



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

JAKSON MATOS CORREA

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE PENETRAÇÃO
EM EDIFICAÇÕES DE ALVENARIA
NA FAIXA DE FREQUÊNCIA 1 (FR1)**

NITERÓI

2024

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

JAKSON MATOS CORREA

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE PENETRAÇÃO EM
EDIFICAÇÕES DE ALVENARIA NA FAIXA DE
FREQUÊNCIA 1 (FR1)**

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

Orientador:

Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos

Coorientadora:

Leni Joaquim de Matos

NITERÓI

2024

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

C824a Correa, Jakson Matos
Avaliação da Perda de Penetração em Edificações de Alvenaria na Faixa de Frequência 1 (FR1) / Jakson Matos Correa. - 2024.
66 p.: il.

Orientador: Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos.
Coorientador: Leni Joaquim de Matos.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2024.

1. Propagação de sinais (Engenharia de Telecomunicações).
2. Produção intelectual. I. Gonzalez Castellanos, Pedro Vladimir, orientador. II. Matos, Leni Joaquim de, coorientadora. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD - XXX

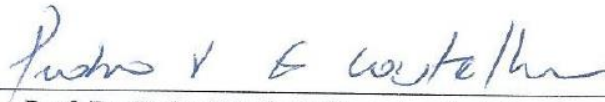
Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

JAKSON MATOS CORREA

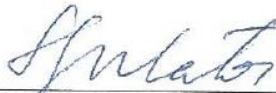
AVALIAÇÃO DA PERDA DE PENETRAÇÃO EM EDIFICAÇÕES DE
ALVENARIA NA FAIXA DE FREQUÊNCIA 1 (FR1)

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

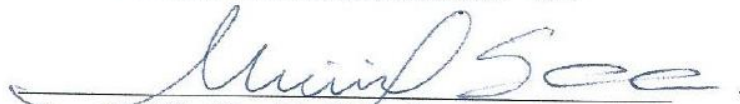
BANCA EXAMINADORA



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



Prof. Dr. Leni Joaquim de Matos - Coorientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Maurício Weber Benjó Da Silva
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Leonardo Henrique Gonsioroski Furtado da Silva
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA



Documento assinado digitalmente

LEONARDO HENRIQUE GONSIOROSKI FURTADO

Data: 11/09/2024 00:47:43-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Niterói

Setembro de 2024

*Dedico a minha avó, por todo o esforço que realizou em vida para que eu tivesse
oportunidade de estudar.*

Agradecimentos

Agradeço especialmente a professora Leni e ao Professor Pedro por toda atenção, disponibilidade e ensinamento para que este trabalho fosse possível. Aos professores do PPGEET/UFF por todo o conhecimento que me foi passado através das disciplinas que cursei. Também agradeço a todos que contribuíram para que este trabalho fosse possível.

Resumo

O planejamento da cobertura de um sistema de comunicação móvel pessoal não está somente limitado às áreas externas num determinado ambiente de propagação, as edificações devem também ser levadas em conta para fornecer um serviço confiável aos usuários. Esta dissertação se destina a contribuir na avaliação da perda de penetração em edificações na faixa de frequência 1 (FR1), que é de grande importância para planejar o serviço móvel celular. Com os dados obtidos na dissertação espera-se poderem ser utilizados para aprimorar os projetos de cobertura nessa faixa de frequência. A construção de alvenaria é um cenário típico utilizado nas residências brasileiras das grandes cidades. Na faixa FR1 são selecionadas algumas frequências entre 1,4 GHz e 5,9 GHz, onde é avaliada a perda de penetração em 4 cenários diferentes, é utilizada uma antena direcional da transmissão e na recepção são utilizadas duas antenas, uma direcional e outra omnidirecional. Os resultados obtidos da perda de penetração são comparados com o modelo apresentado na recomendação ITU-R P. 2109-1 onde se observa que o modelo é aderente para algumas frequências. O resultado deste trabalho é relevante para orientar a implementação eficiente da nova rede móvel 5G, que considera a faixa FR1 a faixa inicial de uso desta tecnologia, também o uso de técnicas avançadas, como antenas direcionais e MIMO, para melhorar a cobertura e a capacidade das redes.

Palavras-chaves: FR1, ITU-R P. 2109-1, 5G, Modelo de propagação, Perda de penetração.

Abstract

The planning of coverage for a personal mobile communication system is not only limited to outdoor areas in each propagation environment; buildings must also be taken into account to provide reliable service to users. This dissertation aims to contribute to the evaluation of penetration loss in buildings within Frequency Range 1 (FR1), which is important for cellular mobile service planning. The data obtained from this study are expected to help improve coverage design in this frequency range. Masonry buildings, typical of Brazilian homes in large cities, are used as the analysis scenario. In FR1, frequencies between 1.4 GHz and 5.9 GHz are selected, and penetration loss is evaluated across four different scenarios, using a directional antenna for transmission. For reception, two antennas are used: one directional and one omnidirectional. The penetration loss results are compared with the model presented in ITU-R P. 2109-1, where it is observed that the model aligns with certain frequencies. The outcome of this work is relevant for guiding the efficient implementation of the new 5G mobile network, which considers the FR1 range as the initial band for this technology. Additionally, advanced techniques, such as directional antennas and MIMO, are employed to enhance network coverage and capacity.

Keywords: FR1, ITU-R P. 2109-1, 5G, Propagation Model, Penetration Loss.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Evolução das redes móveis [3]	3
Figura 1.2: Comparação entre a rede 4G e 5G [3].....	4
Figura 1.3: Frequências altas usadas pelo 5G vão possibilitar grandes capacidades [5].....	8
Figura 2.1: Sinal de RF na recepção, submetido a múltiplos fatores de atenuação [13].....	18
Figura 4.1: Diagrama de blocos da metodologia.....	28
Figura 4.2: Ganhos das antenas transmissora e receptora.	29
Figura 4.3: Diagrama de radiação 1710 MHz. [25].....	30
Figura 4.4: Diagrama de radiação 2500 MHz. [25].....	30
Figura 4.5: Diagrama de blocos do sistema transmissor-receptor.....	33
Figura 4.6: Montagem das antenas transmissora (Tx) e receptora (Rx).....	35
Figura 4.7: Parede de alvenaria para medição da perda de penetração outdoor x indoor, com a antena de Rx.....	35
Figura 4.8: Antena omni e parede de sala para avaliação da perda de penetração indoor. .	36
Figura 4.9: Cenário 1.....	36
Figura 4.10: Cenário 2.....	37
Figura 4.11: Cenário 3.....	37
Figura 4.12: Cenário 4.....	38
Figura 4.13: Perda de Penetração nos cenários escolhidos.	39
Figura 4.14: Comparação da perda de penetração para $P = 0,5$	41
Figura 4.15: Comparação da perda de penetração para $P = 0,90$	41
Figura 4.16: Comparação da perda de penetração para $P = 0,95$	42

Lista de Tabelas

Tabela 1: Resumo dos principais desafios de requerimento para os casos de uso [3]	6
Tabela 2: Coeficiente de perda no percurso [10].....	23
Tabela 3: Coeficientes do modelo do ITU para construção tradicional	27
Tabela 4: Ganho das Antenas	31
Tabela 5: Ganho das Antenas nas Frequências de Teste	31
Tabela 6: Ganho da antena Omni RX I-ATO5-380/6000	32
Tabela 7: Comparação da Perda Teórica com a Experimental no Espaço Livre.	34
Tabela 8: Perda de Penetração com RX Direcional	38
Tabela 9: Perda de Penetração com RX Omnidirecional	39
Tabela 10: Comparação da Perda de Penetração em Prédios.....	40

Lista de Abreviaturas e Siglas

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
5G	5ª Geração de telefonia móvel celular
BEL	<i>Building Entry Loss</i>
eMMB	<i>enhanced mobile broadband</i>
ERB	Estação Rádio Base
f.d.p.	função densidade de probabilidade
HF	<i>High Frequency</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IMT-2020	<i>International Mobile Telecommunications-2020</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LoS	<i>Line of Signal</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
mMTC	<i>massive machine-type communication</i>
OTT	<i>One-Trip Time</i>
PPGEET	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica de de Telecomunicações
QoE	<i>Quality of Experience</i>
RBW	Resolution Bandwidth
RF	<i>Radio Frequency</i>
RRT	<i>Round-Trip Time</i>
URLLC	<i>Ultra-Reliable and Low-Latency Communication</i>

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Sistemas de Quinta Geração e Requerimentos	1
1.2	Requerimentos e principais indicadores de desempenho	4
1.3	Frequências, espectro e ondas milimétricas	6
1.4	Justificativa e Objetivos	9
1.5	Estrutura do Trabalho	10
2	Conceituação Teórica	11
2.1	Considerações Iniciais	11
2.2	Mecanismos de Propagação.....	12
2.2.1	Visada Direta	12
2.2.2	Reflexão.....	12
2.2.3	Espalhamento.....	13
2.2.4	Difração.....	14
2.3	Propagação no Espaço Livre	14
2.4	Caracterização do Canal Faixa Estreita e Faixa Larga.....	16
2.5	Variabilidade (Desvanecimento) do Sinal	16
2.5.1	Variabilidade em pequena escala.....	17
2.5.2	Variabilidade em grande escala	18
2.6	Perda no Percurso (<i>Path Loss</i>)	18
2.7	Comportamento Estático do Sinal Rádio Móvel	19
3	Modelos de Predição do Sinal.....	20
3.1	Considerações Iniciais	20
3.2	Categorias de Modelos de Predição	21
3.2.1	Modelos determinísticos.....	21

3.2.2 Modelos empíricos	21
3.2.3 Modelos semiempíricos	22
3.3 Modelo Log-distance	22
3.4 Recomendação ITU-R P.2109.....	24
3.4.1 Classificação do tipo de edificação	25
3.4.2 Formulação do Modelo	25
4 Metodologia	28
4.1 Sistema de medição.....	28
4.2 Ganhos das Antenas	29
4.3 Determinação do campo distante da transmissora.....	32
4.4 Perda de Penetração do Sinal	33
4.5 Considerações Finais	40
5 Conclusão	43
Bibliografia.....	45
Anexo A – DRG0013	48
Anexo B – DRG0012.....	51

1 Introdução

A busca constante pela melhoria dos meios de comunicação em banda larga demandou o surgimento de novas tecnologias com o objetivo de atender a real necessidade de seus usuários. O uso de mobilidade no acesso à Internet banda larga impõe a necessidade de se estudar com mais profundidade os parâmetros que caracterizam um canal rádio móvel. Uma predição de cobertura bem elaborada favorece o uso eficiente do espectro de frequência, e este é um aspecto chave para dar vazão ao aumento expressivo das densidades de usuários. Como resultado das campanhas de medições, são identificados modelos do canal que possibilitam aos projetistas definirem os melhores critérios para a implantação de uma rede móvel de acesso sem fio.

A presente dissertação traz o comportamento da perda de propagação de algumas frequências na faixa de frequência 1 (FR1) que abrangem de 450 MHz até 6 GHz observada nos materiais de construção de alvenaria. Essa faixa de frequência é de interesse para utilização na tecnologia de 5ª geração (5G) de telefonia móvel celular, ela também pode ser utilizada para outros serviços de comunicação móvel como, 2G, 3G, 4G, Wi-Fi entre outros. Entender o comportamento da perda devida aos materiais de construção irá ajudar e elaborar modelos de propagação mais eficientes para o planejamento da cobertura móvel celular.

1.1 Sistemas de Quinta Geração e Requerimentos

A tecnologia 5G trata de uma unificação da conectividade que vai conectar, virtualmente, os serviços ao nosso redor. Essa conectividade se dará através fortalecimento do serviço de banda larga móvel, *enhanced Mobile Broadband* (eMBB), e serviços de missão crítica, como Internet das Coisas, IoT (*Internet of Things*), bem como serviços ainda não completamente conhecidos nos dias de hoje [1]. O 5G pode ser visto como uma plataforma para futuras inovações que é desenhada com novos níveis de flexibilidade e escalabilidade, que serão os combustíveis para inovações nos serviços móveis.

O desenvolvimento comercial do 5G foi início direcionado para serviços de eMBB, direcionada para consumidores com *smartphones*, que é a principal tecnologia que os consumidores estão dispostos a pagar mais. Existe uma expectativa de que seja gerado

negócios superiores a 12 trilhões de dólares até 2035 como toda a transformação que vai ser gerada em nossa sociedade, produzida por essa nova tecnologia, segundo estudo econômico produzido pela *Qualcomm* [1]. Os três casos mais frequentes de uso que são: eMBB, *massive machine-type communication* (mMTC) e *ultra-reliable and low-latency communication* (URLLC).

A busca constante pela melhoria dos meios de comunicação em banda larga demandou o surgimento de novas tecnologias que visam atender a real necessidade de seus usuários. O uso de mobilidade no acesso à Internet banda larga impõe a necessidade de se estudar com mais profundidade os parâmetros que caracterizam um canal rádio móvel. Tais parâmetros são, em geral, obtidos experimentalmente através de medições em um ambiente urbano. Como resultado das campanhas de medições, é possível implementar modelos do canal que possibilitam aos projetistas definirem os melhores critérios para a implantação de uma rede móvel de acesso sem fio. Assim, a caracterização do canal rádio móvel é essencial para o desenvolvimento dos sistemas de comunicações de qualquer tecnologia de comunicação sem fio, minimizando custos de planejamento e implementação. Além disso, a predição de cobertura de sinal bem elaborada favorece o uso eficiente do espectro de frequência, que é um aspecto chave para dar vazão ao aumento expressivo da densidade de usuários. Para tal, faz-se necessário o conhecimento da perda de penetração do sinal rádio nos diversos tipos de construção. Com este fim, esta dissertação estuda o comportamento da perda de penetração do sinal rádio em algumas frequências na faixa FR1, observada nos materiais de construção de alvenaria. Essa faixa de frequência é de interesse para utilização na tecnologia de 5ª geração (5G) de telefonia móvel celular, sendo que ela pode ser utilizada para outros serviços de comunicação móvel como, 2G, 3G, 4G, Wi-Fi entre outros. Entender o comportamento da perda devida aos materiais de construção irá ajudar e elaborar modelos de propagação mais eficientes para o planejamento da cobertura móvel celular.

