 e 3, sequencialmente, conforme Fig. 4.17. Essa configuração permitiu observar a evolução do sinal do corredor para dentro das salas, passando pelas paredes, similar ao cenário 2, porém os ângulos de azimute das antenas transmissora e receptora foram ajustados até o ponto de alinhamento do enlace (melhor recepção do sinal transmitido).

Assim, as medições foram divididas em 3 etapas, para as faixas de frequências 28 GHz e 38 GHz cada, correspondentes aos enlaces entre o corredor e a sala 1, corredor e sala 2 e corredor e sala 3. Foi adicionada 1 etapa entre o corredor e a sala 1 com a porta (em madeira) aberta para diferenciar do enlace com a porta fechada (há uma parte da porta em vidro na direção do enlace). As medições, também, tiveram duração de 60 seg. (60 medições) para obtenção das potências médias recebidas de cada etapa.

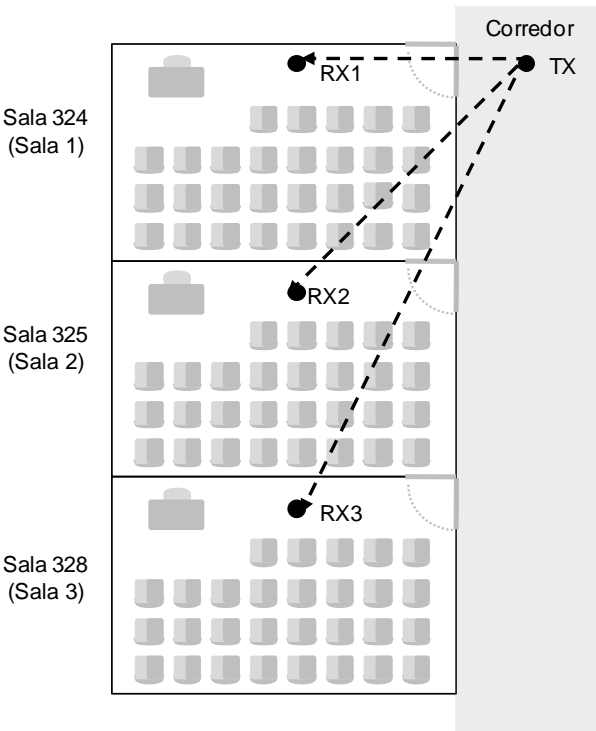


Figura 4.17: Configuração do Cenário 3

As medições da potência recebida de cada etapa encontram-se na Tabela 4.9, assim como o n° de paredes.

Tabela 4.9: Potência recebida do cenário 3 x n° de paredes

| Configuração enlace  | N° paredes | LOS / NLOS | PR <sub>medido</sub> [dBm]<br>f = 28 GHz | PR <sub>medido</sub> [dBm]<br>f = 38 GHz |
|--|------------|------------|--|--|
| Enlace corredor-sala 1<br>porta aberta<br>(TX-RX1 <sub>PA</sub> )  | -          | LOS        | -49,01                                   | -44,69                                   |
| Enlace corredor-sala 1<br>porta fechada<br>(TX-RX1 <sub>PF</sub> ) | -          | NLOS       | -53,35                                   | -57,99                                   |
| Enlace corredor-sala 2<br>(TX-RX2)                                 | 2          | NLOS       | *  | *  |
| Enlace corredor-sala 3<br>(TX-RX3)                                 | 3          |            | -92,78                                   | -85,01                                   |

\* Devido à existência de uma coluna de concreto na sala 2, o sinal foi praticamente bloqueado na direção do enlace.

Para o enlace entre o transmissor posicionado no corredor e o receptor na sala 3, foi necessário mover as antenas transmissora e receptora, devido à coluna

de concreto dentro da sala, colada à parede da porta; então, o ângulo de azimute da antena transmissora  $\phi_{TX}$  foi ajustado para  $18^\circ$  e da antena receptora  $\phi_{RX}$  para  $72^\circ$  e as distâncias TX-RX1 e TX-RX3 foram ajustadas para 4,65 m e 14,18 m, respectivamente.

