

Modelo de propagação *indoor* no *campus* II do CEFET-MG em 2,45 GHz

Anna Beatriz B. Malaquias, Hugo G. Maia, Danielle M. Okamoto e Sandro Trindade M. Gonçalves

Resumo — Neste trabalho foi desenvolvido um modelo de predição de propagação *indoor* no *campus* do CEFET-MG. Durante o projeto uma campanha de medições de campo, considerando um ambiente de rede sem fio, em 2,45 GHz, foi executada com o objetivo de compreender o canal em que o sinal de informação trafega. As configurações do *setup* de medição e os resultados obtidos serão apresentados e comparados com os modelos encontrados na literatura juntamente com o modelo proposto. Este modelo foi obtido por meio da regressão linear. O coeficiente de determinação foi utilizado para avaliar a variabilidade do modelo proposto em relação aos dados medidos.

Palavras-Chave — Modelos de propagação, ambiente *indoor*, 2,45 GHz, Wi-Fi, campanha de medições.

Abstract — This paper presents a propagation prediction model was developed in an indoor environment of the CEFET-MG. During the project, a field measurement campaign, considering a wireless network environment in the 2.45 GHz frequency band, was performed in order to understand the environment through which the information signal travels. The measurement setup and the results obtained will be presented and compared with the models found in the literature along with the proposed model. This model was obtained through linear regression. The coefficient of determination was used to evaluate the variability of the proposed model compared to the measured data.

Keywords — Propagation models, indoor environment, 2.45 GHz, Wi-Fi, measurement campaign.

I. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento do uso da internet criou uma demanda concorrente por internet de banda larga e acesso ao computador a partir de usuários no mundo inteiro. Particularmente, em países em desenvolvimento como o Brasil, onde a infraestrutura de *backbone* de telecomunicações é insuficiente, existe uma demanda por conectividade de custo acessível e confiável e pela necessidade crescente de conexão de alta velocidade com o propósito de facilitar a comunicação entre residências e empresas, assim como entre ambientes públicos ou privados [1][2].

Com o crescimento da área de telecomunicações, grande parte dos meios de comunicação adota a transmissão de seus sinais através das ondas de rádio e redes sem fio (*wireless*), devido à sua praticidade e baixo custo quando comparado com o sistema cabeado. As redes sem fio Wi-Fi são infraestruturas de comunicação que apresentam diferentes especificações para redes locais sem fio, *Wireless Local Area Network* (WLAN), baseada no padrão IEEE 802.11g cuja faixa usada é de 2,4 GHz ISM (*Industrial Scientific and Medical*) [3]. Dispositivos com certificação Wi-Fi estão habilitados para conexão à internet.

A transmissão de sinais em ambientes *indoor* é dominada pelos fenômenos relacionados à propagação tais como reflexão, refração, dispersão e desvanecimento e, por isso, é necessário manter o nível de sinal em um patamar aceitável (em torno de -100 dBm), uma vez que este sinal é instável e em algumas situações a conexão entre o transmissor e o receptor é perdida [3][4][5]. Estes fenômenos eletromagnéticos causam interferências destrutivas e construtivas que são difíceis de prever através de um modelo analítico. A ausência de planejamento das redes sem fio Wi-Fi pode provocar baixa qualidade, cobertura, capacidade e eficiência no oferecimento deste serviço. Portanto, o planejamento de projeto de cobertura é uma tentativa de prever as variações do sinal quando ocorrem os efeitos indesejados da propagação entre o transmissor e o receptor. O planejamento de projeto de sistemas de comunicação baseado em modelos de propagação é considerado estratégico por atuar na redução de custos e por apresentar um comportamento próximo ao real, baseado apenas em modelos preditivos. A modelagem do comportamento das ondas propagantes tem como objetivo verificar as perdas de sinal no caminho de propagação, a fim de estimar a potência necessária irradiada pelo transmissor, garantindo a qualidade do sinal e evitando desperdício de energia. As características de propagação dependem, entretanto, do ambiente físico no qual a onda se desloca e dos fenômenos físicos a ele associados [1]. Desta forma, é necessário conhecer os fenômenos e as características do local de propagação, bem como os parâmetros determinantes no processo [6][7].

