

AValiação DA PERDA DE PENETRAÇÃO NA BANDA SUB-6 GHz

Jakson Correa, Leni Matos, Igor R. Cardoso e Pedro Castellanos

Resumo— Este artigo explora a perda de penetração do sinal rádio na faixa 1 - 6 GHz para aplicação no 5G, numa construção de alvenaria, que é um cenário típico utilizado nas residências brasileiras das grandes cidades. São sondadas dez frequências, em três tipos de obstáculos: duas paredes de alvenaria de espessuras diferentes e porta de madeira. Os resultados obtidos são comparados com o modelo apresentado na recomendação ITU-R P. 2109-1. Essas informações são relevantes para orientar a implementação eficiente do 5G, considerando o uso de técnicas avançadas, como antenas direcionais e MIMO, para melhorar a cobertura e a capacidade das redes 5G na faixa de frequência sub-6 GHz.

Palavras-Chave— 5G, Modelo de propagação, Perda de penetração, Sub 6 GHz.

Abstract— This article explores the radio signal penetration loss in the 1-6 GHz range for 5G application in masonry construction, which is a typical scenario in Brazilian households in major cities. Ten frequencies are surveyed, considering three types of obstacles: two masonry walls with different thicknesses and a wooden door. The obtained results are compared with the model presented in ITU-R Recommendation P.2109-1. This information is relevant to guide the efficient implementation of 5G, considering the use of advanced techniques such as directional antennas and MIMO to improve coverage and capacity of sub-6 GHz 5G networks.

Keywords— 5G, Penetration Loss, Propagation model, Sub-6 GHz

I. INTRODUÇÃO

Com o rápido avanço das tecnologias sem fio e a crescente demanda por conectividade em ambientes urbanos, a predição de cobertura de sistemas sem fio torna-se cada vez mais crucial. Para atender a essa necessidade, modelos empíricos [1] e semi-empíricos [2] de propagação têm sido amplamente utilizados, no entanto, é importante reconhecer as limitações desses modelos, uma vez que a maioria deles se concentra apenas nos efeitos de reflexão, difração e espalhamento.

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. Essa subestimação ocorre porque esses modelos negligenciam a contribuição da onda transmitida através da estrutura dos prédios. A falta de consideração do impacto da transmissão através dos edifícios 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 [1].

Em [3], os autores realizam estudos do comportamento das características de penetração das ondas milimétricas. O modelo de predição COST 231 Hata [4] 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.

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) [5]. 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.

Este artigo busca preencher essa lacuna ao compilar dados empíricos sobre a perda de entrada em edifícios, fornecendo informações para o desenvolvimento de novos modelos de propagação. 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 de perda de penetração do sinal rádio nos diferentes obstáculos. Nesta perspectiva, este artigo 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 ITU, ITU-R P.2109-1 [2]. Para tal, foram realizadas medições no Campus da Engenharia da UFF, a cada 0,5 GHz, desde 1,4 a 5,9 GHz, totalizando 10 frequências.

O artigo consta de mais cinco seções. A Seção II trata da metodologia e do sistema aplicados nas medições, descrevendo os ambientes testados. A Seção III descreve o modelo do ITU. Na Seção IV são dados os resultados, com discussão e análise dos mesmos. Na Seção V, estão as considerações finais, englobando conclusões e trabalhos futuros.

II. METODOLOGIA

A. Frequências de teste e perdas nos cabos de transmissão e recepção

Foi verificado, primeiramente, se as frequências a serem empregadas na medição estavam livres. Para isso, o sistema empregado na transmissão foi o gerador de sinais MG3700A, da Anritsu, que permite gerar radiofrequências de 250 kHz até 6 GHz. Um cabo 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 [6], que pode operar na faixa de 1 – 18 GHz. Na recepção, outra antena BTA 118 [7] é conectada por outro cabo da Anritsu, de 1,5 metro, ao analisador de espectro MS2724B, da Anritsu, que permite analisar sinais até 20 GHz. A perda deste cabo, ao longo da faixa empregada, também é igual a 2 dB.