O 5G é composto por diversas tecnologias que são a base do seu funcionamento e que são publicadas nos *releases* do *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), que é uma organização composta por vários órgãos de padronização. No IMT-2020 foram lançadas as bases do que seriam 5G para implementação a partir de 2020 [2]. Na visão da tecnologia 5G, o acesso à informação e o compartilhamento aos dados devem ser possíveis em qualquer local a qualquer tempo para qualquer pessoa e/ou coisa. Tal tecnologia expande o uso dos sistemas de comunicações móveis, comunicações que atualmente estão centradas nas comunicações entre pessoas para uma comunicação onde os diversos dispositivos irão se

comunicar. As comunicações móveis sem fio vão crescer para se tornar o caminho primário para seres humanos e máquinas acessarem informação e serviço [3]. Isto vai liderar mudanças socioeconômicas ainda não imaginadas, que incluem o aumento na produtividade, sustentabilidade, entretenimento e bem-estar [3].

Para tornar essa visão uma realidade, as capacidades do sistema do sistema 5G devem se estender além dos sistemas das gerações anteriores, que deve exibir grande flexibilidade, superior à das gerações anteriores, e uma integração, que não inclui somente a tradicional rede de acesso, mas também o núcleo da rede, as camadas de transporte e aplicação [3]. Isso vai requerer pensar de um novo caminho para a rede de acesso, a arquitetura de rede e aplicações. Na figura 1.1 e na figura 1.2, respectivamente, são apresentadas a evolução das redes móveis, os objetivos do 5G e um comparativo entre as redes 4G e 5G.

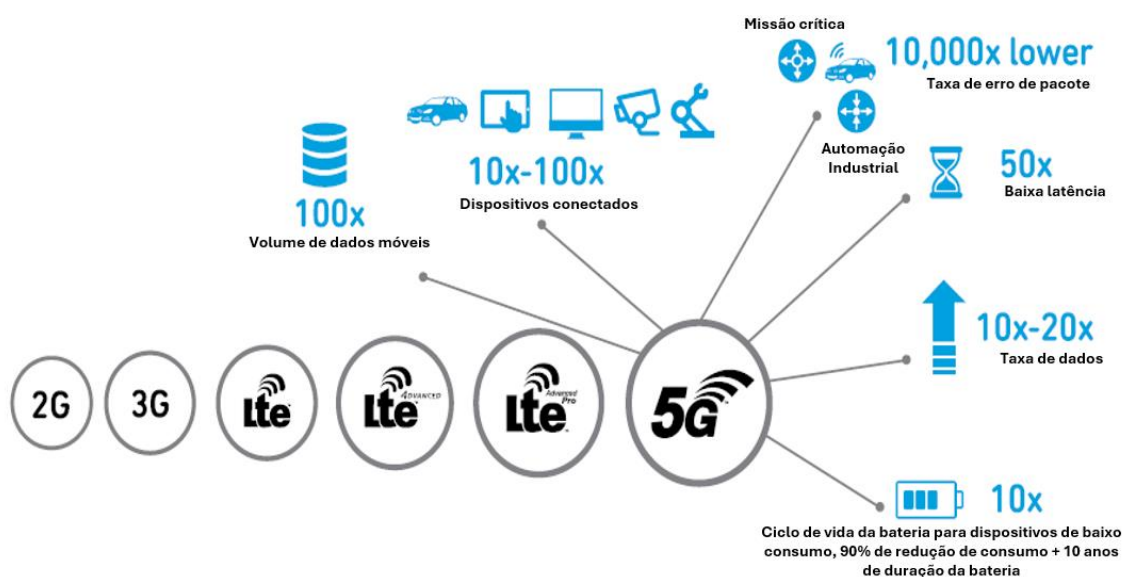


Figura 1.1: Evolução das redes móveis [3]

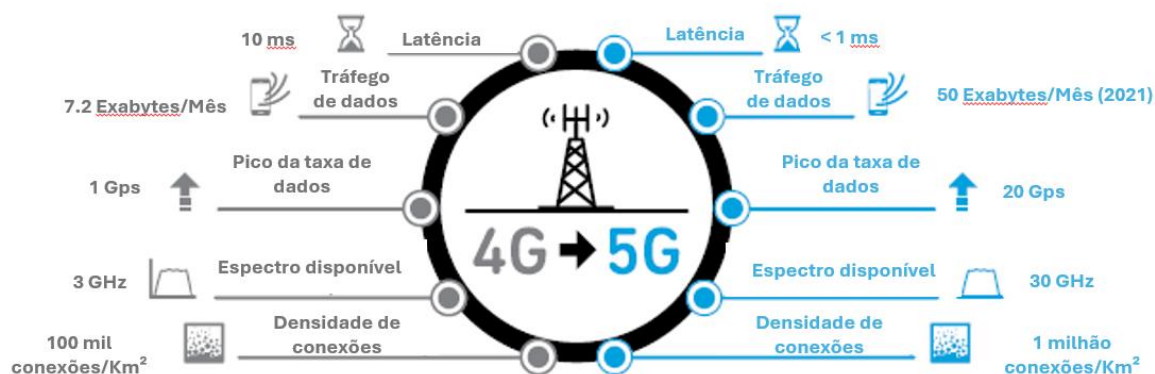


Figura 1.2: Comparação entre a rede 4G e 5G [3]

1.2 Requerimentos e principais indicadores de desempenho

Nesta secção, são apresentados um resumo dos principais requerimentos dos casos de uso e uma breve descrição dos indicadores de desempenho para o 5G [4]:

- **Disponibilidade:** É definido como o percentual de usuários ou *links* de comunicação, dentro de uma área geográfica, na qual os requerimentos de Qualidade e Experiência, *Quality of Experience* (QoE), são completamente atendidos.
- **Densidade de conexão:** É definida como o número simultâneo de dispositivos ativos ou usuários em uma determinada área durante um período definido pelo tamanho da área.
- **Custo:** Os custos tipicamente provem da infraestrutura, do equipamento do usuário e a licença para utilização do espectro.
- **Consumo de energia:** O consumo de energia é tipicamente definido como a energia por bit de informação (normalmente relevante em áreas urbanas) e como potência por unidade de área (frequentemente relevante é área suburbana/rural).

- **Experiência da taxa de transferência do usuário:** Essa experiência é definida como a quantidade total de dados trafegados (excluindo controle e sinalização) que o dispositivo do usuário final recebe na camada *Media Access Control* (MAC) durante um intervalo de tempo definido dividido por esse intervalo de tempo.
- **Latência:** É a latência do tráfego de dados na camada MAC na interface de rádio. Duas definições são relevantes: latência de *One-Trip Time* (OTT) e latência de *Round-Trip Time* (RRT). A latência OTT é definida como o tempo que o pacote de dados leva entre o envio pelo transmissor e o recebimento no receptor. A latência RRT é definida como o tempo que um pacote de dados leva para receber a confirmação enviada pelo transmissor final.
- **Confiabilidade:** Confiabilidade é normalmente definida como a probabilidade de que certa quantidade de dados seja transmitida com sucesso do transmissor final até um receptor final antes que o tempo determinado para essa ação termine.
- **Segurança:** Segurança em comunicações é algo muito difícil de ser mensurado. Um caminho possível para quantificá-la pode ser medir o tempo que um *hacker* poderia levar para ter acesso à informação.
- **Densidade de volume de tráfego:** É definida como a quantidade total de tráfego trocada por todos os dispositivos em uma determinada área durante um intervalo de tempo pré-definido dividido pelo tamanho da área.

Na Tabela 1 são apresentados, de forma resumida, os principais indicadores e desafios para cada caso de uso.

Tabela 1: Resumo dos principais desafios de requerimento para os casos de uso [3]

Casos de uso	Requerimentos	Valores desejados
Veículos autônomos	Latência	5 ms
	Disponibilidade	99,999%
	Confiabilidade	99,999%
Comunicações de emergência	Disponibilidade	99,999%
	Eficiência energética	Bateria com duração de 1 semana
Conteúdo sobre demanda	Taxa de transferência experimentada pelo usuário	15 Mbps
	Latência	5 s para iniciar a aplicação / 200 ms após uma interrupção na ligação
	Densidade de conexões	4000 dispositivos/km ²
	Densidade de volume de tráfego	60 Gbps/km ²
Cirurgias remotas e consultas	Latência	Abaixo de 1 ms
	Confiabilidade	99,999%
Cidades inteligentes	Taxa de transferência experimentada pelo usuário	300 Mbps no <i>Download</i> e 60 Mbps no <i>Upload</i>
	Densidade de volume de tráfego	700 Gbps/km ²
Realidade virtual e aumentada	Taxa de transferência experimentada pelo usuário	4-28 Gbps
	Latência	10 ms RTT

1.3 Frequências, espectro e ondas milimétricas

Na atualidade o espectro radioelétrico é um recurso escasso, principalmente na faixa abaixo de 6 GHz. Nesta faixa operam a maioria de sistemas de comunicação móvel pessoal, devido as suas características de propagação que permitem levar o sinal a diferentes locais

mesmo em condições de obstrução, como por exemplo no interior das edificações. Os novos sistemas de comunicação como o 5G permite entre outras coisas o maior número de dispositivos, uma diversidade de serviços e uma maior qualidade para os serviços já prestados. Embora as frequências abaixo de 6 GHz estejam ocupadas, existe a realocação de espectro para que estes novos sistemas possam operar. Desta forma, o 5G pode ser implementado nas bandas de frequência existentes e nas futuras bandas que podem vir a ser alocadas. A possibilidade de operar a tecnologia da rede de acesso em diferentes bandas de frequências é um aspecto fundamental para um serviço de comunicação global. Dispositivos móveis das redes 2G, 3G e 4G são multibandas, a cobertura da rede móvel usada nas diferentes regiões do globo pode prover serviço de *roaming*.

Os requisitos de *Radio Frequency* (RF), como tipo de antena, polarização, alcance, área de cobertura e tipo de aplicação, são cuidadosamente especificados de acordo com as características das diferentes bandas de frequência. Esses parâmetros são fundamentais para garantir a eficiência e a adequação do sistema RF ao seu propósito específico, como comunicação móvel, transmissão de dados, ou sistemas de radar, cada um exigindo ajustes finos nas configurações para otimizar o desempenho e a confiabilidade. Isso não é exclusivo do 5G; também ocorreu em gerações anteriores de redes móveis. Há inúmeros exemplos de requisitos específicos para determinadas bandas de frequência, projetados para garantir a máxima transferência de potência, minimizar interferências e melhorar a eficiência geral do sistema. Esses critérios são essenciais para atender às demandas de desempenho e qualidade em diferentes aplicações, desde a transmissão de dados até a comunicação de voz.

A definição das bandas a serem utilizadas pelo 5G [5] faz com que os requisitos necessários para operação dos serviços sejam diversos, principalmente no relacionado à propagação do sinal como é a cobertura, condição de recepção e perda de propagação. Para a operação do 5G nas faixas de ondas milimétricas acima de 24 GHz, os dispositivos e as Estações Rádio Base (ERBs) serão implementados com tecnologias de ponta, otimizadas para essas frequências mais altas. Isso inclui o uso intensivo do *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) massivo, que permite a transmissão simultânea de múltiplos sinais de dados, aumentando significativamente a capacidade e a eficiência da rede. Além disso, a formação de feixes (*beamforming*) será aplicada por meio de antenas inteligentes, que têm a capacidade de direcionar os sinais diretamente para os dispositivos dos usuários. Essa tecnologia não só melhora a qualidade do sinal, mas também minimiza a interferência, o que é crucial para manter a integridade da comunicação em ambientes densamente povoados.

Esses avanços serão integrados a sistemas de antenas avançados, fundamentais para maximizar o desempenho e a cobertura do 5G, especialmente em frequências mais altas, onde a propagação do sinal é mais desafiadora.

Esses critérios desempenham um papel crucial na maneira como os requisitos de RF são estabelecidos, como o desempenho da rede é mensurado em termos de rendimento, e como os limites técnicos são definidos. As bandas de frequência consideradas estão em conformidade com o *Release 15* do 3GPP [5], que organiza essas bandas em duas faixas principais, cada uma atendendo a diferentes necessidades de cobertura e capacidade. Essa divisão permite otimizar o uso do espectro e ajustar as características da rede para diferentes cenários de aplicação, garantindo que o 5G possa atender a uma ampla variedade de demandas de conectividade.

- Faixa de frequência 1 (FR1) que cobre a faixa de frequências de 410 MHz – 6 GHz
- Faixa de frequência 2 (FR2) inclui novas bandas numa faixa de 24.25 – 52.6 GHz.

No futuro, essas faixas de frequência podem ser estendidas ou complementadas com novas faixas pelo 3GPP. Para o estudo presente na dissertação, foi considerada a algumas frequências dentro da faixa FR1.

A figura 1-3 apresenta os ganhos de taxa de transferência de dados em função da frequência utilizada e da largura de banda.

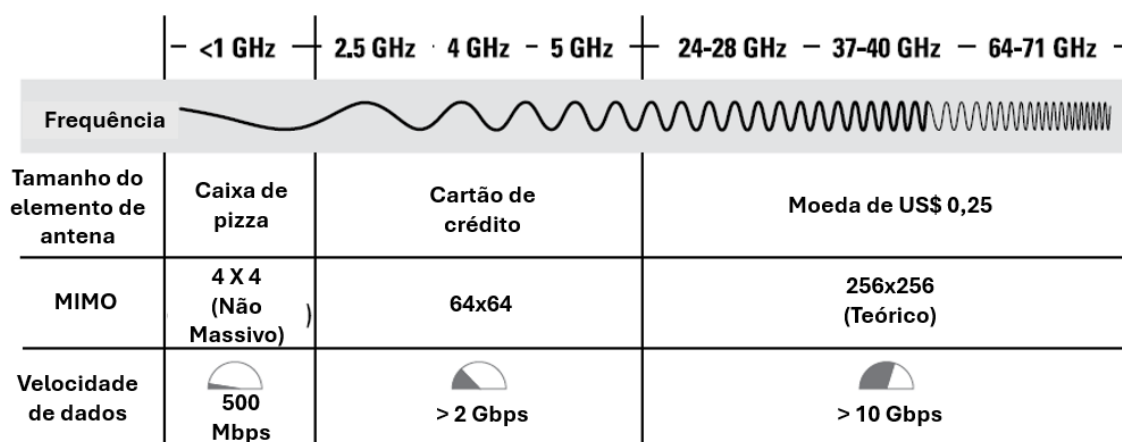


Figura 1.3: Frequências altas usadas pelo 5G vão possibilitar grandes capacidades [5]

1.4 Justificativa e Objetivos

Com o rápido avanço das tecnologias sem fio e a crescente demanda por conectividade em ambientes urbanos, a predição de cobertura de sistemas de comunicação sem fio torna-se cada vez mais crucial. Para atender a essa necessidade, modelos empíricos [6] e semiempíricos [7] de propagação têm sido amplamente utilizados, no entanto, é importante reconhecer as limitações desses modelos, uma vez que a maioria deles se concentra na caracterização dos mecanismos de propagação como a reflexão, difração e espalhamento, cujo comportamento depende das características elétricas do material localizado no percurso entre transmissor e receptor.