Este trabalho tem como objetivo, por meio de medições de sinal, em campo, no prédio 19 do *campus* II do CEFET-MG, localizado em Belo Horizonte, estabelecer um meio de comparação com modelos clássicos a fim de que seja obtido um modelo que mais se aproxime às condições deste cenário. As previsões, portanto, fornecem uma base para uma interpolação de dados experimentais e, desta forma, expressões matemáticas que possam prever o comportamento de uma onda eletromagnética.

II. MODELOS DE PROPAGAÇÃO *INDOOR*

No presente trabalho serão abordados os modelos teóricos referentes ao ambiente *indoor*, especificamente, laboratórios localizados no quarto andar de um prédio. Os obstáculos a serem estudados neste tipo de ambiente são diversos, pois influenciam na maneira como as ondas eletromagnéticas irão se propagar nestes locais, já que ao longo do caminho ocorre a perda da potência do sinal emitido pelo transmissor. É interessante citar alguns destes obstáculos, como janelas metálicas, paredes de alvenaria, vidros, bancadas, planta do edifício, tipo de tinta usada na parede, quantidade de móveis ou objetos pontiagudos [4][8].

A. Modelo do espaço-livre

O modelo de propagação no espaço-livre é usado para prever a intensidade do sinal recebido quando o transmissor e o receptor possuem visada direta entre eles. Este modelo prevê que a potência recebida diminui com o aumento da distância entre o transmissor e o receptor [9][10]. A potência recebida por uma antena transmissora é inversamente proporcional à distância entre o transmissor e o receptor, conforme a equação 1, que representa a equação do espaço-livre de Friis:

$$P_r(d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \frac{G_t G_r P_t}{L} \quad (1)$$

onde $P_r(d)$ é a potência recebida, G_r é o ganho da antena receptora, G_t é o ganho da antena transmissora, P_t é a potência transmitida, L é o fator de perda do sistema não relacionado à propagação, d é a distância de separação T-R, em metros, e λ é o comprimento de onda, em metros. A equação 3.1 pode ser reescrita para o cálculo da perda de percurso (PL), em dB, conforme a equação 2:

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

B. Modelo Log-Distance

O modelo *Log-Distance* é, provavelmente, o mais citado sobre modelagem de propagação de sinal em redes Wi-Fi na literatura científica [11]. Neste modelo há uma independência em relação à frequência do sinal transmitido e do ganho das antenas transmissora e receptora. Além disso, ele supõe uma relação exponencial entre atenuação e distância, como indicado na equação 3:

$$PL(\text{dB}) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3)$$

onde PL é a perda de percurso, em dB, $PL(d_0)$ a perda no caminho para uma distância de referência d_0 e também é dada em dB e n é o expoente de perda e é um valor que varia com o tipo de ambiente. Para simulação do modelo *Log-Distance* Visada Direta utilizou-se como expoente de perdas $n = 1,6$ (ambiente com visada direta dentro do prédio); já para simulação do modelo *Log-Distance Indoor* utilizou-se $n = 4$ (ambiente com obstrução dentro do prédio) [1].

C. Modelo ITU-R P.1238

O modelo da ITU-R (*International Telecommunication Union*) cuja recomendação é P.1238-8 considera os dados de propagação e os métodos para o planejamento de sistemas de radiocomunicações *indoor* na faixa de frequência entre 300 MHz a 100 GHz. De modo geral, requer informações razoáveis sobre o ambiente e o trajeto em que a onda se propaga. O modelo matemático é apresentado na equação 4 [12]:

$$PL(d)[\text{dB}] = 20 \log(f) + N \log(d) + Lf - 28 \quad (4)$$

onde N é o coeficiente de perda do modelo considerando um ambiente de escritório, f é a frequência, em MHz, d é a

distância entre o transmissor e o receptor (onde $d > 1$ m), em metros, e Lf é o fator de perda de penetração no piso considerando um escritório, em dB [12].