B. Ganhos das antenas:

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 1 para toda a faixa de operação das mesmas. 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 o cálculo dos ganhos, observa-se que o fabricante fornece apenas o fator K das antenas [8], devendo-se calcular o ganho das mesmas a partir de (1), chegando-se à Tabela I para os ganhos das antenas Tx e Rx.

$$G (dB) = 20. \log_{10} f_{MHz} - 29,77 - K_{dB} \quad (1)$$

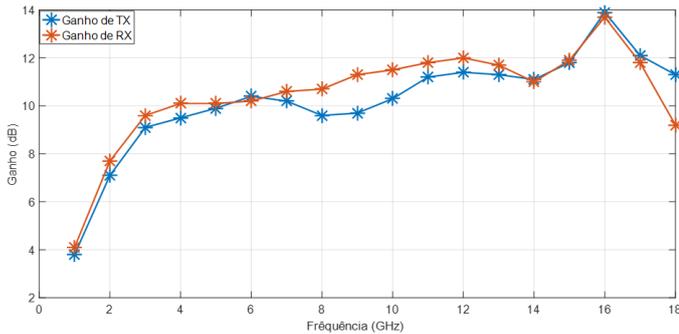


Fig. 1. Ganhos das antenas transmissora e receptora.

TABELA I. 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 foi interpolado e os resultados estão na Tabela II. As frequências escolhidas, a priori, foram as indicadas nessa tabela, que novamente eram verificadas se estavam livres, quando se realizava as medições em campo.

TABELA II. GANHO DAS ANTENAS NAS FREQUÊNCIAS DE TESTE.

Frequência (GHz)	Ganho Tx (dB)	Ganho Rx (dB)
1,4	5,12	5,55
1,9	6,80	7,36
2,4	7,90	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	10,10
5,4	10,06	10,15
5,9	10,32	10,20

C. Determinação do campo distante da transmissora

Selecionadas as frequências e calculados os ganhos das antenas, por ajuste às curvas da Figura 1, 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 [9]:

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

onde D é a maior dimensão da antena e λ é o comprimento de onda da frequência de operação. No caso, $D = 0,24$ m para as antenas usadas, no entanto, λ é variável, e d_{cdist} iguala a $0,38$ m para 1 GHz e $2,3$ m para 6 GHz. Para usar a mesma distância em toda a faixa de medição, portanto, será adotada uma distância igual a $2,30$ m para satisfazer o campo distante em toda a faixa de frequências testada.

Como os obstáculos a serem medidos, entre as antenas Tx e Rx devem estar no campo distante da transmissora, adotou-se $4,60$ m entre as antenas, acrescido de $0,40$ 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 $0,40$ m estejam em campo distante. Dessa forma: $d_{Tx-Rx} = 5$ m e o esquema da medição realizada é apresentado na Figura 2.

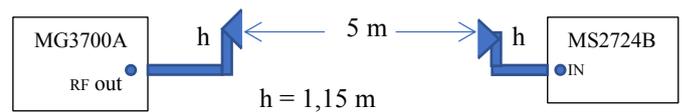


Fig. 2. Diagrama de blocos do sistema transmissor-receptor.

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.

D. 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_{RxF_i} (com obstáculo, na frequência F_i), em dBm. Assim:

$$L_{pi,dB} = (P_{0Fi} - P_{RxF_i}) \text{ dB} \quad (3)$$

Para fins de comparação, a perda de sinal no espaço livre (L_0) foi determinada teoricamente, para cada frequência (f_i) empregando a fórmula de Friis [9], com $d = 5$ m:

$$L_{0,dB} = 32,44 + 20. \log_{10} f_{i,MHz} + 20. \log_{10} d_{km} \quad (4)$$

onde $d_{km} = 0,005$ 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:

$$L_0 = -13,58 + 20. \log_{10} f_{i,MHz} \quad (5)$$

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

$$L_{0m} (dB) = P_{out} - P_{0m} - L_{cabo} + G \quad (6)$$

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.