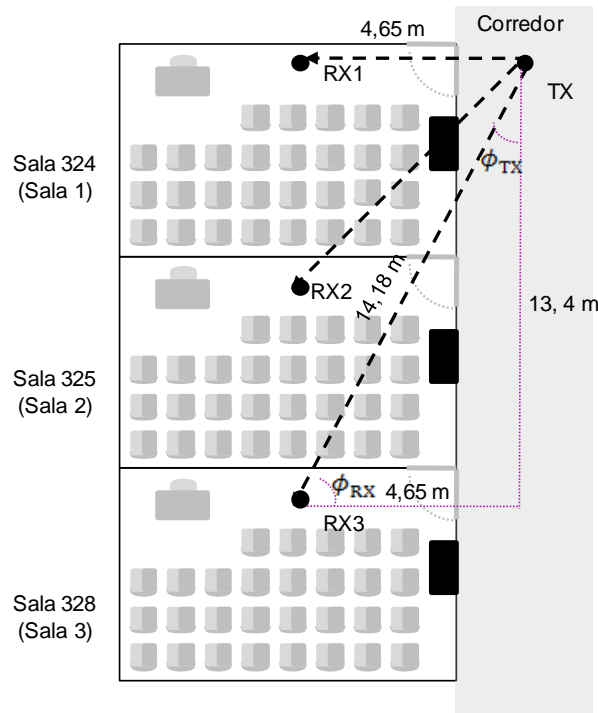


Figura 4.18: Alinhamento das antenas transmissora e receptora do cenário 3

Constatou-se uma diferença de 4,34 dB entre as potências recebidas ( $PR_{medida}$ ) do enlace TX-RX1 com a porta aberta e com a porta fechada, na faixa de frequência de 28 GHz, e de 13,3 dB, na faixa de frequência de 38 GHz. Essas diferenças correspondem à perda por penetração (PP) induzida pelo vidro de parte da porta, para cada faixa de frequência.

Assim, para o enlace TX-RX1, na faixa de frequência de 28 GHz e segundo a Eq. (21) e a Tabela 5.4, a perda de propagação com a porta aberta ( $PL_{PA}$ , sem obstáculos) é 81,11 dB e, para o enlace com a porta fechada ( $PL_{PF}$ ), é 85,45 dB. Na faixa de frequência de 38 GHz e de acordo com a Eq. (22), a  $PL_{PA}$  será 76,24 dB e  $PL_{PF}$ , 89,54 dB.



Figura 4.19: (A) Antena transmissora. (B) Enlace entre o corredor e a sala 1, com a porta aberta

Para o enlace TX-RX3, onde há 3 paredes entre o transmissor e o receptor a uma distância de 14,18 m, a condição de propagação é semelhante ao cenário 2; entretanto, o ângulo de incidência sobre as paredes irá influenciar na perda de penetração, além da distância entre o transmissor e o receptor e do n° de paredes ; então, a perda de penetração, compreende o conjunto das perdas das 3 paredes, formando um sub-ambiente.

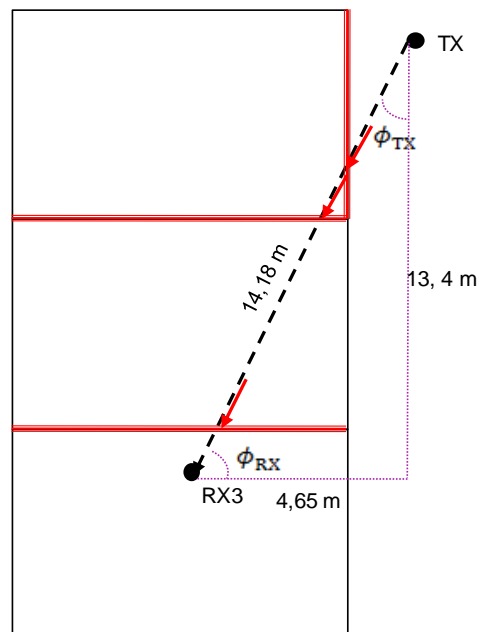


Figura 4.20: Detalhe do cenário 3 para o enlace entre TX e RX3

Para determinar a perda de penetração neste caso, determina-se a perda de propagação no espaço livre, de forma análoga ao cenário 2. Logo, os valores de FSL e de  $PR_{FS}$  estão reunidos na Tabela 4.10, com base nos dados da Tabela 4.9 e de acordo com as Eq. (29) e (31), para a faixa de frequência de 28 GHz, e Eq. (30) e (32), para a faixa de frequência de 38 GHz.