III. CAMPANHA DE MEDIÇÕES DE CAMPO

A. Setup e metodologia

As medições foram realizadas em seis laboratórios e corredor do quarto andar do prédio 19, *campus* II do CEFET-MG. As medições foram realizadas nos turnos da manhã ou da tarde, em horários em que o número de pessoas nos corredores e nos laboratórios era reduzido. Portas e janelas foram mantidas fechadas. O gerador de sinais utilizado foi o N5181A MXG, fabricado pela Agilent Technologies Inc. Ele foi usado para gerar um sinal com parâmetros semelhantes ao sinal de Wi-Fi com potência máxima de 30 dBm, ruído de -121 dBc, em 1 GHz, e frequência de 2,45 GHz. Para que não houvesse outros sinais que não fossem do gerador, os modems do terceiro, do quarto e do quinto andar foram desligados. A antena omnidirecional utilizada na transmissão foi o modelo TL-ANT2408CL da TP-LINK que possui uma faixa de 2,4 GHz a 2,4835 GHz, ganho de 8 dBi e impedância de 50 Ω. Esta foi conectada ao gerador, com o auxílio dos adaptadores da Agilent. A planta baixa do quarto andar do prédio 19 e a posição do gerador de sinais podem ser vistas na Figura 1 [13].



Figura 1: Planta do quarto andar.

O gerador de sinais foi posicionado sobre uma mesa cuja altura era de 70 cm, conforme Figura 2. A mesa foi posicionada cerca de um metro de distância do final do corredor (Figura 3a).



Figura 2: Gerador de sinais da Agilent Technologies Inc., modelo N5181A MXG.

A antena receptora, cujo modelo HyperLOG 6000, foi acoplada ao analisador de espectro para a obtenção do sinal do gerador. Observou-se que o nível do sinal recebido aumentava consideravelmente quando a antena receptora estava apontada em direção ao gerador. Esta apresenta faixa de frequência de operação de 680 MHz a 18 GHz, ganho de 5 dBi e impedância nominal de 50 Ω. O analisador de espectro utilizado foi o portátil da Agilent Technologies Inc, modelo N9912A (Figura 3b), que possui características que permitem medir os sinais com precisão e qualidade na faixa de frequência de 100 kHz a 4 GHz.

As distâncias consideradas no ambiente de obtenção de dados eram de alguns metros, logo não foi necessário um direcionamento tão preciso da antena. O direcionamento foi realizado através da suposição da posição do gerador quando o mesmo não estava em visada direta. A montagem da antena com o analisador pode ser observada na Figura 3b.

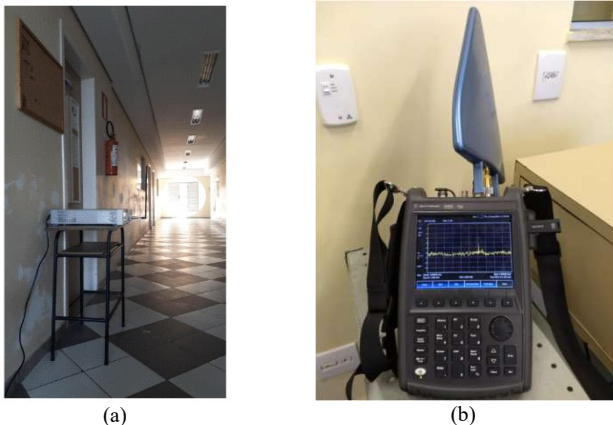


Figura 3: (a) Gerador posicionado no corredor e (b) Antena receptora acoplada ao analisador de espectro portátil.

Inicialmente, mediu-se o nível de potência nos pontos definidos ao longo do corredor e nos seis laboratórios. Os pontos apresentavam uma distância de separação entre eles de 1 m. Durante a campanha foram registrados os valores de potência, em dBm, e da distância em relação ao transmissor, em metros. O teorema de Pitágoras auxiliou no cálculo das distâncias entre o transmissor e o analisador de espectro em cada ponto que o mesmo era posicionado, mantendo a distância de um metro entre os pontos, salvo obstáculos intransponíveis, como, armários, motores, computadores e etc.