Usando os dados das Tabela II e os valores médios medidos do nível de sinal em (6), obtém-se, nas diferentes frequências, a perda no espaço livre medida, juntamente indicada com a perda teórica na Tabela V.

TABELA III. 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 bem próxima à teórica, validando o experimento. Nos cálculos das perdas de penetração, a perda no espaço livre a ser usada será a medida.

Quando realizadas as medições, estava um dia claro e quente. Sempre foi verificada e confirmada se a frequência testada estava livre de sinal e, então, foram medidos os valores de P_{0Fi} . As antenas montadas estão na Figura 3.

Para medir os demais níveis de potência de sinal, P_{RxFi} , três cenários foram escolhidos:

1. parede de alvenaria no andar térreo do bloco H da UFF, de espessura igual a $0,21 m$, com Tx externa e Rx interna, com a parede a meio caminho da Tx e Rx, cuja distância total Tx-Rx era igual a $5 m$;
2. parede de alvenaria do 3º andar do bloco D da UFF, de espessura igual a $0,146 m$, com Tx na sala 332 e Rx na sala 334, com a parede a meio caminho da Tx e Rx, cuja distância total Tx-Rx era igual a $5 m$; e
3. porta de madeira fechada do 3º andar do bloco D da UFF de espessura igual a $0,04 m$, com Tx na sala 332 e Rx no corredor, com a porta a meio caminho da Tx e Rx, cuja distância total Tx-Rx era igual a $5 m$.

Assim, calculando a perda de penetração na i -ésima frequência, L_{pi} , a partir das medidas, conforme (3), e empregando a perda experimental no espaço livre, obtém-se o gráfico da Figura 4. Claramente, a perda maior ocorreu na parede de alvenaria mais espessa, como se esperava, seguida da menos espessa e, então, da porta. Esta última apresentou valores bem baixos de perda, até $5 dB$, chegando mesmo a dar ganho na faixa de $3-4,5 GHz$, indicando uma contribuição positiva de sinal provinda de multipercursos presentes na sala.



Fig. 3. Montagem das antenas transmissora e receptora.

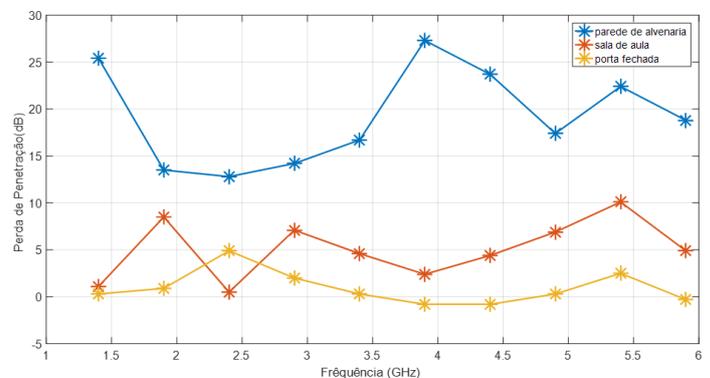


Fig. 4. Perda de Penetração nos três cenários escolhidos.

III. MODELO DO ITU

A recomendação ITU-R P.2109-1 [2] 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 de $0,0 < P < 1,0$. 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 nenhuma 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 específicas do edifício estejam disponíveis.

A perda de entrada em edifícios exhibe 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.

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.

O modelo é baseado nos dados de medição compilados no Relatório ITU-R P.2346 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.

A. Classificação do tipo de edificação

Resultados experimentais, como os reunidos no Relatório ITU-R P.2346, mostram que, quando caracterizados em termos de perda de entrada, os edifícios enquadram-se em duas populações distintas: onde os modernos métodos de construção termicamente eficientes são usados (vidro metalizado, painéis de folha de alumínio), 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). 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.