Tabela 4.10: Perda no espaço livre x potência recebida - enlace TX-RX3 do cenário 3

| Distância (m) | FSL [dB]   |            | $PR_{FS}$ [dBm] |            |
|---------------|------------|------------|-----------------|------------|
|               | f = 28 GHz | f = 38 GHz | f = 28 GHz      | f = 38 GHz |
| 14,18 m       | 87,08      | 100,19     | -54,98          | -68,64     |

Para a faixa de frequência de 28 GHz, segundo a Eq. (35) e a Tabela 4.9, PP será 37,80 dB e, para a faixa de frequência de 38 GHz, 18,37 dB.

Como os obstáculos são de naturezas diferentes, a configuração do cenário 3 será dividida em 2 partes: 3-A, que compreende os enlaces entre TX e RX1 com a porta fechada e com a porta aberta e  $0^\circ$  de ângulo de azimuth para ambas as antenas transmissora e receptora; e 3-B, que compreende o enlace entre TX e RX3, com a presença de paredes ao longo do enlace e ângulos de azimuth das antenas transmissora e receptora ajustados para  $72^\circ$  e  $18^\circ$ , respectivamente.

Assim sendo, os valores da perda de propagação do enlace TX-RX3, com base nos dados da Tabela 4.9 e de acordo com as Eq. (21) e (22), nas faixas de frequência de 28 GHz e 38 GHz, respectivamente, e da perda de penetração para cada enlace do cenário 3 estão agrupados na Tabela 4.11. Os valores de PL do enlace TX-RX1 também estão inseridos na referida tabela.

Tabela 4.11: Perda de propagação x obstáculos - cenário 3

| CENÁRIO 3 - A                              | Obstáculo | Distância [m] | PP [dB]    |            | $PL_{medido}$ [dB] |            |
|--|-----------|---------------|------------|------------|--------------------|------------|
|  |           |               | f = 28 GHz | f = 38 GHz | f = 28 GHz         | f = 38 GHz |
| TX-RX1 - PA<br>TX $0^\circ$ – RX $0^\circ$ | -         | 4,65          | -          | -          | 81,11              | 76,24      |
| TX-RX1 - PF<br>TX $0^\circ$ – RX $0^\circ$ | Vidro     | 4,65          | 4,34       | 13,3       | 85,45              | 89,54      |
| <b>CENÁRIO 3 - B</b>                       |           |               |            |            |                    |            |
| TX-RX3<br>TX $72^\circ$ – RX $18^\circ$    | 3 paredes | 14,18         | 37,80      | 16,37      | 124,88             | 116,56     |

De forma análoga, a perda por percurso no terceiro cenário deverá considerar as perdas de penetração do vidro, no enlace TX-RX1 com a porta fechada, e das 3 paredes, no enlace TX-RX3.

A partir da Eq. (25) e da Tabela 4.11, obtém-se os valores médios de  $n$ . Para a faixa de frequência de 28 GHz,  $\bar{n}$  é 4,02 e, para a faixa de 38 GHz,  $\bar{n}$  é 2,82. Contudo, os enlaces do TX-RX1 e TX-RX3 são diferentes: são obstruídos por materiais diferentes. Dessa forma,  $\bar{n}$  não pode ser aplicado aos 2 enlaces. Logo, a perda de propagação, segundo o modelo CI (Eq. (1)), para a faixa de frequência de 28 GHz, será:

$$PL_{TX-RX1_{PA}}^{CI}(d)_{f=28GHz}[\text{dB}] = 61,4 + 29,6 \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}[\text{dB}] \quad (40)$$

$$PL_{TX-RX1_{PF}}^{CI}(d)_{f=28GHz}[\text{dB}] = 61,4 + 36,1 \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}[\text{dB}] \quad (41)$$

$$PL_{TX-RX3}^{CI}(d)_{f=28GHz}[\text{dB}] = 61,4 + 55,1 \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}[\text{dB}] \quad (42)$$