IV. RESULTADOS OBTIDOS

Durante a campanha de medições foram realizadas 172 medidas. Para facilitar a análise dos valores medidos, foi construído um gráfico da perda de propagação (*Path Loss*), em dB, versus a distância entre o transmissor e o ponto de

medição, em metros. Após a obtenção das medidas, estes dados foram processados por meio do *software* Octave.

Os valores das perdas de propagação foram calculados através da equação 5:

$$PL[\text{dB}] = EIRP[\text{dB}] - PR_x[\text{dBm}] \tag{5}$$

em que *PL* é a perda de propagação (*Path Loss*), *EIRP* (*Effective Isotropic Radiated Power*) é a potência necessária que deve ser irradiada por uma antena isotrópica para alcançar o mesmo nível de sinal na direção de radiação máxima de uma antena receptora. A *EIRP* considera a potência de transmissão e os ganhos das antenas transmissora e receptora. E *PR_x* é a potência medida pelo analisador de espectro.

O resultado comparativo entre as medidas e os modelos teóricos pode ser visto na Figura 4.

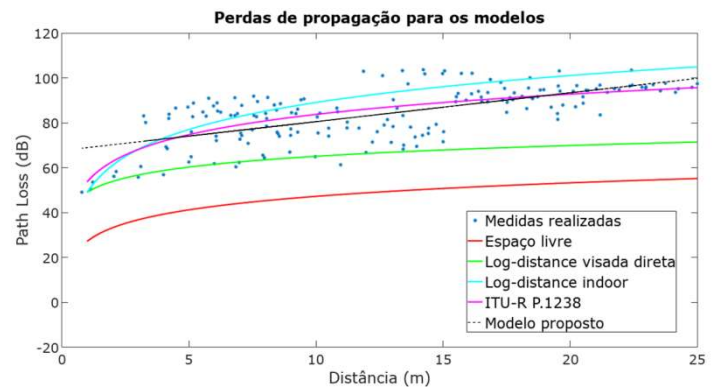


Figura 4: Comparação entre os resultados medidos e os modelos teóricos.

As distâncias percorridas pelos sinais em ambientes *indoors* são consideravelmente menores, porém, a variabilidade destes sinais é muito maior do que nos ambientes *outdoors*. Essa variabilidade pode ser observada nos resultados obtidos em campo na Figura 4.

Além disso, é possível notar que a maior parte das medidas estão compreendidas entre as curvas que correspondem aos modelos de *Log-Distance Indoor*, *Log-Distance Visada Direta* e o ITU-R P.1238. E o modelo do espaço-livre foi o que mais se distanciou das medidas, pois somente considera a distância como fator preponderante para a atenuação do sinal, não considerando o fenômeno de multipercursos e difração que ocorrem em grande quantidade nos ambientes internos, ou seja, a variabilidade deste tipo de ambiente é muito maior para uma faixa menor de distâncias de separação entre transmissor e receptor. Desta forma, este modelo subestima os obstáculos prevendo uma atenuação muito menor do que realmente ocorreu.

Conforme os pontos medidos se afastaram do transmissor, a potência recebida pelo analisador de espectro diminuiu, ou seja, maiores foram as atenuações, consequentemente maiores as perdas de propagação devido à presença de mais multipercursos.

A. Modelo proposto

A Figura 4 apresenta a reta que caracteriza o modelo proposto através da regressão linear. Esta reta minimiza o erro entre os pontos medidos. Este resultado pode ser observado na Figura 5 (Caso I). O parâmetro usado para avaliar a

variabilidade do modelo proposto em relação aos dados medidos é o coeficiente de determinação, ou seja, ele foi usado para medir a precisão deste modelo com base na análise estatística. Um valor próximo de um indica um ajuste perfeito e é, portanto, um modelo muito confiável (100%) para explicar e prever resultados futuros. Um valor próximo de zero (0%), por outro lado, indica que o modelo não é capaz de modelar os dados com precisão.