Pesquisas recentes destacaram uma importante lacuna nos modelos de previsão de propagação urbana, revelando que muitos deles subestimam a intensidade do campo de sinal atrás de edifícios [6]. Essa subestimação ocorre porque esses modelos negligenciam a contribuição da onda transmitida através da estrutura das edificações [6]. A falta de consideração do impacto da transmissão através das edificações e a variabilidade nas características de construção podem comprometer a precisão das predições de cobertura sem fio em ambientes urbanos, portanto, é fundamental desenvolver abordagens mais abrangentes que levem em conta esses fatores adicionais [6].

Em [8], os autores realizam estudos do comportamento das características de penetração das ondas milimétricas. O modelo de predição COST 231 Hata [9] foi desenvolvido para levar em consideração o efeito de difração e espalhamento em ambientes urbanos. A maioria dos modelos, entretanto, ainda não aborda adequadamente a propagação do sinal em áreas densamente construídas, onde os edifícios desempenham um papel significativo na atenuação do sinal [10].

A fim de melhorar a precisão das previsões de cobertura sem fio em ambientes urbanos, tem havido um interesse crescente no estudo da perda de entrada em edifícios, *building entry loss* (BEL) [11]. A BEL refere-se à atenuação do sinal que ocorre quando ele atravessa as estruturas dos edifícios antes de alcançar o receptor. Estudos têm demonstrado que a BEL pode ter um impacto significativo na qualidade e na intensidade do sinal recebido em áreas urbanas densas [11].

O objetivo desta dissertação é a caracterização da perda de penetração, utilizando um prédio de concreto. Além disso, destaca a importância de considerar a transmissão através

dos edifícios e a variabilidade nas características de construção para uma previsão mais precisa da cobertura sem fio em ambientes urbanos.

Em vista do exposto, observa-se que o estudo experimental é de grande valia para o desenvolvimento dos modelos e vem contribuir com mais dados, que poderão ser empregados, principalmente, na melhoria dos modelos de predição do sinal rádio. Nesta perspectiva, esta dissertação consta de resultados de medições realizadas ao longo da faixa sub-6 GHz, de grande emprego no 5G, para a determinação de perda de penetração de sinal rádio em diferentes paredes, e compara essas perdas com as obtidas através do modelo de predição do *International Telecommunication Union* (ITU), ITU-R P.2109-1 [7]. Para tal, foram realizadas medições no Campus da Engenharia da UF, na faixa de 1,4 a 5,9 GHz.

1.5 Estrutura do Trabalho

A dissertação consta de mais quatro capítulos. O capítulo 2 envolve a conceituação teórica necessária para a compreensão dos fenômenos envolvidos. O capítulo 3 trata dos modelos de propagação e o de perda de penetração do ITU, enquanto o capítulo 4 descreve a metodologia usada nas medições, os cenários envolvidos, os cálculos necessários para se obter a perda de penetração e os resultados obtidos. O capítulo 5 faz o fechamento com as conclusões do trabalho.

2 Conceituação Teórica

2.1 Considerações Iniciais

O desempenho de qualquer sistema de comunicação móvel está ligado ao meio em que o sinal se propaga. Este meio, denominado canal de comunicação, pode ser uma fibra ótica ou um meio de transmissão sem fio, conhecido como rádio. Neste último, o estado do canal pode variar continuamente dentro de um pequeno intervalo de tempo de observação e este comportamento aleatório do canal faz com que a comunicação através dele seja uma tarefa muito difícil [12]. Assim, o canal de rádio propagação, pela sua natureza aleatória e dependente da frequência do sinal, necessita de levantamento de dados estatísticos para sua caracterização e para análise de cobertura do sinal.

O sinal rádio móvel, ao longo do percurso entre transmissor e receptor, sofre a influência do canal, apresentando variações do nível do sinal recebido devido aos mecanismos de propagação. Desta forma, é extremamente importante estudar as características do ambiente, para que seja possível compreender a influência que o canal exerce sobre o sinal, o que impõe limitações aos sistemas de comunicações móveis. Por isso, a modelagem do canal, através de equações matemáticas, é muito importante para saber sua influência no sinal no percurso transmissor-receptor.

Durante o trajeto percorrido por uma onda entre o transmissor e receptor, ela estará sujeita a diversos fenômenos inerentes à natureza dos mecanismos de propagação. Uma onda rádio propagando em um meio pode basicamente sofrer efeito de reflexão, difração e espalhamento [10], definidos no próximo item.

Para o sistema de comunicações móveis, o modo de propagação mais importante é o de ondas terrestres. A depender do ambiente em que se deseja realizar o estudo e a faixa de frequência utilizada, diferentes mecanismos de propagação influenciarão no sinal que chega ao receptor.

2.2 Mecanismos de Propagação

Ao estudar a cobertura do sinal rádio e para analisá-lo em um canal rádio móvel, devem-se levar em consideração além da visada direta, três importantes mecanismos de propagação, descritos a seguir: reflexão, difração e espalhamento [10].

2.2.1 Visada Direta

Um enlace está em visada direta quando a reta entre o transmissor e o receptor está livre de obstáculos. A propagação em condição de visada direta é mais comum em ambientes rurais e suburbanos, em que a presença de obstáculos é inferior, em quantidade e tamanho, aos ambientes densamente urbanos.

2.2.2 Reflexão

Quando uma onda de rádio que se propaga em um meio colide com outro meio com propriedades elétricas diferentes, a onda é parcialmente refletida e parcialmente transmitida. Se a onda plana incidir em um dielétrico perfeito, parte da energia é transmitida para o segundo meio e parte é refletida de volta para o primeiro meio, e não existe perda de energia por absorção [10]. Se o segundo meio é um condutor perfeito, então toda a energia incidente é refletida, sem perda, de volta ao primeiro meio. A intensidade do campo elétrico das ondas refletidas e transmitidas pode ser relacionada à onda original incidente no meio através do coeficiente de reflexão de Fresnel (Γ). O coeficiente de reflexão é uma função das propriedades do material e, geralmente, depende da polarização da onda, ângulo de incidência e frequência da onda em propagação [10].

Em geral, as ondas eletromagnéticas são polarizadas, significando que possuem componentes de campo elétrico instantâneos em direções ortogonais no espaço. Uma onda polarizada pode ser representada matematicamente como a soma de duas componentes espacialmente ortogonais, como vertical e horizontal, ou componente esquerda ou direita polarizados de forma circular. Para uma polarização qualquer, a sobreposição pode ser usada para calcular os campos refletidos de uma superfície refletora [10].

2.2.3 Espalhamento

Quando uma onda incide em uma superfície cujas irregularidades são significativamente menores do que seu comprimento de onda, ocorre um espalhamento difuso. Esse espalhamento resulta em múltiplas ondas refletidas em várias direções, ao invés de uma única onda refletida em uma direção específica. Esse fenômeno é particularmente relevante em ambientes urbanos, onde superfícies como edifícios e árvores podem causar o espalhamento do sinal, que reduz sua intensidade e potencialmente causando interferências. Portanto, a análise do espalhamento é essencial para garantir a qualidade do sinal em sistemas de comunicação sem fio de alta frequência, como o 5G.

Superfícies planas podem ser modeladas como superfícies refletoras. Porém, a rugosidade dessas superfícies normalmente induz diferentes efeitos de propagação da reflexão especular. Tal rugosidade da superfície normalmente é avaliada usando o critério de Rayleigh, que define uma altura crítica de protuberâncias da superfície para determinado ângulo de incidência, como se observa na equação [10]:

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \text{sen} \theta_i} \quad (1)$$

onde λ é o comprimento de onda e θ_i é o ângulo do raio incidente na superfície. Uma superfície é considerada lisa se a diferença h entre sua protuberância mínima e máxima for menor que h_c e é considerada rugosa se esta diferença for maior que h_c . Para superfície rugosas, o coeficiente de reflexão da superfície plana precisa ser multiplicado por um fator de perda de dispersão, ρ_s . A perda de dispersão considera que a altura da superfície é uma variável gaussiana distribuída aleatoriamente com uma média local, como se observa na equação (2) [10]:

$$\rho_s = \exp \exp \left[-8 \left(\frac{\pi \sigma_h \text{sen} \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (2)$$

onde σ_h é o desvio padrão da altura da superfície sobre a altura média da superfície.

2.2.4 Difração

A difração permite que sinais de rádio se propaguem ao redor da superfície curva da Terra, além do horizonte, e por trás de obstruções [10]. Embora a força do campo recebido diminua rapidamente enquanto o receptor se move mais profundamente em direção à região obstruída (sombra), o campo de difração ainda existe e normalmente tem força suficiente para produzir um sinal útil.

Este fenômeno permite que mesmo uma área obstruída por um obstáculo, tenha alguma parte do sinal transmitido iluminando-a. O fenômeno de difração pode ser explicado pelo princípio de Huygens, que afirma que todos os pontos em uma frente de onda podem ser considerados como fontes pontuais para a produção de ondas secundárias, e essas ondas secundárias se combinam para produzir uma nova frente de onda na direção da propagação. A difração é causada pela propagação das ondas secundárias em uma região sombreada. A intensidade dos campos de uma onda difratada na região sombreada é a soma vetorial dos componentes de campo elétrico de todas as ondas secundárias no espaço em torno do obstáculo [10].

2.3 Propagação no Espaço Livre

A propagação em espaço livre é uma condição idealizada onde não existe nenhuma obstrução no trajeto entre o transmissor e o receptor, visada direta. A propagação em condição de visada direta é mais comum em ambientes rurais e suburbanos, tendo em vista que a presença de obstáculos é inferior, em quantidade e tamanho, aos ambientes densamente urbanos.

A perda em espaço é livre, é definida como a perda de propagação de uma onda eletromagnética emitida por uma fonte pontual isolada, no vácuo, sem a presença de qualquer corpo ou meio que afete a onda que se propaga [10]. Essa é a situação básica e particular de propagação, que corresponde a uma situação idealizada, mas representa uma boa aproximação para a perda observada em enlaces em visibilidade operando em altas frequências e sem efeitos de reflexão no solo, segundo o qual transmissor e receptor estão imersos em um meio livre de obstruções. O mecanismo de propagação envolvido é o de

propagação em visibilidade, onde seu entendimento e cálculo útil para a compreensão da propagação sem reflexões.

Na prática, em projetos de redes banda larga sem fio, por exemplo, pode-se considerar a propagação em espaço livre realiza uma estimativa inicial de cobertura do sinal propagado, porém na maioria dos casos, as perdas reais são maiores, dado que não leva em consideração nenhum mecanismo de propagação para o cálculo da perda, exceto a distância entre o transmissor e o receptor. O cálculo da potência recebida em uma determinada distância é baseado nas perdas de propagação no espaço livre e estas podem ser obtidas utilizando-se o modelo de propagação descrito pela equação do espaço livre [10]:

$$P_r(d) = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (3)$$

onde:

$P_r(d)$ - Potência recebida a uma distância d , em Watts;

P_t - Potência de transmissão, em Watts;

G_t - Ganho da antena de transmissão;

G_r - Ganho da antena de recepção;

λ - Comprimento de onda, em metros;

d - Distância entre transmissor e receptor, em metros;

A perda no espaço livre ou atenuação sofrida pelo sinal rádio transmitido é determinada pela relação entre a potência transmitida e a recebida, também conhecida por equação de Friis:

Perda no espaço livre:

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

Para a perda do sinal no espaço livre, em decibéis:

$$L(dB) = 32,44 - 10 \log G_t(dB) - 10 \log G_r(dB) + 20 \log f (MHz) + 20 \log d (km) \quad (5)$$

As antenas são consideradas isotrópicas, cujo ganho é igual a 1(un) dB, obtém-se:

$$L(dB) = 32,44 + 20 \log f (MHz) + 20 \log d (km) \quad (6)$$

2.4 Caracterização do Canal Faixa Estreita e Faixa Larga

A caracterização experimental do canal rádio móvel pode ser feita em faixa estreita e faixa larga, que dependem dos parâmetros a serem obtidos. Na caracterização faixa estreita, onde somente a portadora é transmitida, é possível analisar a flutuação do nível de sinal recebido, obtendo-se os seguintes parâmetros: a variabilidade rápida (desvanecimento em pequena escala) do sinal, a variabilidade lenta (desvanecimento em grande escala) do sinal e a perda no percurso (*pathloss*), que prove a cobertura de sinal na região sondada. Embora no canal faixa estreita o sinal real seja composto por um grupo pequeno de frequências, onde o efeito do canal de propagação é igual ou muito próximo entre elas (desvanecimento plano), desta forma, somente a frequência da portadora é suficiente para caracterizá-lo.

A sondagem faixa larga, por ser composta por um maior número de frequências, o fenômeno do desvanecimento seletivo de frequência se faz presente e neste caso a portadora não descreve o comportamento do canal como um todo. Neste caso, ao contrário do que se obtém na faixa estreita, para a sua caracterização, é necessário para sua caracterização extrair as amplitudes como os retardos dos multipercursos, além do cálculo do retardo médio, espalhamento de retardo (*delay spread*), deslocamento e espalhamento Doppler, banda e tempo de coerência.

2.5 Variabilidade (Desvanecimento) do Sinal

Os sistemas de comunicações móveis, presentes por todo mundo, normalmente são utilizados em locais que apresentam construções, concentração de pessoas, fluxo de carros

e com presença de vegetação. Como a antena do aparelho receptor está em uma altura menor que as obstruções, a maior parte do sinal que chega ao receptor é através de algum mecanismo de propagação como reflexão, espalhamento ou difração.

O canal rádio móvel de propagação de um sinal tem suas características variando continuamente no tempo, de tal forma que, no destino, o nível do sinal recebido também varia no tempo, mesmo que a potência do sinal transmitido permaneça constante. Esse comportamento é o que chamamos de variabilidade do sinal, também conhecido por desvanecimento. A variabilidade do sinal se divide em pequena e grande escala, que são descritas a seguir, é de vital importância o uso de ferramentas que possibilitem prever os seus efeitos.