B. Modelo

A perda de penetração do edifício irá variar dependendo do tipo de edifício, localização dentro do edifício e movimento no edifício. 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 [2]:

$$L(P) = 10 \log (10^{0.1A(P)} + 10^{0.1B(P)} + 10^{0.1C(P)}) \quad (6)$$

onde são definidos:

$$A(P) = F^{-1}(P)\sigma_1 + \mu_1 \quad (7)$$

$$B(P) = F^{-1}(P)\sigma_2 + \mu_2 \quad (8)$$

$$C = -3.0 \quad (9)$$

$$\mu_1 = L_h + L_e \quad (10)$$

$$\mu_2 = w + x \log(f) \quad (11)$$

$$\sigma_1 = u + v \log(f) \quad (12)$$

$$\sigma_2 = y + z \log(f) \quad (13)$$

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

$$L_h = r + s \log(f) + t(\log(f))^2 \quad (14)$$

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

$$L_e = 0.212|\theta| \quad (15)$$

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 IV.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como o edifício da UFF tem as características tradicionais de construção, foram considerados os valores da Tabela IV para o cálculo da perda de penetração do edifício, sendo testados três valores para as probabilidades não excedidas. Da Figura 5 à Figura 7, respectivamente, é mostrada a comparação entre a perda de penetração teórica, calculada pelo modelo, e a perda de penetração medida para $P = 0,50$, $P = 0,90$ e $P = 0,95$, para o caso da parede mais espessa de alvenaria (caso 1).

TABELA IV. COEFICIENTES DO MODELO DO ITU PARA CONSTRUÇÃO TRADICIONAL

Parâmetros	Tradicional	Coeficientes relacionados
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	

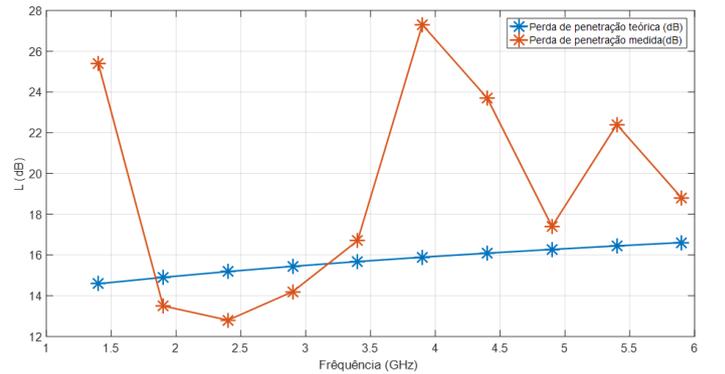


Fig. 5.- Comparação da perda de penetração para $P = 0,5$.

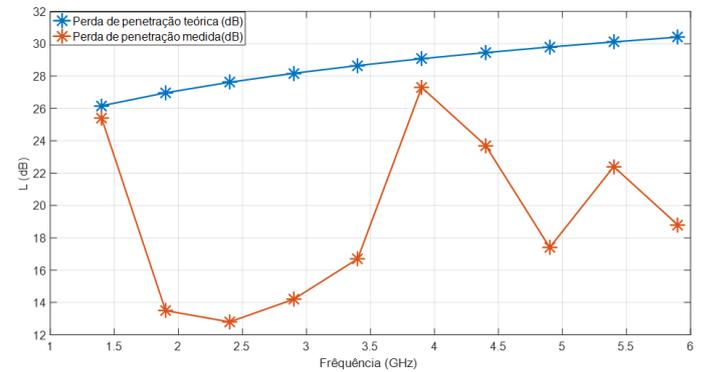


Fig. 6. Comparação da perda de penetração para $P = 0,90$.

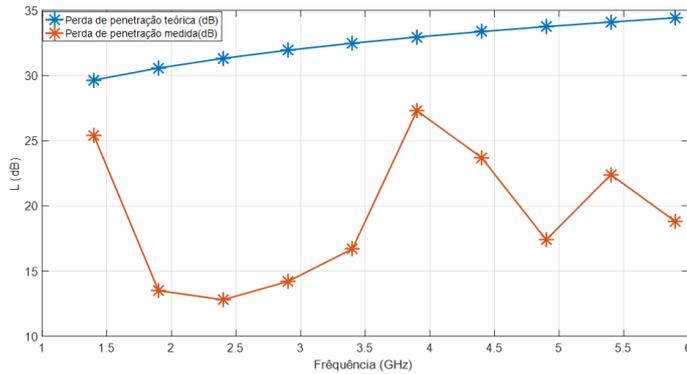


Fig. 7 - Comparação da perda de penetração para $P = 0,95$.