E para a faixa de frequência de 38 GHz, PL será:

$$PL_{TX-RX1_{PA}}^{CI}(d)_{f=38GHz}[\text{dB}] = 64,04 + 18,3 \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}[\text{dB}] \quad (43)$$

$$PL_{TX-RX1_{PA}}^{CI}(d)_{f=38GHz}[\text{dB}] = 64,04 + 38,2 \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}[\text{dB}] \quad (44)$$

$$PL_{TX-RX1_{PA}}^{CI}(d)_{f=38GHz}[\text{dB}] = 64,04 + 45,6 \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}[\text{dB}] \quad (45)$$

Os valores de  $n$  estão reunidos na tabela a seguir, em complemento aos dados da Tabela 4.12.



Tabela 4.12: Perda de propagação (medido), perda de penetração e fator de perda de propagação do cenário 3

| CENÁRIO 3 - A                | Obstáculo | Distância [m] | f = 28 GHz |         |                           | f = 38 GHz |         |                           |
|------------------------------|-----------|---------------|------------|---------|---------------------------|------------|---------|---------------------------|
|                              |           |               | $n$        | PP [dB] | PL <sub>medido</sub> [dB] | $n$        | PP [dB] | PL <sub>medido</sub> [dB] |
| TX-RX1 - PA<br>TX 0° – RX 0° | -         | 4,65          | 2,96       | -       | 81,11                     | 1,83       | -       | 76,24                     |
| TX-RX1 - PF<br>TX 0° – RX 0° | Vidro     | 4,65          | 3,61       | 4,34    | 85,45                     | 3,82       | 13,3    | 89,54                     |
| <b>CENÁRIO 3 - B</b>         |           |               |            |         |                           |            |         |                           |
| TX-RX3<br>TX 72° – RX 18°    | 3 paredes | 14,18         | 5,51       | 37,80   | 124,88                    | 4,56       | 18,37   | 116,56                    |

Nota-se que o valor de  $n$  para o enlace TX-RX3 é maior do que os demais enlaces, para as 2 faixas de frequência, em virtude da maior perda de penetração.

Adicionalmente, apesar da similaridade com o cenário 2, em relação à presença de paredes entre o transmissor e o receptor no enlace TX-RX3, a perda por percurso sofre influência da alteração dos ângulos de azimuth das antenas transmissora e receptora.

Em comparação ao enlace TX-RX4 do cenário 2 (Tabela 4.13), nota-se que a perda de penetração é maior, ainda que a distância entre as antenas transmissora e receptora seja menor, com a mesma quantidade de paredes entre as antenas, e, conseqüentemente, a perda por percurso é maior.

As perdas de penetração e de propagação dos enlaces TX-RX3 do cenário 3 e de TX-RX4 do cenário 2, na faixa de frequência de 28 GHz, estão reunidos na Tabela abaixo.

Tabela 4.13: Cenário 2 x Cenário 3

| Enlace entre salas | Distância [m] | N° de paredes | PP <sub>f = 28 GHz</sub> [dB] | PP <sub>f = 38 GHz</sub> [dB] |
|--------------------|---------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|
| TX-Rx4 cenário 2   | 20,00         | 3             | 30,68                         | 118,09                        |
| TX-RX3 cenário 3   | 14,18         | 3             | 37,80                         | 124,88                        |

Ratifica-se, então, que a configuração do ambiente (distância entre as antenas transmissora e receptora, posicionamento das antenas, característica do

obstáculo) e as condições de medição exercem influência na perda de penetração e, por conseguinte, no canal de propagação.