2.5.1 Variabilidade em pequena escala

Também conhecido como desvanecimento de curto prazo ou rápido descreve grandes variações do nível do sinal de RF, que ocorrem em pequenas distâncias (da ordem de poucos comprimentos de onda) ou em pequenos intervalos de tempo, devido à recepção concomitante de diversas versões do sinal de RF transmitido, que apresenta amplitudes e fases diferentes. Tais alterações são resultado do multipercurso do sinal de RF que chega ao receptor, através dos mecanismos de propagação como reflexão, difração e espalhamento, que produzem o fenômeno da interferência construtiva ou destrutiva. O resultado é que o sinal na recepção é a somatório dos sinais que chegam no receptor por muitos caminhos a cada instante de tempo, com amplitudes e fases aleatórias. A figura 2.1 mostra os comportamentos da perda de percurso e dos desvanecimentos em pequena escala e grande escala.

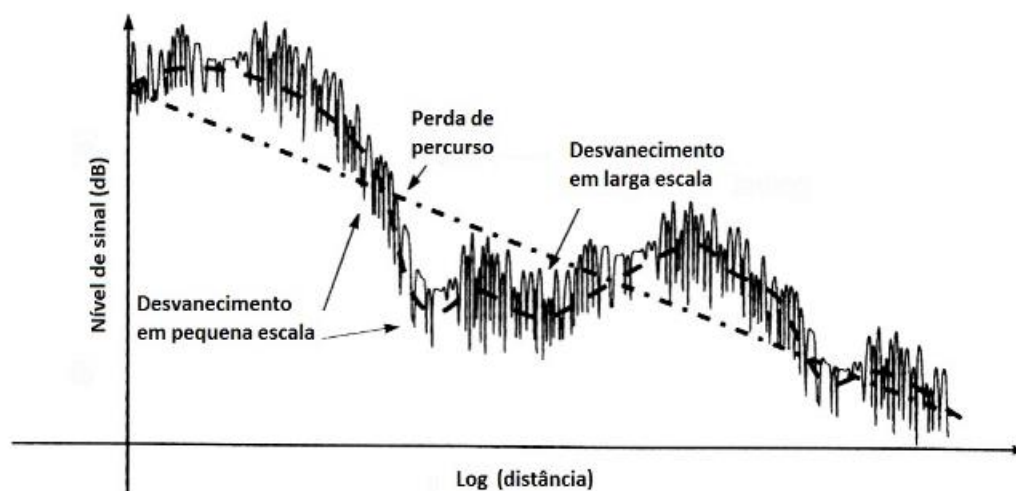


Figura 2.1: Sinal de RF na recepção, submetido a múltiplos fatores de atenuação [13]

2.5.2 Variabilidade em grande escala

Também conhecido como desvanecimento lento ou sombreamento, está ligado à atenuação do sinal que chega ao receptor devido ao efeito de degradação do sinal de RF provocado por obstáculos existentes em seu caminho, representados por construções, vegetação e relevo, ao longo de grandes distâncias, se comparado ao comprimento de onda do sinal transmitido. É percebido em distâncias da ordem de dezenas ou centenas de comprimentos de onda. A ocorrência de precipitações atmosféricas tais como chuva, granizo e neve, além de oscilações do índice de refração atmosférico que provocam a diminuição do raio efetivo da terra e maximizam obstáculos, também contribuem para o desvanecimento lento. É percebido em distâncias da ordem de dezenas ou centenas de comprimentos de onda.

2.6 Perda no Percurso (*Path Loss*)

No cálculo da área de cobertura de um determinado serviço de comunicação, outra característica importante do canal rádio móvel está relacionada à atenuação média do sinal, ou seja, a intensidade média do sinal em função da distância entre transmissor e receptor. A perda de percurso, em decibel [10], de um sinal de comunicação é definida pela relação entre as potências do sinal transmitido e recebido. Para a propagação no espaço livre, a potência

recebida segue a conhecida lei quadrática de variação da potência recebida com a distância [13], obtida a partir da equação de Friis [14], conforme observado no item 2.4. Para casos em que a condição de espaço livre não é mais possível o cálculo da perda de propagação ou da potência recebida é obtido em alguns casos a partir de dados empíricos, ajustando os parâmetros de uma função o modelo de acordo com as condições de propagação

2.7 Comportamento Estático do Sinal Rádio Móvel

Ao longo do tempo e com diversas experiências, sabe-se que somente com o valor médio no nível do sinal que chega ao receptor não é suficiente para se caracterizar um canal rádio móvel e nem avaliar seu desempenho, é de vital importância o estudo da variabilidade do sinal em torno do seu valor médio, a fim de obter mais parâmetros e fazer um estudo mais profundo da cobertura do sinal [10].

Inúmeros fatores envolvem a propagação da onda eletromagnética no percurso entre o transmissor e o receptor. Esses fatores não obedecem a leis determinísticas, uma vez que essas influências, de diferentes fenômenos, têm caráter aleatório.

A taxa de variação nos níveis de sinal em um canal de radiocomunicação é consequência de múltiplos percursos e, no caso de sistemas móveis, também está associada ao movimento relativo do receptor. A variabilidade do sinal recebido, quando não ocorre visada, muitas vezes pode ser descrita pela função densidade de probabilidade (f.d.p.) *Rayleigh*, típica de ambientes onde o receptor só recebe multipercurso do sinal transmitido. Caso exista, além do multipercurso, uma componente de visada como ocorre, por exemplo, na visada direta, o desvanecimento segue muitas vezes, a função distribuição de Rice [15]. Diversas outras funções de distribuição podem ser mais bem ajustadas à variabilidade em pequena escala do sinal: Nakagami, Weibull e α - μ , dentre outras.

3 Modelos de Predição do Sinal

3.1 Considerações Iniciais

Os modelos de propagação, tradicionalmente, são focados na predição do valor médio de sinal recebido a uma dada distância do transmissor e frequência de operação.

Num sistema de comunicação em mobilidade, a aleatoriedade do sinal recebido, a cada instante, conduz a uma função de transferência do canal do tipo estocástica e é difícil de calcular a atenuação do sinal no enlace [16]. Neste caso, na literatura existem vários modelos de predição de cobertura de sinal usados para se determinar o nível médio de sinal recebido em cada ponto da região. A maioria destes modelos utilizam dados empíricos ou semi-empíricos, baseados em campanhas de medições em campo, para o cálculo da perda de propagação, porém em algumas situações modelos determinísticos podem ser empregados. Os modelos determinísticos utilizam a teoria eletromagnética e a óptica geométrica para determinar o nível de sinal recebido e determinar a área de cobertura. Dentre os mais comuns, encontramos o modelo de traçado de raios, que é mais aplicado para cobertura *indoor*. Dentre os modelos empíricos, mais usuais para cobertura *outdoor*, citam-se como exemplos: *Okumura*, o de *Okumura-Hata*, *Lee*, *log-distance* e *ITU-R*.

Para se planejar um sistema móvel de comunicações, é preciso que seja realizada uma predição dos sinais que chegam a cada ponto da região a ser coberta, normalmente, classificados como modelos de propagação de grande escala [16]. Devido aos inúmeros fatores presentes, o que se faz, normalmente, é usar os cálculos já vistos de atenuação no percurso, modificados por parâmetros obtidos de medidas no campo. Baseado nisto, existem diversos modelos de predição na bibliografia que levam em consideração, em geral, a topografia do terreno (vale, colina...) e o tipo da área (urbana, suburbana, rural...). Uma vez estimada a predição de cobertura em determinada região, devem ser obtidas medidas em campo para se verificar a validade do modelo adotado e, em geral, ajustes terão que ser realizados para a otimização do sistema, tais como: altura de antena, mudança de sua localização, ângulo de elevação, azimute, potência do sinal transmitido, por exemplo.

Dentre os vários modelos encontrados na literatura para predição de perdas no percurso para canais rádio móveis terrestres, encontram-se os modelos teóricos, empíricos e semiempíricos.

3.2 Categorias de Modelos de Predição

3.2.1 Modelos determinísticos

São modelos teóricos que se valem das leis do eletromagnetismo para desenvolver expressões que calculem o nível de recepção do sinal nos pontos desejados [14]. Nestes modelos, o ambiente e a geometria são mais fáceis de serem descritos e modificados. A teoria de raios é uma técnica importante utilizada por estes modelos. Devem ser aplicados quando o processo não tem componentes aleatórias e é possível determinar o seu comportamento em qualquer instante do tempo. A maior dificuldade na aplicação desses modelos ocorre por conta do elevado consumo de recursos computacionais.

3.2.2 Modelos empíricos

Os modelos de propagação empíricos são aqueles desenvolvidos com base em campanhas de medições em ambientes específicos e que resultam em gráficos ou expressões matemáticas que permitem fazer previsões sobre o comportamento do sinal naquele determinado ambiente [10]. Esses modelos são fortemente dependentes dos ambientes para os quais foram desenvolvidos e devem ser adaptados, quando aplicados em ambientes diferentes, onde é acrescentado algum fator de correção. Como casos clássicos de modelos empíricos, citam-se os modelos de *Okumura* [17] baseado em medições na área de Tóquio e *Hata* [18], que transformou os ábacos de *Okumura* em uma formulação empírica. Modelos empíricos, quando representados por expressões matemáticas, se caracterizam por serem de fácil implementação através de *softwares*, exigindo poucos recursos de processamento.

3.2.3 Modelos semiempíricos

São modelos que se baseiam em fundamentos teóricos e dados experimentais, que mescla o modelo de traçado de raios com dados obtidos das medições para obter expressões que mostrem as variações sofridas pelo sinal no meio. O modelo de Walfisch-Ikegami [19] é um exemplo de modelo semiempírico.

A seguir serão apresentados alguns modelos de predição empíricos mais adequados em relação ao objetivo do trabalho.

3.3 Modelo Log-distance

O modelo Log-distância indica que a perda média de propagação diminui com o logaritmo da distância. A perda média é calculada em função da distância usando um expoente de perdas relacionado ao ambiente de propagação.

$$P_L(d) = P_L(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (7)$$

onde n é o coeficiente de perda (atenuação), que varia conforme o ambiente, em geral, variando de 2 a 6, $P_L(d)$ é a perda média recebida a uma distância d qualquer, da antena transmissora, e $P_L(d_0)$ é um parâmetro de perda, calculado a partir da modelo de perda pelo espaço livre a uma distância de referência d_0 , próxima ao transmissor, distância fora da região de campo próximo da antena transmissora (igual ou superior à distância de Fraunhofer, a fim de garantir que as medidas da perda de percurso não sejam alteradas pelos efeitos de campo irradiado da região de campo próximo da antena.

A Tabela 2 representa os valores do coeficiente de perda n por tipo de ambientes.

Tabela 2: Coeficiente de perda no percurso [10]

Tipo de Ambiente	Valor de n
Espaço Livre	2
Área Urbana	2,7 a 3,5
Área Urbana pouco obstruída	3 a 5
<i>Indoor</i> com linha de visada	1,6 a 1,8
<i>Indoor</i> com obstrução	4 a 6

No canal rádio móvel terrestre, o coeficiente n , é diferente de 2 (variando entre 2,5 e 6, tipicamente), e seu valor depende das características estruturais da região onde a comunicação se estabelece. Devido à grande variabilidade das estruturas, tipicamente encontradas nesse canal, a uma mesma distância de um transmissor, a potência recebida é variável.

Quando grandes obstáculos, como edifícios, morros e similares se situam entre transmissor e receptor de um sistema de comunicação móvel, aparece o efeito denominado de sombreamento, efeito esse que pode provocar consideráveis “vales” na potência recebida e interromper instantaneamente a comunicação. Medidas comprovam que a variabilidade do sombreamento segue uma distribuição gaussiana em escala logarítmica, ou seja, segue uma distribuição log-normal. Assim, pode-se reescrever a equação de perdas no percurso de forma a considerar esse novo efeito, através do parâmetro χ_σ [10]:

$$P_L(d) = P_L(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \chi_\sigma \quad (8)$$

onde χ_σ é uma variável aleatória com distribuição log-normal (em dB), que representa quanto o sombreamento está variando em torno do valor médio da potência recebida, que é representada pelo desvio padrão desta variável. Esse desvio padrão se situa, normalmente, na faixa de 7 a 15 dB. Vale observar que o valor da perda $P_L(d)$ não considera as variações causadas pelos multipercurso.

3.4 Recomendação ITU-R P.2109

A recomendação ITU-R P.2109-1 [7] fornece um método para estimar a perda de penetração de sinal rádio em edifícios, para a faixa de 80 MHz-100 GHz, não excedida para probabilidades P , onde $0,0 < P < 1,0$. A saída do modelo é apresentada na forma de uma função de distribuição cumulativa da probabilidade de que uma determinada perda não seja excedida.

O modelo não faz tentativa de separar a perda sofrida por um sinal ao penetrar na parede externa e a atenuação sofrida ao percorrer o caminho pelo edifício. Essa abordagem foi adotada porque é considerado improvável que, no contexto dos estudos da ITU-R, informações suficientemente detalhadas e específicas dos edifícios estejam disponíveis.

A perda de entrada em edifícios exibe grande variabilidade, tanto dentro de um determinado edifício quanto entre edifícios diferentes. Embora técnicas como o traçado de raios possam fornecer previsões úteis específicas do local, quando combinadas com dados arquitetônicos detalhados, tais modelos geralmente são inadequados para aplicações genéricas, como estudos de compartilhamento de espectro [7].

Assim, um modelo estatístico que tentasse descrever as características de perda de entrada do conjunto global de edifícios teria uma distribuição estatística tão ampla que não seria útil. Por outro lado, um modelo que tentasse caracterizar muitos tipos diferentes de edifícios exigiria mais dados do que os atualmente disponíveis e seria inadequado para estudos genéricos de compartilhamento.

Dessa forma, dispõe-se de um modelo baseado nos dados de medição, compilados no Relatório ITU-R P.2346 [11], e realizada na faixa de 80 MHz a 73 GHz. Pode ser usado dentro de um método de Monte Carlo, mas deve ser observado que o modelo foi validado apenas em relação a dados empíricos na faixa de probabilidade de 0,01 a 0,99.

O modelo assume que a antena indoor é omnidirecional e que a perda de penetração no edifício levará em conta toda a energia que chega ao local do terminal de recepção. Em alguns casos, o terminal de recepção pode usar uma antena direcional que atuará como um filtro espacial, aumentando a perda de entrada aparente do edifício, à medida que a energia

vinda de algumas direções é rejeitada. Medições feitas em dois grandes edifícios na República da Coreia a 32 GHz mostraram que a perda de penetração do edifício medida com antenas de feixe de 10 graus de largura foi 5,3 dB maior do que no caso omnidirecional. Mais detalhes podem ser encontrados no Relatório ITU-R P.2346.