Para os dados obtidos, o coeficiente de determinação, simbolizado pela letra R, foi de 0,43181. Se analisado, pode-se concluir que o valor é muito baixo. Em outras palavras, o modelo apresenta valores aproximadamente 56% menores do que os medidos. As flutuações rápidas nas potências medidas no receptor são relevantes e representam um indício da existência de efeito de multipercursos.

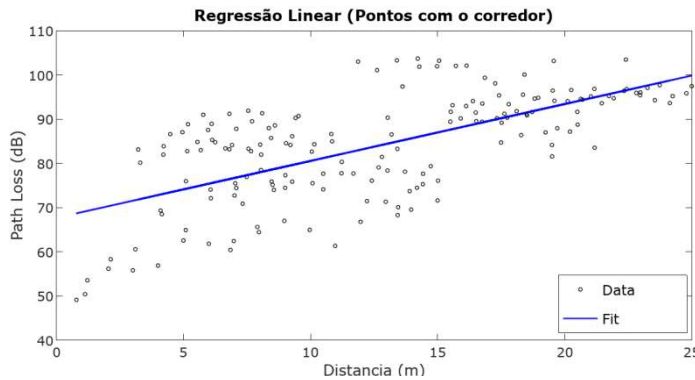


Figura 5: Caso I - Modelo proposto com regressão linear (todos os pontos).

A equação 6 representa a reta do Caso I:

$$PL(dB) = 1,29d + 67,67 \tag{6}$$

onde PL (dB) é a perda de propagação, em dB, e d é a distância do transmissor ao receptor.

Excluindo-se as medidas do corredor e refazendo a regressão linear, obtêm-se o modelo da Figura 6 (Caso II), que possui um coeficiente de determinação de 0,31864. Em outras palavras, o modelo apresenta 31,86% dos valores medidos e resultado pior com relação ao modelo anterior. Desta forma, conclui-se que a dispersão dos pontos ainda é alta.

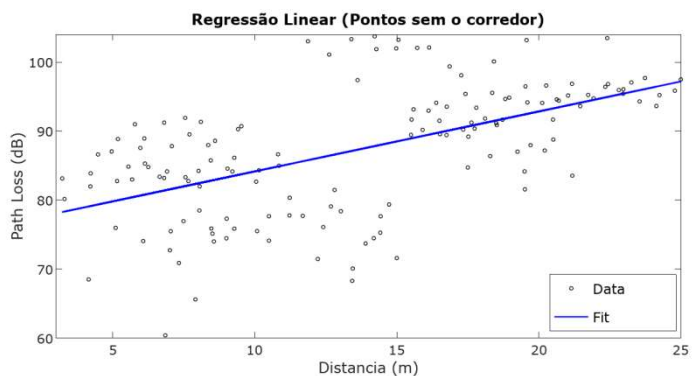


Figura 6: Caso II - Modelo proposto com regressão linear (pontos do corredor desconsiderados).

A equação 7 representa a reta do Caso II:

$$PL(dB) = 0,87d + 75,47 \tag{7}$$

A Figura 7 apresenta apenas os pontos medidos no corredor. O corredor apresenta janelas metálicas e formato L. Neste caso, ora o receptor estava em visada direta com o transmissor, ora havia obstrução entre eles.

A análise de regressão gera uma equação que descreve a relação estatística entre uma ou mais variáveis predictoras e a variável resposta. Na Figura 7, é possível perceber a aproximação que os pontos têm em relação à reta. Seu coeficiente de determinação é igual a $R = 0,64959$ que corresponde a 64,96% dos valores medidos. Este valor foi considerado satisfatório, ainda que apresente pontos dispersivos. A justificativa para estes pontos pode ser devido a fontes desconhecidas e efeitos de multipercursos.

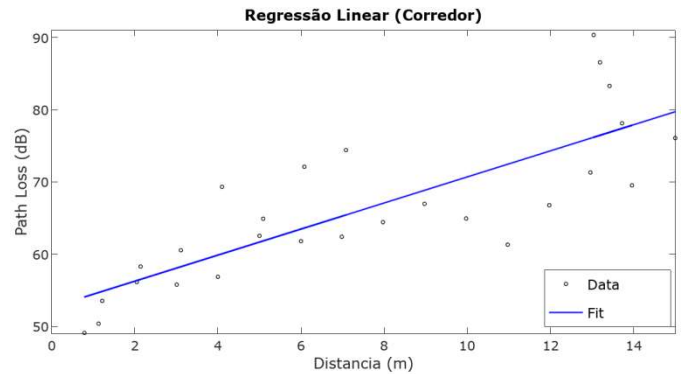


Figura 7: Caso III - Modelo proposto com regressão linear (corredor).