## 5. CONCLUSÃO

### 5.1. Conclusões

Este trabalho procurou mostrar a viabilidade da propagação do sinal em ondas milimétricas, em ambientes *outdoor* e *indoor*. A partir de medições realizadas em ambientes *indoor*, nas faixas de frequências de 28 GHz e 38 GHz, foi possível comparar os resultados com dados de referência de estudos publicados e ratificar a viabilidade da propagação do sinal.

A perspectiva do uso das faixas em ondas milimétrica para a Quinta Geração de comunicações móveis concentrou a atenção por parte de organizações e grupos técnicos no desenvolvimento de modelos de propagação de canal adequados às ondas milimétricas. Em complemento à necessidade de padronização do canal de propagação, alguns desafios quanto ao uso de faixas de frequências mais altas precisam ser superados a fim de permitir menor latência, maior largura de banda e altas taxas de dados.

Ao decorrer do trabalho, foram mencionados os efeitos sobre as ondas milimétricas, como as perdas induzidas ao canal pela propagação do sinal ao longo da distância, perdas por absorção atmosférica e pela molécula da água.

Em contrapartida, as ondas milimétricas se beneficiam do efeito da reflexão, permitindo a propagação do sinal por multipercurso. Este fato foi observado durante as medições em um longo corredor (cenário 1), em que os valores da potência recebida não seguiam uma ordem linear em pontos com visada e, no ponto sem visada, apesar da distância ser maior, a recepção do sinal foi possível devido à reflexão.

O modelo PL ( $\alpha, \beta$ ), aplicado ao canal de propagação do cenário 1, delimita o comportamento do sinal à uma reta, a partir de pontos de medições aleatórios da potência recebida; enquanto o modelo CI descreve a perda de propagação de forma linear.

Como o modelo CI apresentou o comportamento linear, este também foi aplicado ao cenário 2. Desta forma, o modelo CI mostrou-se ser o mais adequado aos cenários para a determinação da perda de propagação.

Ademais, em ambos cenários 1 e 2, em que não houve alteração das faixas de frequências, mantendo-se fixas em 28 GHz e 38 GHz em cada etapa de medição, a perda de propagação segundo o modelo IEEE 802.15.3c apresentou-se ser similar ao modelo CI para cenários não dependentes da frequência.

Nos cenários 2 e 3, a limitação do alcance do sinal é decorrente da perda de penetração induzida ao canal de propagação pelas paredes entre as salas. Constatou-se que a perda de penetração depende das condições da propagação do sinal (ambiente, distância entre as antenas transmissora e receptora, alinhamento das antenas) e das características do obstáculo (tipo, quantidade, densidade).

Complementarmente, constatou-se uma pequena diferença ao comparar os valores medidos da perda de propagação no cenário 2 com os valores obtidos a partir do modelo da perda de propagação CI. Ademais, este modelo de propagação para ambientes *indoor* mostrou-se ser o mais adequado para este cenário, pois considera os parâmetros referentes à caracterização do ambiente e do obstáculo.

Em relação ao cenário 3, para o enlace em que foi necessário ajustar o ângulo de azimute das antenas transmissora e receptora, também foi aplicado o modelo da perda de propagação CI para análise comparativa da perda de propagação, porém houve a necessidade de complementar a análise com os dados dos ângulos de incidência sobre os obstáculos (paredes) ao comparar com os resultados do cenário 2, onde os ângulos de azimute não foram alterados.

Em resumo, o canal de propagação nas faixas de frequência de ondas milimétricas está sujeito a múltiplas variações, de acordo a configuração do ambiente e das condições de transmissão e recepção do sinal. Modelos de propagação adequados para cada tipo de ambiente servirão como ferramentas na implementação de novas redes e novos serviços em comunicações móveis.

## 5.2. Trabalhos Futuros

A complementação deste trabalho seria a realização de medições em pontos distintos nas salas onde foram realizadas as medições do cenário 2, a fim de observar e analisar o comportamento do sinal e a influência dos raios refletidos.