Neste trabalho, com o objetivo de quantificar a filtragem espacial, uma antena diretiva será utilizada para verificar quantitativamente a diferença da potência recebida entre uma antena omnidirecional e uma antena diretiva.

3.4.1 Classificação do tipo de edificação

Os resultados experimentais, como os reunidos no Relatório ITU-R P.2346 [11], mostram que, quando caracterizados em termos de perda de entrada, os edifícios enquadram-se em duas populações distintas: construção termicamente eficiente e construção tradicional. Na primeira delas se enquadram o vidro metalizado e painéis de folha de alumínio, onde a perda de entrada no edifício é geralmente significativamente maior do que para edifícios “tradicional” sem tais materiais. O modelo, portanto, fornece previsões para esses dois casos. Esta classificação, de “termicamente eficiente” e “tradicional”, refere-se apenas à eficiência térmica de materiais de construção. Nenhuma suposição deve ser feita sobre o ano de construção ou método construtivo.

Para a perda de penetração do edifício, é importante considerar a eficiência térmica do edifício completo (ou a eficiência térmica geral). No caso de uma estrutura principal altamente eficiente termicamente com isolamento deficiente nas janelas (por exemplo, vidro simples com vidro fino) podem tornar o edifício termicamente ineficiente e vice-versa.

3.4.2 Formulação do Modelo

A perda de penetração do edifício irá depender do tipo de edifício, da localização do receptor dentro do edifício e movimento no edifício [7]. A distribuição de perda de penetração do edifício é dada por uma combinação de duas distribuições log-normais. A

perda de penetração do edifício, em dB, não excedida para a probabilidade, P , é dada por [7]:

$$L(P) = 10 \log \left(10^{0.1A(P)} + 10^{0.1B(P)} + 10^{0.1C(P)} \right) \text{ dB} \quad (9)$$

onde são definidos:

$$A(P) = F^{-1}(P)\sigma_1 + \mu_1 \quad (10)$$

$$B(P) = F^{-1}(P)\sigma_2 + \mu_2 \quad (11)$$

$$C = -3.0 \quad (12)$$

$$\mu_1 = L_h + L_e \quad (13)$$

$$\mu_2 = w + x \log(f) \quad (14)$$

$$\sigma_1 = u + v \log(f) \quad (15)$$

$$\sigma_2 = y + z \log(f) \quad (16)$$

onde L_h é a perda média para caminhos horizontais, dada por:

$$L_h = r + s \log(f) + t(\log(f))^2 \quad (17)$$

e L_e é a correção do ângulo de elevação do caminho na fachada do edifício:

$$L_e = 0.212|\theta| \quad (18)$$

- f é a frequência, em GHz
- θ é o ângulo de elevação do caminho na fachada do edifício, em graus
- P é a probabilidade de que a perda não seja excedida ($0,0 \leq P \leq 1,0$)
- $F^{-1}(P)$ é a distribuição normal cumulativa inversa em função da probabilidade.

Os coeficientes restantes são dados na tabela 3.

Tabela 3: Coeficientes do modelo do ITU para construção tradicional

Parâmetros	Tradicional	Coeficientes
r	12,64	μ_1
s	3,72	
t	0,96	
u	9,6	σ_1
v	2,0	
w	9,1	μ_2
x	-3,0	
y	4,5	σ_2
z	-2,0	

4 Metodologia

A metodologia usada no presente trabalho considera as etapas apresentadas na figura 4.1, ilustradas através de um diagrama de blocos.

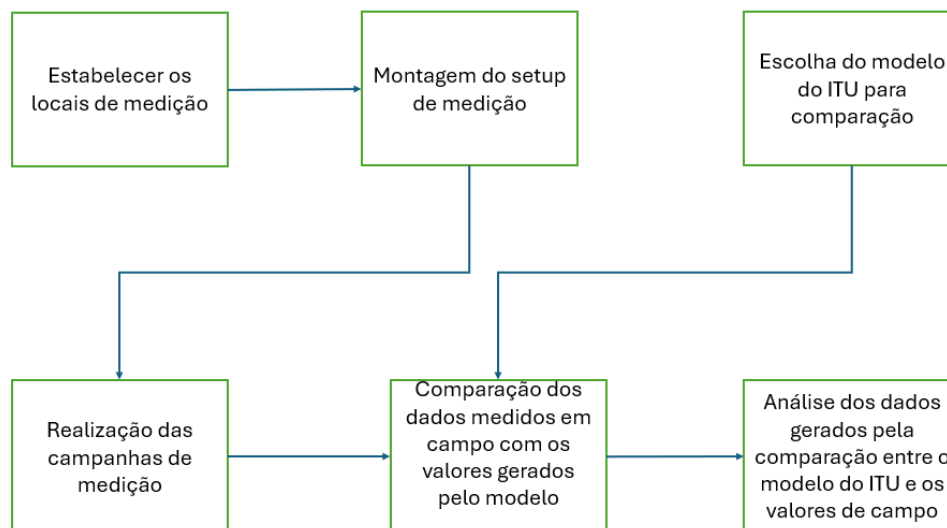


Figura 4.1: Diagrama de blocos da metodologia

4.1 Sistema de medição

Foi verificado, primeiramente, se as frequências a serem empregadas na medição estavam livres. O sistema empregado na transmissão foi o gerador de sinais MG3700A [20] da Anritsu e na recepção o analisador de espectro MS2724B [24], da Anritsu, que permite analisar sinais até 20 GHz, para identificar se as frequências empregadas na medição estavam livres.

Um cabo 15NN50-1.5C [21] de 1,5 metro, da Anritsu, cuja perda na faixa é igual a 2 dB, é conectado à antena corneta transmissora BTA 118, da Beta Telecom DRG013 [22], com *datasheet* no Anexo A, que pode operar na faixa de 1 – 18 GHz. Na recepção, outra antena BTA 118 DRG012 [23] com *datasheet* no Anexo B, é conectada por outro cabo da Anritsu, de 1,5 metro, a perda deste cabo, ao longo da faixa empregada, também é igual a 2 dB.

4.2 Ganhos das Antenas

Para determinar a perda de penetração pelos obstáculos foi necessária a caracterização das antenas em função dos seus ganhos de acordo com a frequência. As antenas cornetas empregadas, tanto na transmissão quanto na recepção, apresentam ganhos variáveis com a frequência. Marcadas as antenas de transmissão (Tx) e recepção (Rx), as curvas de ambas são mostradas na Figura 4.2 para toda a faixa de frequência de operação delas. Observa-se uma maior diferença entre elas na faixa de 8 a 10 GHz, portanto, na faixa de teste empregada, até 6 GHz, seus ganhos são próximos. Para a recepção, também foi utilizada uma antena omnidirecional modelo I-ATO5-380/6000 [25] da fabricante RFS com diagrama de radiação apresentado nas figuras 4.3 e 4.4.

Para o cálculo dos ganhos, observa-se que o fabricante fornece apenas o fator K das antenas [26], devendo-se calcular o ganho das mesmas a partir de (19), chegando-se à tabela 4 para os ganhos das antenas Tx e Rx.

$$G(dB) = 20 \cdot \log f_{MHz} - 29,77 - K_{dB} \quad (19)$$

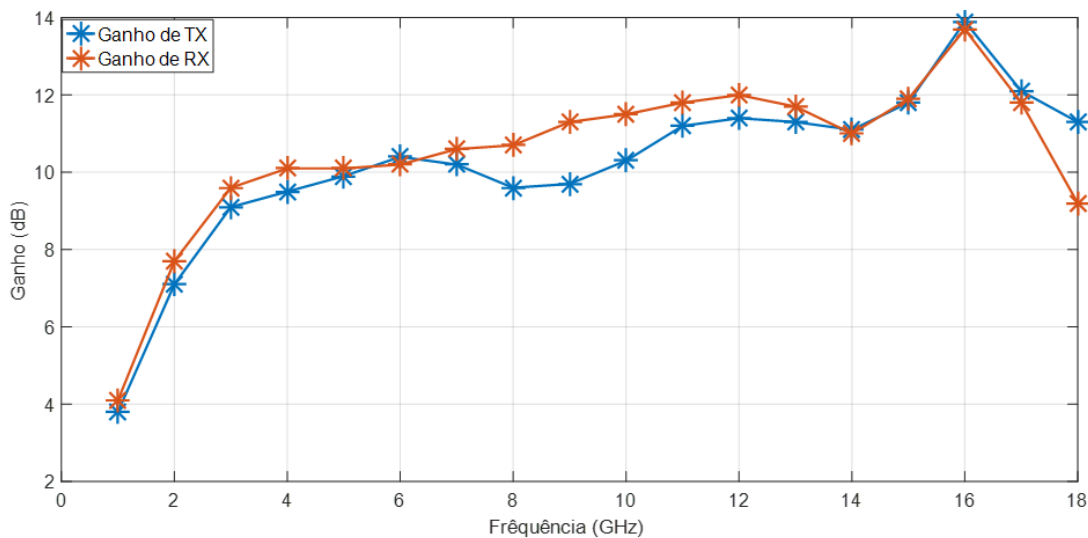


Figura 4.2: Ganhos das antenas transmissora e receptora.

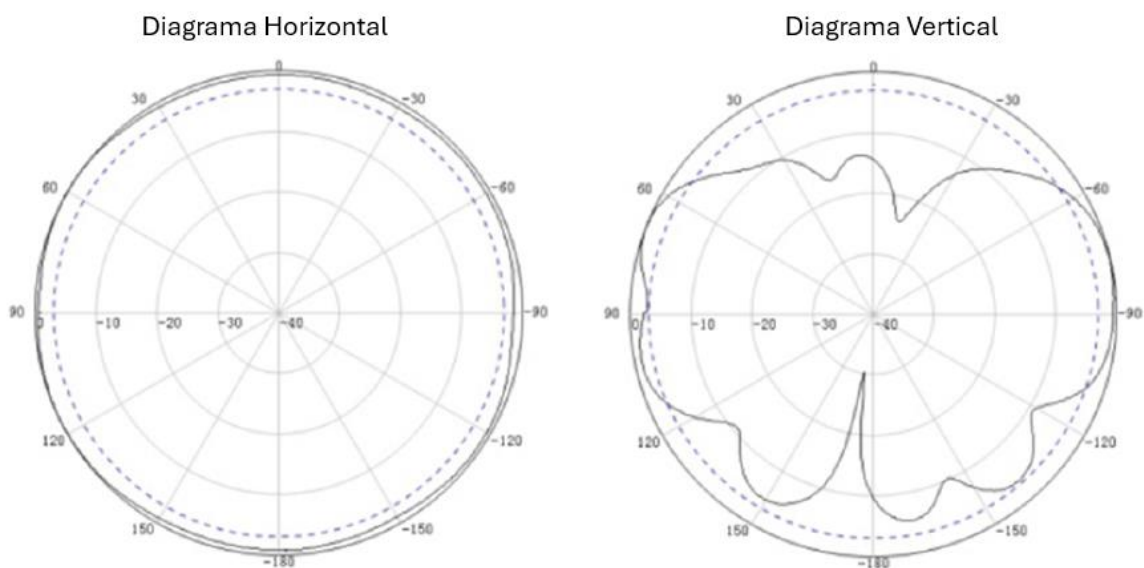


Figura 4.3: Diagrama de radiação 1710 MHz. [25]

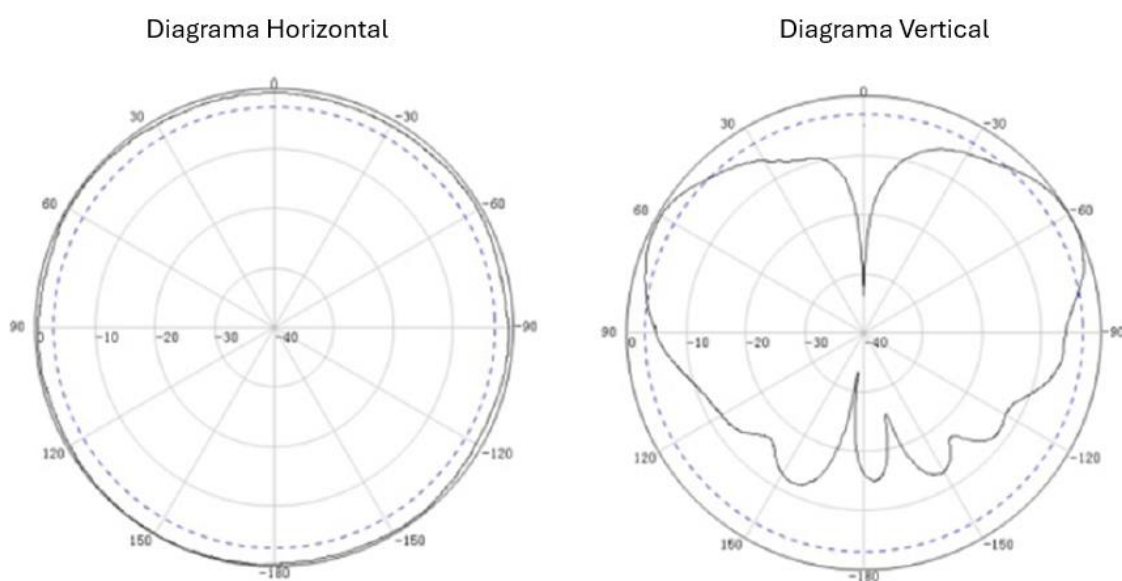


Figura 4.4: Diagrama de radiação 2500 MHz. [25]

Tabela 4: Ganho das Antenas

Frequência (GHz)	Tx – DRG013		Rx – DRG012	
	Fator K (dB)	Ganho (dB)	Fator K (dB)	Ganho (dB)
1	26,45	3,8	26,12	4,1
2	29,14	7,1	28,53	7,7
3	30,72	9,1	30,15	9,6
4	32,76	9,5	32,19	10,1
5	34,35	9,9	34,11	10,1
6	35,43	10,4	35,58	10,2
17	42,78	12,1	43,05	11,8
18	44,08	11,3	46,15	9,2

Para as frequências empregadas, o ganho das antenas diretivas foi interpolado e os resultados estão na Tabela 5. As frequências escolhidas, a priori, foram as indicadas nessa tabela, que novamente eram verificadas se estavam livres, quando se realizava as medições em campo. Para a antena omnidirecional, o ganho de recepção fornecido pelo fabricante, nas frequências de teste, está apresentado na Tabela 6, não foi utilizada a frequência de 1,4 GHz para a antena omnidirecional pois ela não opera nesta faixa.