A equação 8 representa a reta do Caso III:

$$PL(dB) = 1,80d + 52,66 \tag{8}$$

No corredor, não havia obstáculos consideráveis, apenas janelas metálicas em suas extremidades. No momento em que as medições estavam sendo realizadas havia um número reduzido de pessoas transitando pelo local. A Figura 8 apresenta a comparação entre as medidas de campo, os modelos teóricos e o modelo para o Caso III.

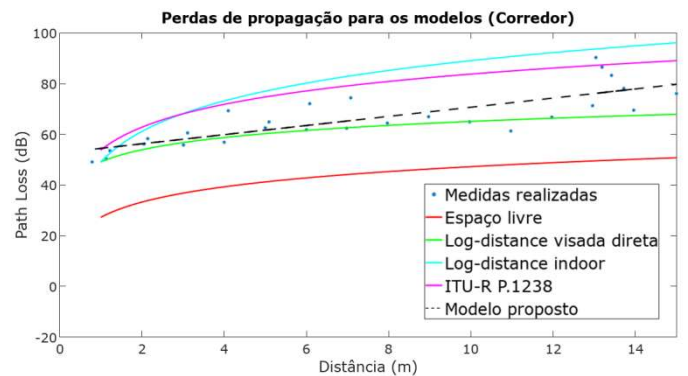


Figura 8: Comparação entre as medidas e os modelos (corredor).

Considerando que em uma boa parte do corredor, o receptor está em linha de visada em relação ao transmissor, sua atenuação se dá basicamente por causa da distância, podendo esses pontos serem melhor representados pelos modelos de ITU-R P.1238 ou Log-Distance Visada Direta.

A Tabela I apresenta os coeficientes de determinação (R) dos seis laboratórios medidos.

TABELA I. COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO (R)

Salas	401	402	403	404	405	406
R	0,1959	0,0515	0,1127	0,0453	0,0034	0,003

De forma geral, todos os resultados realizados em laboratório apresentaram valores próximos de zero ou baixa percentagem. A maioria dos modelos na literatura consideram prédios com certas características específicas de construção e de material. Para cada tipo de material tem-se um expoente de perda específico, tornando a aplicação destes modelos trabalhosa, sendo necessária a determinação de um modelo específico para cada local. De qualquer forma, foi possível observar que estes modelos apresentaram uma pequena aproximação em relação aos resultados medidos, provavelmente, devido aos efeitos da atenuação e de multipercursos provocados por objetos posicionados no ambiente, do material das portas, janelas e paredes.

Para validar o modelo obtido por meio da regressão linear e avaliar a performance dos modelos de propagação da literatura na predição do sinal obtido nas medições calculou-se as estimativas para o Erro Médio Quadrático (RMSE), conforme equação 9.

$$RMSE (dB) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (PL_{model}(i) - PL(i))^2}{n}} \quad (9)$$

onde n é o número total de pontos medidos, PL_{model} é a perda de propagação obtida a partir das equações de cada modelo, em dB e PL é a perda de propagação obtida a partir das medidas de campo, em dB. A Tabela II apresenta as estimativas para o erro médio de predição referente a cada modelo avaliado para o Caso III que avalia apenas o corredor.

TABELA II. COMPARAÇÃO DOS VALORES RMSE ENTRE O MODELO PROPOSTO E OS MODELOS DA LITERATURA PARA O CASO III

Modelos	RMSE Regressão linear (dB)
Log-Distance visada direta	7,17
ITU-R P.1238	11,12
Espaço livre	24,03
Log-Distance <i>indoor</i>	25,53

Observando os resultados obtidos para RMSE, nota-se que o modelo Log-Distance visada direta apresentou o melhor desempenho na estimativa do erro de predição, com um valor obtido de 7,17 dB. Os demais modelos analisados apresentaram erros de predição superiores a 10 dB. O modelo Log-Distance *indoor*, com expoente de perda de 4, superestimou os obstáculos prevendo uma atenuação maior a partir de 3 m de distância, apresentando RMSE de 25,53 dB sendo o pior modelo apresentado para o Caso III.