O que se observa é que a perda calculada pelo modelo ITU cresce pouco com a frequência, seguindo o mesmo da Fig. 1 da Recomendação ITU-R P.2109-1. Tal perda chega a diferenças de quase 12 dB para $P = 50\%$, 15 dB para $P = 90\%$ e 17 dB para $P = 95\%$, quando comparadas às perdas experimentais. Naturalmente, quanto maior P , a probabilidade de que a perda não seja excedida, maior é essa perda. Assim, 50% é a probabilidade de que a perda não exceda 12 dB no caso 1.

V. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo analisar a perda experimental de penetração de sinal rádio através de paredes, na faixa de 1 a 6 GHz, empregando antenas diretivas de forma que a perda real esteja bem próxima da experimental.

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. Nas frequências sondadas, a perda de penetração sofreu uma variação de 12,8 a 27,3 dB para a parede de alvenaria mais espessa (espessura = 21 cm); 0,5 a 10,1 dB para a parede de alvenaria menos espessa (espessura = 14,6 cm); e -0,8 a 4,9 dB na porta de madeira (espessura = 4 cm). O valor negativo significa que houve contribuição de campo pelos multipercursos que chegavam à receptora. Quanto menos espesso o obstáculo, menor foi a faixa de variação da perda com a frequência.

Para a predição de perda, calculada pelo modelo do ITU, observou-se maior valor, para valores mais elevados de P . Vale observar que no seu desenvolvimento, usou-se antena de recepção omnidirecional [1], que captura multipercursos que chegam de qualquer direção e que podem contribuir favoravelmente ou desfavoravelmente para o nível de sinal recebido. Neste trabalho, entretanto, a antena receptora empregada foi diretiva, diferenciando daquela do ITU, pois buscava-se determinar a perda devido ao obstáculo, apenas. Na prática, portanto, o valor de perda encontrado é um valor otimista, quando se usa P elevado como 90% ou 95%, servindo como limiar inferior da perda ocorrida no ambiente *indoor*.

Em suma, este estudo contribui para o conhecimento sobre a perda de propagação de ondas eletromagnéticas através de paredes, no contexto do 5G. Na continuidade deste trabalho, pretende-se realizar mais medições em diferentes obstáculos, de forma a formar um banco de dados sobre perdas de penetração do sinal rádio em diferentes obstáculos. Além disso, a antena de recepção também será trocada por uma omnidirecional, de forma a verificar o ajuste do modelo do ITU R P.2109-1 aos dados obtidos e, se necessário, propor um aprimoramento do

mesmo, incorporando a transmissão através de diferentes obstáculos e considerando as especificidades locais, para melhorar a confiabilidade das predições de cobertura sem fio em ambientes *outdoor-indoor*.

REFERÊNCIAS

- [1] L. H. Gonsioroski¹ and L. da Silva Mello², Measurements of Building Transmission Loss and Delay Spread at 2.5 GHz, Junho 2015
- [2] Recommendation ITU-R P.2109-1, Prediction of building entry loss, P Series Radiowave propagation, Agosto 2019
- [3] Attenuation of Several Common Building Materials: Millimeter-Wave Frequency Bands 28, 73, and 91 GHz, Abril 2020
- [4] Sergio Aguirre, Radio Propagation Into Buildings at 912, 192 and 5990 MHz Using Microcells, US West Technologies, Setembro 1994
- [5] Report ITU-R P.2346-4 - Compilation of measurement data relating to building entry loss, Julho 2021
- [6] Antena Corneta de Faixa Larga DRG 013, Beta Telecom, dezembro 2008.
- [7] Antena Corneta de Faixa Larga DRG 012, Beta Telecom, dezembro 2008.
- [8] Handbook - Spectrum Monitoring, ITU, Radiocommunication Bureau, 2011.
- [9] C. A. m Balanis, Antenna Theory – Analysis and Design