Tabela 5: Ganho das Antenas nas Frequências de Teste

Frequência (GHz)	Ganho Tx (dB)	Ganho Rx (dB)
1,4	5,12	5,55
1,9	6,8	7,36
2,4	7,9	8,48
2,9	8,86	9,44
3,4	9,24	9,81
3,9	9,47	10,04
4,4	9,66	10,09
4,9	9,83	10,1
5,4	10,06	10,15
5,9	10,32	10,2

Tabela 6: Ganho da antena Omni RX I-ATO5-380/6000

Frequência (GHz)	Ganho Rx (dB)
1,9	5
2,3	6
2,6	6
3,0	6
3,6	6
4,0	6
5,0	6
6,0	6

4.3 Determinação do campo distante da transmissora

São selecionadas as frequências e calculados os ganhos das antenas, por ajuste às curvas da Figura 4.2, determinou-se a distância de campo distante (d_{cdist}) da antena transmissora, que é a menor distância entre as antenas Tx e Rx, de forma a garantir que a recepção esteja no campo distante da antena. Partindo de [14]:

$$d_{cdist} \geq 2 D^2/\lambda \quad (20)$$

onde D é a maior dimensão da antena diretiva, e λ é o comprimento de onda da frequência de operação. No caso, $D = 0,24 \text{ m}$ campo distante da antena transmissora diretiva, adotou-se $4,60 \text{ m}$ entre as antenas, acrescido de $0,40 \text{ m}$ como espessura máxima de obstáculo (parede) a ser testado. Assim, a distância Tx-Rx, em toda a faixa de frequências varrida, foi tomada igual a 5 metros ($2,30 + 2,30 + 0,40$), garantindo que obstáculos de espessura até $0,40 \text{ m}$ estejam em campo distante. Dessa forma: $d_{Tx-Rx} = 5 \text{ m}$ e o esquema da medição realizada é apresentado na Figura 4.5.

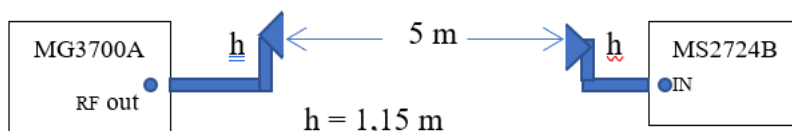


Figura 4.5: Diagrama de blocos do sistema transmissor-receptor.

A configuração empregada do analisador de espectro, de forma a fornecer o nível de cada portadora recebida, foi: média de 50 amostras, *Resolution Bandwidth* (RBW) = 300 Hz, *Video Bandwidth* (VBW) = 10 Hz e *Span* = 100 kHz.

4.4 Perda de Penetração do Sinal

Para determinar a perda de sinal devido aos diferentes obstáculos, nas diferentes frequências, calcula-se a diferença, na distância de 5 metros, entre o nível de potência recebida medida no espaço livre P_{0Fi} (sem obstáculo, na frequência F_i), em dBm, e o nível de potência recebida, medida com a presença dos diferentes obstáculos P_{RxFi} (com obstáculo, na frequência F_i), em dBm. Assim:

$$L_{pi,dB} = (P_{0Fi} - P_{RxFi}) \text{ dB} \quad (21)$$

Para fins de comparação, a perda de sinal no espaço livre (L_0) foi determinada teoricamente, para cada frequência (f_i) empregando a formula de Friis [14], com $d = 5 \text{ m}$:

$$L_{0,dB} = 32,44 + 20 \log f_{i,(MHz)} + 20 \cdot \log_{10} d_{km} \quad (22)$$

onde $d_{km} = 0,005 \text{ km}$ e $f_{i,(MHz)}$ é a frequência do sinal em MHz. Vale observar que, no seu desenvolvimento, Friis considerou a potência entregue à antena Tx e a que chega em Rx, portanto, a perda é entre a entrada da Tx e a entrada da Rx.

Substituindo d , obtém-se:

$$L_0 = -13,58 + 20 \cdot \log_{10} f_{i,(MHz)} \quad (23)$$

Para a perda medida, L_{0m} , tem-se:

$$L_{0m} \text{ (dB)} = P_{out} - P_{0m} - L_{cabo} + G \quad (24)$$

onde $G = G_{Tx} + G_{Rx}$, L_{cabo} é a perda do cabo da recepção (a perda do cabo da transmissão já está incluída em P_{out}), e P_{0m} é o nível de potência medido no espaço livre.

Ao utilizar os dados das Tabela 5 e os valores médios medidos do nível de sinal em (24), obtém-se, nas diferentes frequências, a perda no espaço livre medida, juntamente indicada com a perda teórica na Tabela 7.

Tabela 7: Comparação da Perda Teórica com a Experimental no Espaço Livre.

F_i (GHz)	Perda teórica L_0 (dB)	Perda medida L_{0m} (dB)
1,4	49,34	48,17
1,9	52,00	50,86
2,4	54,02	48,88
2,9	55,67	52,29
3,4	57,05	53,64
3,9	58,25	55,01
4,4	59,29	55,45
4,9	60,23	55,23
5,4	61,07	57,31
5,9	61,84	59,72

O que se observa é que a perda empírica é próxima à teórica, que valida o experimento. Nos cálculos das perdas de penetração, a perda no espaço livre a ser usada será a medida, tornando os resultados totalmente empíricos

Na realização das medições sempre foi verificada e confirmada se a frequência testada estava livre de sinal e, então, foram medidos os valores de P_{0Fi} . As antenas diretivas montadas estão na Figura 4.6.

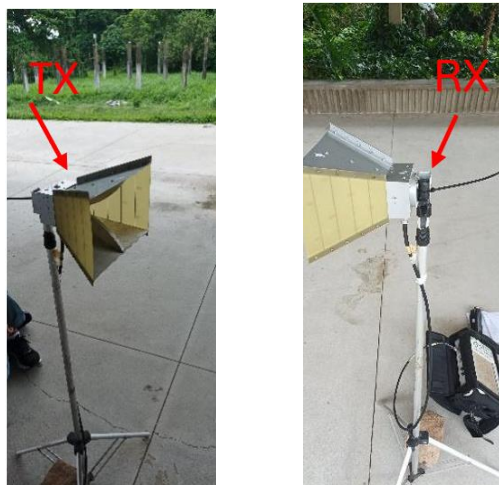


Figura 4.6: Montagem das antenas transmissora (Tx) e receptora (Rx).

Para medir os demais níveis de potência de sinal, P_{Rx} , quatro cenários foram escolhidos: As figuras 4.7 e 4.8 trazem, respectivamente, a parede de alvenaria utilizada para medição da perda de penetração de um sinal outdoor para uma antena de recepção indoor e a antena de recepção omnidirecional e a parede da sala para medição de perda de penetração indoor.



Figura 4.7: Parede de alvenaria para medição da perda de penetração outdoor x indoor, com a antena de Rx.



Figura 4.8: Antena omni e parede de sala para avaliação da perda de penetração indoor.

Cenário 1: parede de alvenaria no andar térreo do bloco H da UFF, de espessura igual a $0,21\text{ m}$, com T_x (antena direcional) externa e R_x (antena direcional) interna, com a parede a meio caminho da T_x e R_x , cuja distância total T_x - R_x era igual a 5 m , apresentado na figura 4.9;

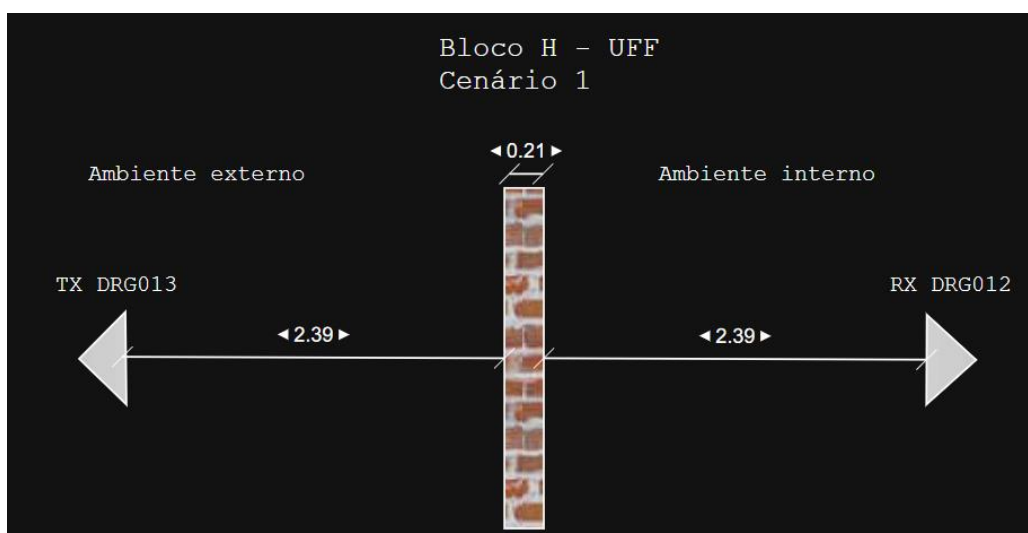


Figura 4.9: Cenário 1.

Cenário 2: parede de alvenaria do 3º andar do bloco D da UFF, de espessura igual a $0,146\text{ m}$, com T_x (antena direcional) na sala 332 e R_x (antena direcional) na sala 334, com a parede a meio caminho da T_x e R_x , cuja distância total T_x-R_x era igual a 5 m , apresentado na figura 4.10;

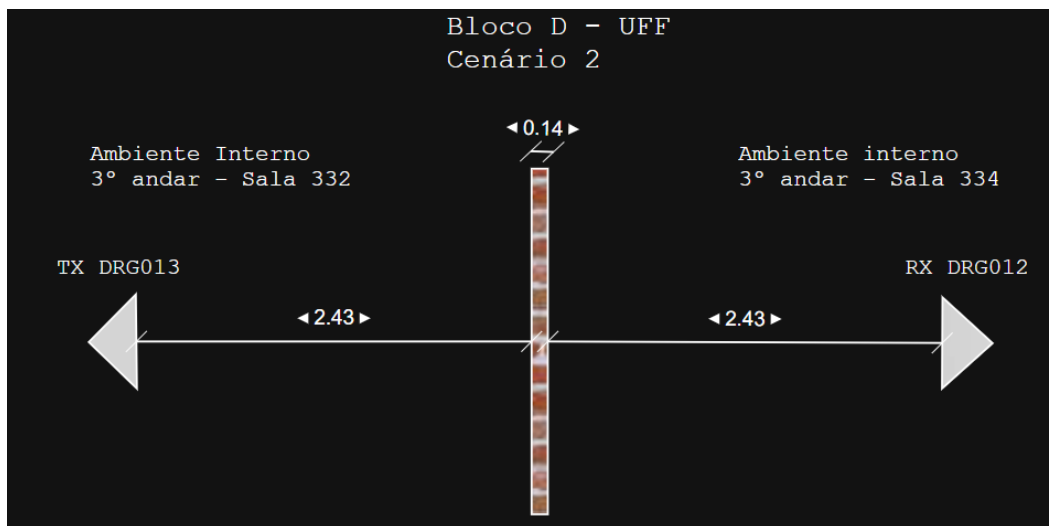


Figura 4.10: Cenário 2.

Cenário 3: parede de alvenaria do 4º andar do bloco D da UFF de espessura igual a $0,155\text{ m}$, com T_x (antena direcional) no corredor e R_x (antena omnidirecional) na sala 445, cuja distância total T_x-R_x era igual a 5 m , apresentado na figura 4.11; e

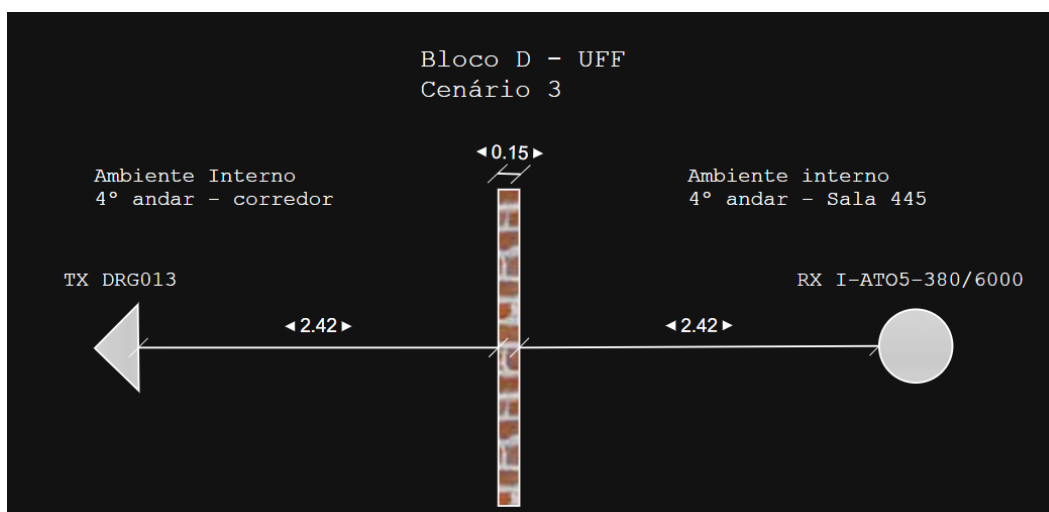


Figura 4.11: Cenário 3.

Cenário 4: parede de alvenaria do 4º andar do bloco D da UFF de espessura igual a $0,135\text{ m}$, com T_x (antena direcional) na sala 445 e R_x (antena omnidirecional) na sala 447, cuja distância total T_x-R_x era igual a 5 m , apresentado na figura 4.12.