Adicionalmente, poderiam ser realizadas medições em ambientes *indoor* que permitissem a análise da propagação do sinal ao variar os ângulos de azimute tanto na antena transmissora quanto na receptora, em pontos com visada e sem visada; e, com base nessas medições, aplicar o modelo de propagação de canal adequado a esta configuração.

Em complemento a estas propostas, poderiam ser realizadas medições em ambientes *outdoor*, contemplando cenários com chuva, com índices pluviométricos diferentes (chuva fraca e chuva forte), com a presença de obstáculos, folhagem e pessoas, além de locais com distâncias diferentes, a fim de permitir a análise comparativa com modelos de propagação do canal para ambientes *outdoor*.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 RAPPAPORT, Theodore S.; Jr. Heath, Robert W.; Daniels, Robert C.; Murdock, James N. ***Millimeter Wave Wireless Communications***. 1st. ed., England: Prentice Hall, *Communications Engineering and Emerging Technologies Series*, 2014.
- 2 RAPPAPORT, Theodore S.; Sun, Shu; Mayzus, Rimma; Zhao, Hang; Azar, Yani; Wang, Kevin; Wong, George N.; Schulz, Jocelyn K.; Samimi, Mathew; Gutierrez, Felix. ***Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!*** IEEE, p. 335-349, England, 2013.
- 3 GUTTMAN, Erik; Mademann, Frank; Prasad, Arnand. ***Journal of ICT Standardization***. Volume 6, nº. 1–2, River Publishers, Janeiro e Maio de 2018.
- 4 RAPPAPORT, Theodore S.; Sun, Shu; Shaf, Mansoor. ***Investigation and Comparison of 3GPP and NYUSIM Channel Models for 5G Wireless Communications***. IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Inglaterra, 2017.
- 5 RAPPAPORT, Theodore S.; Sun, Shu; Zhao, Hang; Gutierrez, Felix; Mayzus, Rimma; Samimi, Mathew; K. Schulz, Jocelyn; Azar, Yaniv; Wang, Kevin; Wong, George N. ***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)*. Inglaterra, 2013.
- 6 YONG, Su-Khiong. ***TG3c Channel Modeling Sub-committee Final Report***. IEEE P802.15. Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs). Revisão. Março de 2007.
- 7 RAPPAPORT, Theodore S. ***A Millimeter Wave Future: The Renaissance of Wireless Communications***. Nova York. Novembro de 2016.
- 8 AL-SAMMAN, Ahmed M. A.; Rahman, TharekAbd; Azmi, Marwan Hadri. ***Indoor Corridor Wideband Radio Propagation Measurements and Channel Models for 5G Millimeter Wave Wireless Communications at 19 GHz, 28 GHz, and 38 GHz Bands***. *Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing*. Volume 2018, Article ID 6369517, 12 páginas. Malásia. Março de 2018.