V. CONCLUSÃO

As medições realizadas permitiram obter um banco de dados com 172 medidas de potência. Um modelo para cada

ambiente do local de medição foi realizado e comparado com medidas e modelos teóricos.

As características dos locais de medições eram distintas, principalmente, quanto aos obstáculos que existiam em cada ambiente, como por exemplo, equipamentos e configurações das bancadas e armários na sala.

Os modelos estudados na revisão bibliográfica contribuíram para a validação do modelo proposto neste trabalho. Para calcular as equações do modelo proposto para cada ambiente, realizou-se uma análise estatística de regressão linear que se ajustou aos resultados medidos.

Portanto, o estudo gerou bons resultados que caracterizaram um modelo de propagação *indoor* para o quarto andar do prédio 19 do CEFET-MG. O modelo representa de forma simples a propagação de ondas eletromagnéticas na frequência de 2,45 GHz para o ambiente em estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] NAJNUDEL, Marcelo. "Estudo de propagação em ambientes fechados para planejamento de WLANs". Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- [2] Lins, Rafael Dueire. "Um novo modelo de propagação para redes Wi-Fi em 2,4 GHz". XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBt 2008. Rio de Janeiro, 2008.
- [3] ESPERANTE, Paulo Guedes e CYMROT, Raquel. "Análise de dados provenientes de propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes indoor". VII Jornada de Iniciação Científica, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2011.
- [4] SARKAR, T. K.; JI, Z.; KIM, K.; MEDOURI, A.; SALAZAR-PALMA, M. "A survey of various propagation models for mobile communication. IEEE Antennas and Propagation Magazine", v. 45, n. 3, p. 51-82, June 2003.
- [5] SEIDEL, Scott Y.; RAPPAPORT, Theodore S. 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings. IEEE transactions on Antennas and Propagation, v. 40, n. 2, p. 207-217, 1992.
- [6] ANDERSEN, Jorgen Bach; RAPPAPORT, Theodore S.; YOSHIDA, Susumu. "Propagation measurements and models for wireless communications channels". IEEE Communications Magazine, v. 33, n. 1, p. 42-49, 1995.
- [7] LLORET, J. et al. "A fast design model for indoor radio coverage in the 2.4 GHz wireless LAN", em Proc. 1st International Symposium on Wireless Communications Systems, Mauritius, 2004, pp. 408-412.
- [8] CHEUNG, K.-W., SAU, J.H.-M. e MURCH, R. D. "A new empirical model for indoor propagation prediction", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 47, no. 3, pp. 996-1001, Ago. 1998.
- [9] LIECHTY, L. C., REIFSNIDER, E. e DURGIN, G. "Developing the Best 2.4 GHz Propagation Model from Active Network Measurements", IEEE 66th Vehicular Conference, Baltimore, 2007, pp. 894-896.
- [10] SUJAK, B. et al. "Indoor propagation channel models for WLAN 802.11b at 2.4 GHz ISM band", em Proc. Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics, Kuala Lumpur, 2005, pp. 373-377.
- [11] OLIVEIRA, J. N. C. de, ALENCAR, M. S., ROCHA Jr., V. C. da e LOPES, W. T. A. "A new propagation model for cellular planning", em Proc. VI International Telecommunications Symposium, Fortaleza, 2006, pp. 35-37.
- [12] ITU-R Recommendation ITU-R P.1238-8. "Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz". ITU-R; Geneva, Switzerland: 2015. p. 22.
- [13] LIBERTINO, Arthur César Soares. "Modelo de propagação indoor no prédio principal do campus II do CEFET-MG em 2,45 GHz". 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – CEFET-MG, Belo Horizonte, 2017.