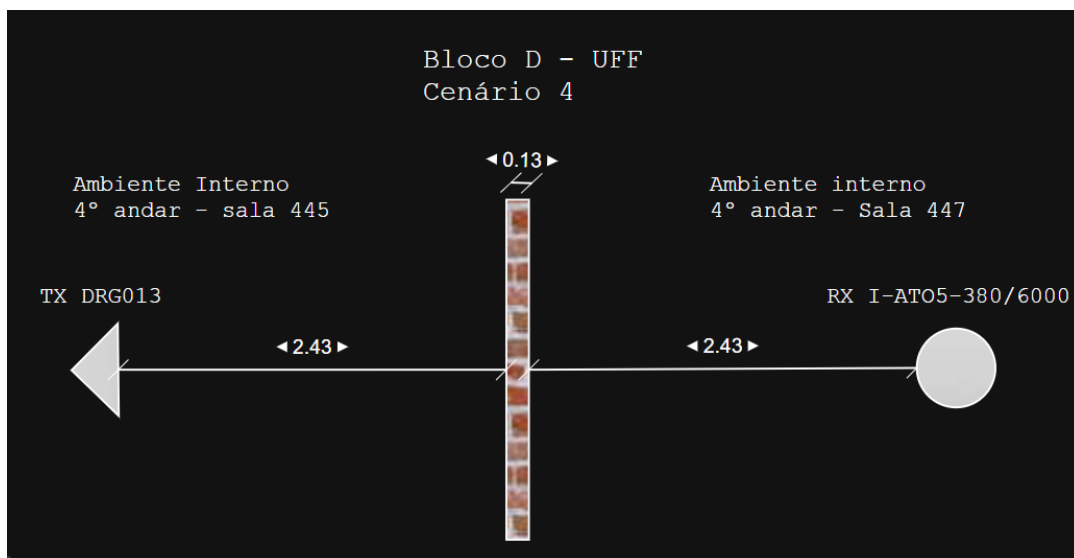


Figura 4.12: Cenário 4.

Assim, ao calcular a perda de penetração na i -ésima frequência (L_{pi}), a partir das medidas, conforme (21), e obtém-se os valores apresentados na Tabela 8 e Tabela 9, com o gráfico comparativo na Figura 4.13.

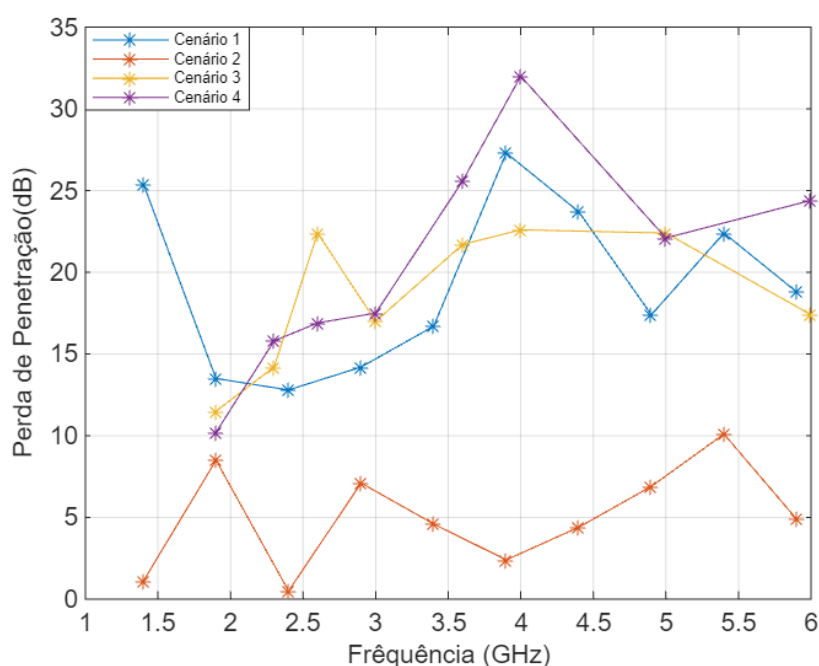
É visto que, a perda maior ocorreu na parede de alvenaria quando o sinal foi transmitido da sala 445 para a sala 447 (cenário 4).

Tabela 8: Perda de Penetração com RX Direcional

Frequência (GHz)	Perda cenário 1 (dB)	Perda cenário 2 (dB)
1,4	25,4	1,1
1,9	13,5	8,5
2,4	12,8	0,5
2,9	14,2	7,1
3,4	16,7	4,6
3,9	27,3	2,4
4,4	23,7	4,4
4,9	17,4	6,9
5,4	22,4	10,1
5,9	18,8	4,9

Tabela 9: Perda de Penetração com RX Omnidirecional

Frequência (GHz)	Perda cenário 3 (dB)	Perda cenário 4 (dB)
1,9	11,5	10,2
2,3	14,2	15,8
2,6	22,4	16,9
3,0	17,0	17,5
3,6	21,7	25,6
4,0	22,6	32,0
5,0	22,4	22,1
6,0	17,4	24,4

**Figura 4.13: Perda de Penetração nos cenários escolhidos.**

Verifica-se que a perda é variável com a frequência, indicando alguma seletividade do obstáculo com a frequência.

Na faixa testada, observa-se uma maior faixa de variação da perda de penetração com a frequência no caso Diretivo-Omni de uma sala para outra (cenário 4) enquanto a menor variação ocorreu de uma sala para outra (cenário 2) no caso Diretiva-Diretiva, além deste também fornecer os menores valores de atenuação de todos os cenários testados. Além disso, no caso da transmissão corredor-sala (cenário 3) e ambiente externo-sala (cenário 1), a faixa de variação foi próxima, com maiores valores mínimo e máximo um pouco maiores para o cenário 1, uma vez que a espessura de alvenaria era 5,5 cm maior neste caso.

Ao comparar com resultados de alguns outros trabalhos, na Tabela 10, estão os resultados de seis deles, além daqueles relativos a este artigo. Observa-se que o valor após a barra é a frequência real do experimento, bem próxima à frequência aqui testada.

Verifica-se que os resultados deste trabalho para a parede (obstáculo) de 21 cm (cenário1), são corroborados com os trabalhos de outros autores, com medições realizadas em interior de prédios, com sinal rádio vindo do exterior. O ideal seria que as medições fossem realizadas com a mesma metodologia.

Tabela 10: Comparação da Perda de Penetração em Prédios

	Freq. (GHz)	1,9	2,4	3,4	4,9	5,9
Perda (dB)	Jakson	13,5	12,8	16,7	17,4	18,8
	William [27]	15,7/1,922 GHz	-	-	-	-
	Sergio [9]	11,6	-	-	-	16,1
	Toledo [28]	13,4/1,8 GHz	12,8/2,3 GHz	-	-	-
	ITU [29]	19/1,86 ¹ GHz	-	20/3,5 ² GHz	20/5,1 ³ GHz	-

^{1,3} medições em Estocolmo, ² medições através de 20 cm de concreto

Observa-se que os valores do ITU estão acima dos valores empíricos dos diversos autores. Vale lembrar que o esse modelo é válido para recepção omnidirecional e, por esta estar em ambiente interno, poderá maior contribuição de multipercurso no valor de nível recebido do que no caso da diretiva, afetando o valor da perda de penetração.

Quando se compara os cenários 2 e 3, se observa que a perda de penetração, com a antena de recepção sendo omnidirecional, é maior para todas as frequências observadas.

4.5 Considerações Finais

Como o edifício da UFF tem as características tradicionais de construção, foram considerados os valores das Tabela 8 e Tabela 9 para o cálculo da perda de penetração do

edifício, foram testados três valores para as probabilidades não excedidas. Da figura 4.14 à figura 4.16, respectivamente, são mostradas as comparações entre a perda de penetração teórica, calculada pelo modelo, e a perda de penetração não excedida para percentuais de $P = 0,50$, $P = 0,90$ e $P = 0,95$, para todos os cenários.

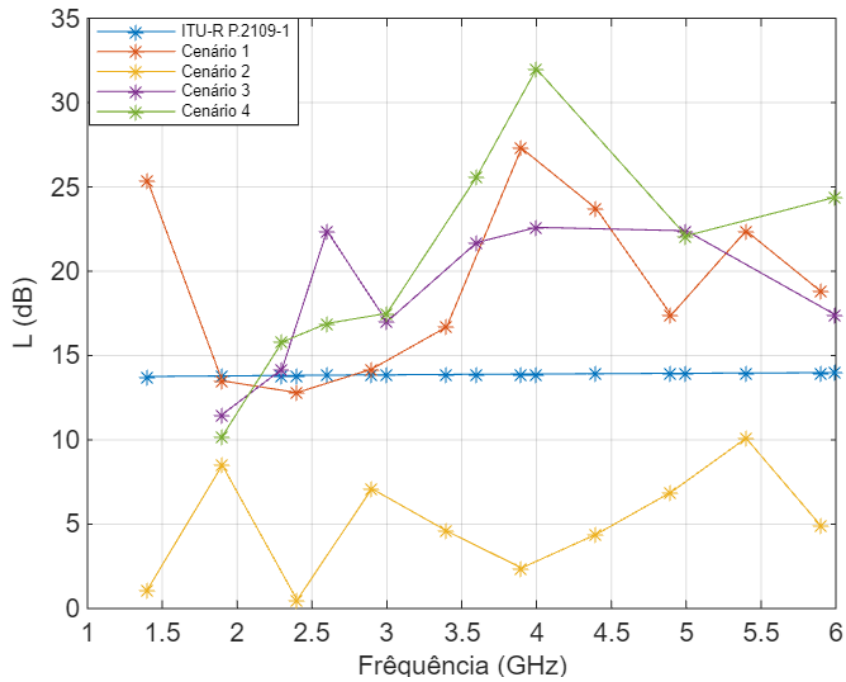


Figura 4.14: Comparação da perda de penetração para $P = 0,5$

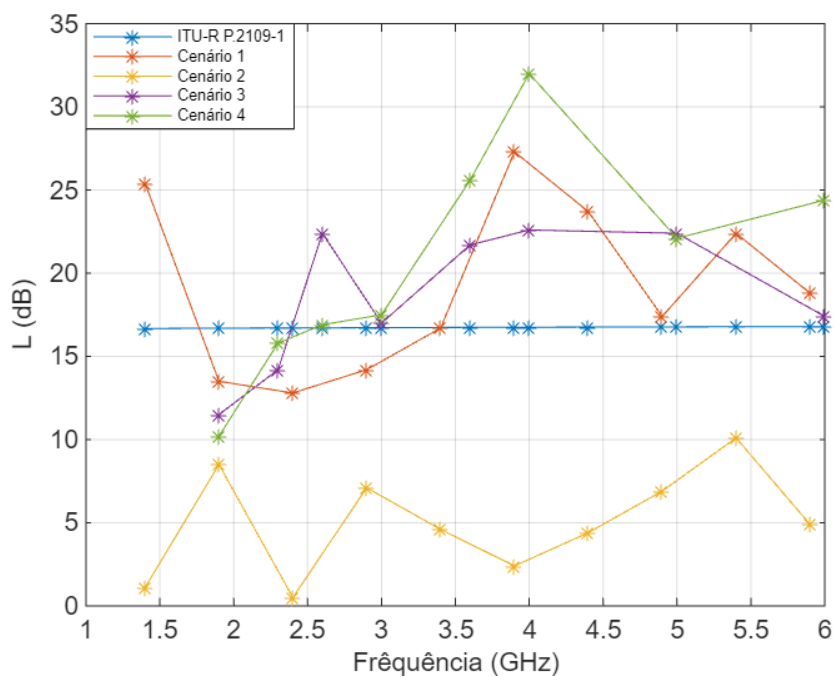


Figura 4.15: Comparação da perda de penetração para $P = 0,90$

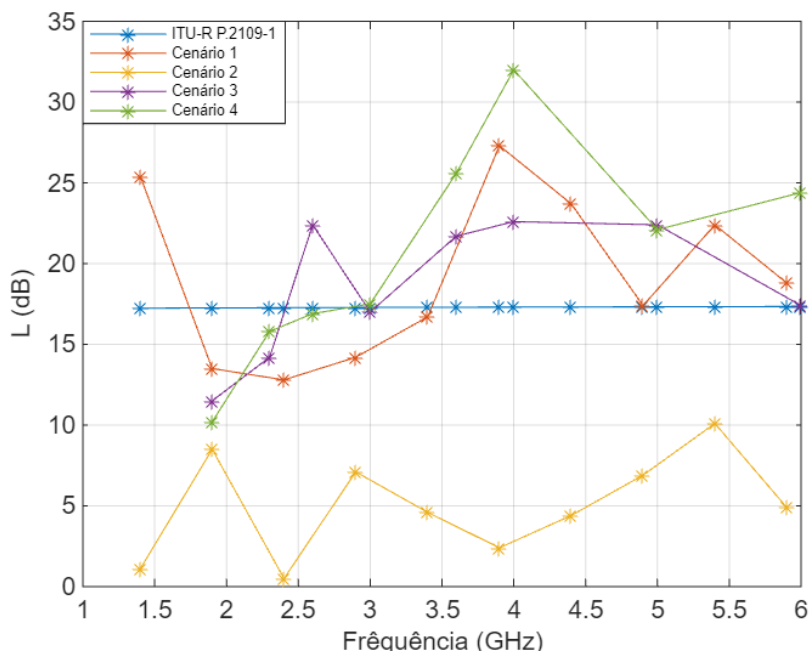


Figura 4.16: Comparação da perda de penetração para $P = 0,95$

O que se observa é que a perda calculada pelo modelo ITU cresce pouco com a frequência e com a variação de P , neste caso diferindo de menos que 5 dB de perda, seguindo o mesmo da figura 1 da Recomendação ITU-R P.2109-1. Naturalmente, quanto maior P , a probabilidade de que a perda não seja excedida, maior é o valor da perda de penetração.

5 Conclusão

Duas campanhas de medições foram realizadas em dois tipos de estruturas de alvenaria. A partir dos dados coletados o estudo tem como objetivo analisar a perda experimental de penetração de sinal rádio através de paredes, para algumas frequências faixa FR1, empregando antenas diretivas de forma que a perda real ficasse próxima da experimental. Além disso, verificou-se a aderência do modelo ITU-R P.2109-1 de predição da perda de penetração para algumas frequências. Uma vez que nesse modelo a recepção considerada é omnidirecional, também foram realizadas medições com antena receptora omnidirecional.

Os resultados obtidos revelaram que a perda de penetração não era sempre crescente com a frequência. Isto porque a recepção se fazia em ambiente *indoor* onde multipercursos podem contribuir para a potência recebida, alterando o valor da perda, construtivamente ou não. Quanto menos espesso o obstáculo, menor foi a faixa de variação da perda com a frequência, no caso de recepção diretiva, que atua como um filtro espacial atenuando as contribuições vindas de direções diferentes ao seu ângulo de abertura. O ideal seria um ambiente o mais isolado possível a fim de eliminar as componentes de multipercurso e, assim, verificar se a variação da perda é devida unicamente ao material. É possível observar que há uma diferença nas perdas de penetração ao se utilizar uma antena diretiva ou uma omnidirecional na recepção. Da mesma forma, é possível observar que o modelo ITU, que é usado com recepção omnidirecional, fornece previsões mais aproximadas, quando comparado aos dados medidos com antena omnidirecional na recepção. Dos dados experimentais foi observado que a perda média varia de 15,5 dB.