- 9 ZHAO, Hang; Mayzu, Rimma; Sun, Shu; Samimi, Mathew; Schulz, Jocelyn K.; Azar, Yaniv; Wang, Kevin; Wong, George N.; Gutierrez, Felix, Jr.; Rappaport, Theodore S. **28 GHz Millimeter Wave Cellular Communication Measurements for Reflection and Penetration Loss in and around Buildings in New York City**. 2013 IEEE International Conference on Communications. Nova York. Junho de 2013.
- 10 RAPPAPORT, Theodore S.; Murdock, James N.; Gutierrez, Felix. **State of the Art in 60-GHz Integrated Circuits and Systems for Wireless Communications**. Vol. 99, n° 8. Texas, EUA. Agosto de 2011.
- 11 MACCARTNEY JR., George R. ; Zhang, Junhong; Nie, Shuai; Rappaport, Theodore S. **Omnidirectional Channel Models for mmWave Communications in New York City**. 2014 IEEE Personal, Indoor and Mobile Communications Conference. Washington, EUA. Setembro de 2014.
- 12 RAPPAPORT, Theodore S.; Murdock, James N; Qiao, Y. **38 GHz and 60 GHz Angle-Dependent Propagation for Cellular & Peer-to-Peer Wireless Communications**. 2012 IEEE International Conference on Communications. Páginas 4568 a 4573. Junho de 2012.
- 13 MALTSEV, Alexander; Erceg, Vinko; Perahia, Eldad; Hansen, Chris; Maslennikov, Roman; Lomayev, Artyom; Sevastyanov, Alexey; Khoryaev, Alexey. **Channel Models for 60 GHz WLAN Systems**. IEEE P802.11. doc.: IEEE 802.11-09/0334r8. Maio de 2010.
- 14 RAPPAPORT, Theodore S.; Xing, Yunchou; Xing; Maccartney Jr., George R.; Andreas, Molisch F.; Mellios, Evangelos; Zhanh, Jianhua. **Overview of Milimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wirelless Networks-with a focus on Propagation Models**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Special Issue on 5G. Novembro de 2017.
- 15 SAMIMI, Mathew K.; Rappaport, Theodore S. **3-D Milimeter-Wave Statiscal Channel Model for 5G Wirelless System Design**. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 64, n° 7. Julho de 2016.
- 16 ANDREEV, Dennis. **Overview of ITU-T activities on 5G/IMT-2020**. ITU-T SG11. Suíça, julho de 2017.
- 17 ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS NO BRASIL. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=314474&assuntoPublicacao=null&caminhoRel=null&filtro=1&documentoPath=314474.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2019.

- 18 ANATEL COMPROVA INTERFERÊNCIA DE 5G NA BANDA C DE TV VÍA SATÉLITE. Disponível em <<http://nextvbrasil.com/anatel-comprova-interferencia-de-5g-na-banda-c-de-tv-via-satelite/>> Acesso em 25 out. 2019.
- 19 **Relatório dos Testes de Convivência entre o IMT operando na Faixa de 3,5 GHz e Sistemas Satelitais operando em Faixa Adjacente.** Agência Nacional de Telecomunicações. Julho de 2019.
- 20 ANTENAS *BEAMFORMING*. Disponível em: <<https://www.edn.com/electronics-blogs/5g-waves/4459612/The-top-5-5G-wireless-technologies->>. Acesso em: 14 fev. 2018.
- 21 ANTENAS *MIMO*. Disponível em: <[http://www.sharetechnote.com/html/5G/5G\\_MassiveMIMO\\_FD\\_MIMO.html](http://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_MassiveMIMO_FD_MIMO.html)>. Acesso em: 15 fev. 2018.
- 22 *MIMO*. Disponível em: <<http://www.telecomhall.com/br/o-que-e-mimo.aspx>>. Acesso em: 03 fev. 2018.
- 23 NOÇÕES BÁSICAS 5G. Disponível em: <[http://www.teleco.com.br/5g\\_tecnologia.asp](http://www.teleco.com.br/5g_tecnologia.asp)>. Acesso em: 14 jan. 2018.
- 24 *THE MOBILE ECONOMY 2019*. Disponível em: <<https://www.gsmaintelligence.com/research/?file=b9a6e6202ee1d5f787cfebb95d3639c5&download>>. Acesso em: 24 set. 2019.
- 25 *THE 5G ERA: AGE OF BOUNDLESS CONNECTIVITY AND INTELLIGENT AUTOMATION*. Disponível em: <<https://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2018/08/2017-02-27-0efdd9e7b6eb1c4ad9aa5d4c0c971e62.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2018.
- 26 *SPECTRUM FOR WIRELESS BROADBAND – 5G*. Disponível em: <<https://www.cept.org/ecc/topics/spectrum-for-wireless-broadband-5g>>. Acesso em: 09 set. 2018.
- 27 *WHAT IS 5G? EVERYTHING YOU NEED TO KNOW – A DEFINITION*. Disponível em: <<https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/what-is-5g/>>. Acesso em: 09 set. 2018.
- 28 *KEY ELEMENTS FOR 5G NETWORKS*. Disponível em: <<https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/key-elements-5g-network/>>. Acesso em: 28 ago. 2018.
- 29 *UNDERSTANDING 5G: PERSPECTIVES ON FUTURE TECHNOLOGICAL ADVANCEMENTS IN MÓBILE*. Disponível em: <<https://www.gsmaintelligence.com/research/?file=141208-5g.pdf&download>>. Acesso em: 28 ago. 2018.



- 30 *5G SPECTRUM POSITIONS*. Disponível em: <<https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2019/02/5G-Spectrum-Positions-InfoG.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2018.
- 31 *HOW IS 5G DIFFERENT FROM 4G LTE?* Disponível em: <<https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/how-is-5g-different-from-4g-lte/>>. Acesso em: 28 ago. 2018.
- 32 *5G STANDARDS: WHAT YOU NEED TO KNOW*. Disponível em: <<https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-standards/>>. Acesso em: 28 ago. 2018.
- 33 *SOUTH KOREA WRAPS 5G AUCTION FOR 3.5, 28 GHZ*. Disponível em: <<https://www.fiercewireless.com/wireless/south-korea-wraps-5g-auction-for-3-5-28-ghz>>. Acesso em: 28 set. 2018.
- 34 *THE WRC SERIES – 26 GHZ AND 28 GHZ*. Disponível em: <<https://www.gsma.com/spectrum/resources/26-ghz-28-ghz/>>. Acesso em: 28 set. 2018.
- 35 *THE ROAD TO 5G DEPLOYMENT*. Disponível em: <<http://apps.cept.org/eccnews/sep-2017/>>. Acesso em: 30 set. 2018.
- 36 *GSMA WRC Series: Considerations for the 3.5 GHz IMT Range: Getting Ready for USE*. GSMA. Inglaterra, maio de 2017.
- 37 *Mobile IoT in The 5G Future - NB-IoT and LTE-M in the Context of 5G*. GSMA. Inglaterra, Maio de 2018.
- 38 *WORLD RADIOCOMMUNICATION CONFERENCE 2019 (WRC-19), SHARM EL-SHEIKH, EGYPT, 28 OCTOBER TO 22 NOVEMBER 2019*. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2019/Pages/default.aspx>>. Acesso em 17 nov. 2019.
- 39 *QTM052 MMWAVE ANTENNA MODULES*. Disponível em: <<https://www.qualcomm.com/products/qtm052-mmwave-antenna-modules>>. Acesso em 28 ago. 2018.
- 40 *PE9850-2F-20 - WR-28 Waveguide Standard Gain Horn Antenna Operating From 26.5 GHz to 40 GHz With a Nominal 20 dB Gain 2.92mm Female Input. Datasheet*. Pasternack. 2017.
- 41 *PE-361-100CM- 2.92mm Male to 2.92mm Female Test Cable 100 CM Length Using PE-P160 Coax, RoHS. Datasheet*. Rev. 1.2. Pasternack. 2017.

- 42 ***PE-360-100CM- 2.92mm Male to 2.92mm Female Test Cable 100 CM Length Using PE-P160 Coax, RoHS. Datasheet.*** Rev. 1.2. Pasternack. 2017.
- 43 ***MG3690B - RF/Microwave Signal Generators - 0.1 Hz to 67 GHz/325 GHz. Datasheet.*** 11410-00344 Rev. B. Anritsu. Abril de 2005.
- 44 ***MS 668C - Spectrum Analyzer - 9 kHz to 40 GHz (18 GHz to 110 GHz).*** *Datasheet.* MS2668C-E-A-1-(7.00). Anritsu. Japão. Setembro de 2009.
- 45 ***Precision RF & Microwave Components. Datasheet.*** 11410-00235. Rev. Anritsu. Estados Unidos. Maio de 2019.
- 46 ***NUMBER OF SMARTPHONE USERS WORLDWIDE FROM 2016 TO 2021.*** Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide>> Acesso em 04 dez. 2019.
- 47 ***5G: THE NEXT GENERATION OF MOBILE CONNECTIVITY.*** Disponível em: <<https://www.visualcapitalist.com/5g-next-generation-mobile-connectivity>> Acesso em 04 dez. 2019.