As paredes de alvenaria dos prédios apresentam uma perda considerável de penetração do sinal rádio. Neste trabalho, tais perdas chegam a 27,3 dB na frequência de 3,9 GHz. Vale ressaltar que picos de perda foram encontradas tanto para antena diretiva, como a omnidirecional, em torno da frequência de 3.9 GHz. As perdas mais baixas ocorreram em 2,4 GHz, empregada no WiFi. Tais valores são importantes para serem considerados quando se deseja alcançar os usuários que trabalham nos seus escritórios, em interior de prédios, ou nas suas residências.

Para a predição de perda, calculada pelo modelo do ITU, observou-se uma diferença considerável quando comparada às medições. Vale observar que no desenvolvimento de tal modelo, usou-se antena de recepção omnidirecional [25], que captura multipercursos que chegam de qualquer direção e que podem contribuir favoravelmente ou desfavoravelmente para o nível de sinal recebido, alterando o valor da perda.

Os valores experimentais obtidos neste trabalho estão próximos daqueles resultados obtidos por outros autores. Em suma, este trabalho propôs medir a perda de penetração de alguns obstáculos, onde foi vista aderência para apenas algumas frequências ao modelo ITU P.2109-1 [7]. Dos dados analisados foi possível observar um comportamento médio na faixa sondada 1,4 – 5,9 GHz, com perda predita pelo modelo da ITU menor que as medidas, em geral, para as diferentes frequências, mostrando-se um modelo otimista. Com exceção, está o cenário 2.

Na continuidade deste trabalho, pretende-se realizar mais medições em diferentes obstáculos, na mesma faixa de frequências, tanto com antena receptora omnidirecional quanto diretiva, de forma a formar um banco de dados sobre perdas de penetração do sinal rádio em diferentes obstáculos. Se necessário, contribuir para um aprimoramento do modelo do ITU-R P.2109-1, diminuindo o erro na predição de perda de penetração do sinal rádio em ambientes *outdoor-indoor*.

Bibliografia

- [1] QUALCOMM TECHNOLOGIES, “The essential role of Gigabit LTE & LTE Advanced Pro in a 5G World,” 2017.
- [2] ITU-R, RECOMMENDATION ITU-R M.2150-1, Electronic Publication, 2022.
- [3] L. MILLER, 5G RF For Dummies, New Jersey: John Wiley & Sons, 2017.
- [4] A. OSSEIRAN, J. F. MONSERRAT e P. MARSCH, 5G Mobile and Wireless Communications Technology, Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [5] B. Underdahl, 5G For Dummies®, Sprint Business Special Edition, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2018.
- [6] L. H. G. a. L. d. S. Mello, “Measurements of Building,” Junho 2015.
- [7] ITU-R, "Recommendation ITU-R P.2109-1," *ITU-R*, Vols. P.2109-1, 2019.
- [8] "Attenuation of Several Common Building Materials: Millimeter-Wave Frequency Bands 28, 73, and 91 GHz," Abril 2020.
- [9] S. Aguirre, “Radio Propagation Into Buildings at 912, 192 and 5990 MHz Using Microcells,” *US West Technologies*, Setembro 1994.
- [10] T. S. Rappaport, Comunicações sem fio - Princípios e práticas, São Paulo: Pearson Brasil, 2009.
- [11] “Report ITU-R P.2346-4 - Compilation of measurement data relating to building entry loss,” 2021.
- [12] G. ANDREWS, A. GHOSH e R. MUHAMED, Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking., Massachusetts: Prentice Hall, 2007.
- [13] W. C. Y. Lee, Mobile Communications Design Fundamentals, Second Edition, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [14] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, Third Edition, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

- [15] M. D. Yacoub, Foundations of mobile radio engineering, São Paulo: CRC Press LLC, 1993.
- [16] D. Tse and P. Viswanath, Fundamentals of Wireless Communication, Cambridge University Press, 2004.
- [17] Y. Okumura, "Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service," *Review Electrical Communication Laboratory*, pp. Vol. 16, pp 825-873, 31 Dezembro 1967.
- [18] M. Hata, "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services," *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. VT-29, NO. 3*, pp. 317-325, August 1980.
- [19] J. Walfisch and H. L. Bertoni, "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments," *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 36, NO. 12*, pp. 1788-1796, DECEMBER 1988.
- [20] Anritsu, "MG3700A Vector Signal Generator 250 kHz to 3 GHz, 250 kHz to 6 GHz (Option)," Março 2013. [Online]. Available: https://dl.cdn-anritsu.com/en-au/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/Brochure/MG3700A_E11500.pdf.
- [21] Anritsu, "15-Series Ruggedized Cable Assemblies," [Online]. Available: <https://www.anritsu.com/en-us/components-accessories/products/15-series>. [Acesso em Março 2024].
- [22] Telecom, Beta, "Antena Corneta de Faixa Larga DRG 013," Dezembro 2008. [Online]. Available: <https://betatelecom.com.br/>.
- [23] Beta Telecom, "Antena Corneta de Faixa Larga DRG 012," Dezembro 2008. [Online]. Available: <https://betatelecom.com.br/>.
- [24] Anritsu, "Spectrum Master - High Performance Handheld Spectrum Analyzer - MS2724B - 9 kHz to 20 GHz," 2010. [Online]. Available: <https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/datasheet/11410-00407R.pdf>.
- [25] RFS, "I-ATO5-380/6000 Indoor Omnidirectional Antenna 380-6000 MHz," Dezembro 2017. [Online]. Available: <https://www.rfsworld.com/pim/product/html/I-ATO5-380/6000>.

- [26] ITU Radiocommunication Bureau, "Handbook - Spectrum Monitoring," ITU publications, Geneva, 2011.
- [27] W. J. Tanis and G. J. Pilato, "Building Penetration Characteristics of 880 MHz and 1922 MHz Radio Waves," pp. 18-20, May 1993.
- [28] A. d. Toledo and A. M. D. Turkumani, "Propagation into and within buildings at 900, 1800 and 2300 GHz," *Vehicular Technology Society 42nd Conference – Frontiers of Technology*, pp. 10-13, May 1992.
- [29] Series of ITU-R Reports , "Report ITU-R P.2346-1 - Compilation of measurement data relating to building entry loss," ITU, Geneva, 2016.
- [30] B. UNDERDAHL, *5G For Dummies®*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2018.
- [31] A. I. SEMLYEN, "S-domain methodology for assessing the small signal stability of complex systems in nonsinusoidal steady state.," *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 132-137, 1999.
- [32] A. Osseiran, J. F. Monserrat and P. Marsch, *5G Mobile and Wireless Communications Technology*, 1^o ed., A. Osseiran, Ed., Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [33] SEMLYEN, A. I. "S-domain methodology for assessing the small signal stability of complex systems in nonsinusoidal steady state." *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 1, p. 132-137, 1999.

Anexo A – DRG0013

Antena Corneta de Faixa Larga Modelo BTA 118

Descrição e Utilização

A antena Corneta de faixa larga BTA 118 foi projetada para ser usada como antena de recepção em testes de emissão irradiada. Sua banda larga leva a uma economia de tempo nos testes, por permitir medidas completas em apenas uma varredura na banda de funcionamento na faixa de 1 GHz a 18 GHz. O Fator de Calibração da antena (K) é fornecido na distância de 1 m. A antena possui em sua parte traseira furos com roscas que permitem sua fixação em um suporte de testes.

Características Técnicas

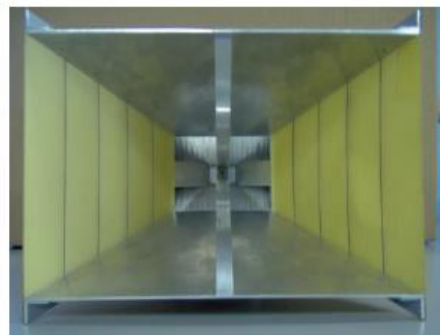
Faixa de Operação: 1 GHz a 18 GHz
Imped. Entrada Nominal: 50 Ohms
COE Médio: < 2.7
Conector de Entrada: N fêmea
Fator K: Fomecido com cada antena

Dimensões e peso

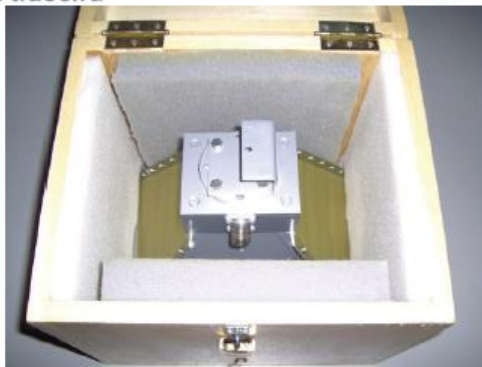
Largura: 230 mm
Altura: 130 mm
Comprimento: 210 mm
Peso: < 2 Kg
Diâmetro do furo de fixação traseiro: 5mm



Vista traseira



Vista frontal



Antena Corneta BTA 118 acondicionada em sua caixa de madeira



BETA
TELECOM

desde 1994 **Consultoria e Comercio Ltda**

Av. Dr. João Guilhermino, 429 Sala 173 Centro
12.210-131 São José dos Campos - SP
PABX: 12 3941-5054

beta@betatelecom.com.br www.betatelecom.com.br



desde 1994

BETA
TELECOM

Beta Telecom Consultoria e Comércio Ltda.
F.(12)3941-5054 -São José dos Campos-SP
www.betatelecom.com.br

Antena DRG BTA 118



081200013

NS: 081200013

Beta Telecom	
BTA 118	NS 081200013
Frequência (GHz)	Fator K (dB) ±1,5 dB por m
1	26,45
2	29,14
3	30,72
4	32,76
5	34,35
6	35,43
7	36,92
8	38,65
9	39,64
10	39,95
11	39,82
12	40,38
13	41,25
14	42,03
15	42,00
16	40,46
17	42,78
18	44,08
Data 10-12-08	



BETA
TELECOM

desde 1994 **Consultoria e Comercio Ltda**

Av. Dr. João Guilhermino, 429 Sala 173 Centro
12.210-131 São José dos Campos - SP
PABX: 12 3941-5054

beta@betatelecom.com.br www.betatelecom.com.br



desde 1994

BETA
TELECOM

Beta Telecom Consultoria e Comércio Ltda.
F.(12)3941-5054 -São José dos Campos-SP
www.betatelecom.com.br

Antena DRG BTA 118



081200013

NS : 081200013

Beta Telecom	
BTA 118	NS 081200013
Frequência (GHz)	Perda de Retorno (dB) ±0,5 dB
1	-4,17
2	-5,09
3	-9,52
4	-8,66
5	-6,06
6	-10,29
7	-21,65
8	-7,66
9	-7,19
10	-11,43
11	-11,86
12	-9,37
13	-4,89
14	-6,34
15	-17,8
16	-5,15
17	-7,53
18	-18,12
Data 10-12-08	

Anexo B – DRG0012



BETA
TELECOM

desde 1994 **Consultoria e Comercio Ltda**

Av. Dr. João Guilhermino, 429 Sala 173 Centro
12.210-131 São José dos Campos - SP
PABX: 12 3941-5054

beta@betatelecom.com.br www.betatelecom.com.br

Antena Corneta de Faixa Larga

Modelo
BTA 118

Descrição e Utilização

A antena Corneta de faixa larga BTA 118 foi projetada para ser usada como antena de recepção em testes de emissão irradiada. Sua banda larga leva a uma economia de tempo nos testes, por permitir medidas completas em apenas uma varredura na banda de funcionamento na faixa de 1 GHz a 18 GHz. O Fator de Calibração da antena (K) é fornecido na distância de 1 m . A antena possui em sua parte traseira furos com roscas que permitem sua fixação em um suporte de testes.

Características Técnicas

Faixa de Operação: 1 GHz a 18 GHz
Imped. Entrada Nominal: 50 Ohms
COE Médio: < 2.7
Conector de Entrada: N fêmea
Fator K: Fornecido com cada antena

Dimensões e peso

Largura: 230 mm
Altura: 130 mm
Comprimento: 210 mm
Peso: < 2 Kg
Diâmetro do furo de fixação traseiro: 5mm



Vista traseira



Vista frontal



Antena Corneta BTA 118 acondicionada em sua caixa de madeira



BETA
TELECOM

desde 1994 **Consultoria e Comercio Ltda**

Av. Dr. João Guilhermino, 429 Sala 173 Centro

12.210-131 São José dos Campos - SP

PABX: 12 3941-5054

beta@betatelecom.com.br www.betatelecom.com.br



desde 1994

BETA
TELECOM

Beta Telecom Consultoria e Comércio Ltda.
F.(12)3941-5054 -São José dos Campos-SP
www.betatelecom.com.br
Antena DRG BTA 118



081200012

NS: 081200012

Beta Telecom	
BTA 118	NS 081200012
Frequência (GHz)	Fator K (dB) $\pm 1,5$ dB por m
1	26,12
2	28,53
3	30,15
4	32,19
5	34,11
6	35,58
7	36,54
8	37,60
9	38,06
10	38,72
11	39,23
12	39,79
13	40,79
14	42,16
15	41,81
16	40,58
17	43,05
18	46,15
Data 10-12-08	



BETA
TELECOM

desde 1994 **Consultoria e Comercio Ltda**

Av. Dr. João Guilhermino, 429 Sala 173 Centro

12.210-131 São José dos Campos - SP

PABX: 12 3941-5054

beta@betatelecom.com.br www.betatelecom.com.br



desde 1994

BETA
TELECOM

Beta Telecom Consultoria e Comércio Ltda.
F.(12)3941-5054 -São José dos Campos-SP
www.betatelecom.com.br

Antena DRG BTA 118



081200012

NS: 081200012

Beta Telecom	
BTA 118	NS 081200012
Frequência (GHz)	Perda de Retorno (dB) ±0,5 dB
1	-4,67
2	-4,51
3	-12,81
4	-9,37
5	-6,47
6	-10,28
7	-21,67
8	-12,5
9	-13,65
10	-13,67
11	-7,81
12	-21,61
13	-7,49
14	-5,42
15	-6,67
16	-6,31
17	-9,15
18	-13,35
Data 10-12-08	