

# Modelo de extrapolação para perda de propagação para frequência de 10 GHz em ambiente *indoor*

Edemir M. C. Matos, Thiago A. Costa, Iury S. Batalha, Diego K. N. Silva, Bruno S. L. Castro, Gervásio P. S. Cavalcante, Evaldo G. Pelaes

**Resumo**—Em comunicação sem fio tem havido um aumento significativo no uso de diversas redes sem fio, principalmente nas faixas de frequência 2,4 GHz e 5,8 GHz. A demanda por novos serviços em outras faixas é crescente, trazendo como consequência estudos do comportamento do sinal na frequência 10 GHz. Este trabalho estuda o comportamento do sinal na faixa de frequência de 10 GHz, que proporciona uma maior largura de banda e menor interferência co-canal. Foram realizadas campanhas de medições em ambiente *indoor* para as frequências em 2,4 GHz, 5,8 GHz e em 10 GHz e, por conseguinte, a análise dos dados obtidos através de aproximações logarítmicas e lineares. Foi feita uma extrapolação nas predições para 10 GHz, utilizando-se as estimativas e aproximações para as faixas de frequência de 2,4 GHz e 5,8 GHz. Foram utilizados os valores de RMSE (*Root Mean Square Error*), o qual mediu a proximidade entre os valores medidos e os teóricos provenientes da extrapolação. Desta forma, foi possível estabelecer que a extrapolação para perda de propagação em 10 GHz tem melhores resultados quando extrapolado a partir da faixa em 2,4 GHz, para o ambiente em estudo.

**Palavras-Chave**—Indoor, 2,4 GHz, 5,8 GHz, 10 GHz, perda de potência, extrapolação, aproximação logarítmica, estimativa linear.

**Abstract**—In wireless communication there was a significant increase in the use of various wireless networks, especially in the 2.4 GHz and 5.8 GHz bands. The demand for new services in other bands is growing, bringing as consequence the signal behavior studies in 10 GHz band. This work studies signal propagation in the 10 GHz frequency band, which provides a higher bandwidth and lower co-channel interference. Measurement campaigns were carried out in indoor environment for the frequencies 2.4 GHz, 5.8 GHz and 10 GHz and then, the analysis of obtained data by logarithmic and linear approximations. It was also made a extrapolation to 10 GHz predictions, using the estimates and approximations for the 2.4 GHz and 5.8 GHz bands. The RMSE (*Root Mean Square Error*) values were used, which measured the proximity between measured values and theoretical ones from extrapolation. Thus, it was possible to establish that the extrapolation for propagation loss in 10 GHz has better results when extrapolated from the 2.4 GHz band, in the environment under study.

**Keywords**—Indoor, 2.4 GHz, 5.8 GHz, 10 GHz, power loss, extrapolation, logarithmic approximation, linear estimation.

## I. INTRODUÇÃO

A utilização cada vez mais frequente de redes sem fio (*Wireless*), não somente em ambientes domésticos, mas também

Edemir M. C. Matos, Thiago A. Costa, Iury S. Batalha, Diego K. N. Silva, Bruno S. L. Castro, Gervásio P. S. Cavalcante, Evaldo G. Pelaes, Laboratório de Computação e Telecomunicações, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, Brasil, E-mails: {edemirmatos, thiagoaraujo, iurybatalha, diegokasuo, bruno, gervasio, pelaes}@ufpa.br.

em locais corporativos e universidades, vem intensificando a busca de melhorias na recepção desses sinais. Além disso, há também um grande interesse pela utilização de frequências livres ou desregulamentadas pela *Federal Communications Commission* (FCC) [1].

Nos últimos anos o espectro 2,4 GHz tem atraído o interesse acadêmico e da indústria, uma vez que a frequência utilizada nos protocolos 802.11 a/b/g/n, amplamente difundidas e implementadas. Dada sua importância, uma série de trabalhos publicados estudam os fenômenos complexos que influenciam a propagação do sinal num ambiente *indoor* [2], [3], [4].

Na frequência de propagação em 5,8 GHz, o sinal tende a sofrer uma menor interferência quando comparado com a frequência em 2,4 GHz, visto que há menos dispositivos operando nessa faixa de frequência [5], [6], [7]. Isso é semelhante ao padrão IEEE 802.16 – WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), que propõe entregar banda larga à grandes distâncias (5 - 10 km), semelhante a cobertura de telefonia celular por meio de células.

Na literatura são encontrados estudos na frequência de 10 GHz para entender o comportamento da onda em ambiente *indoor*. Dentre estes estudos, podem ser citadas pesquisas sobre a próxima geração de telefonia móvel (5G) como é descrito em [8]. Em [9] estuda-se os efeitos que o corpo humano pode causar à uma rede *indoor* na faixa de frequência de 10 GHz, considerando o corpo humano em movimento. Em [10] é descrito um modelo de perda de percurso para uma frequência centrada em 10,1 GHz, analisando os efeitos que uma janela de vidro e uma parede de concreto podem gerar em uma situação em que o transmissor está em um ambiente *outdoor* e o receptor está em um *indoor*.

Este artigo estuda o comportamento a perda de propagação nas três faixas de frequências. Através das campanhas de medições realizadas no cenário descrito na Seção II, foram obtidos os valores de potência recebida em 40 pontos equidistantes (separados em intervalos de 1 metro) para as frequências 2,4 GHz, 5,8 GHz e 10 GHz. A partir da potência recebida, calculou-se a perda de propagação do sinal para as três frequências em estudo. Desta forma, mediante as estimativas para essas faixas, foi possível extrapolar os valores da perda propagação para o sinal em 10 GHz e compará-los com os valores medidos na mesma frequência.

## II. CAMPANHA DE MEDIÇÕES

O cenário das campanhas de medições escolhido foi um ambiente *indoor*, descrito como um corredor do prédio do

LECE (Laboratório de Engenharia da Computação e Elétrica) da UFPA (Universidade Federal do Pará) em Belém do estado Pará, e em condições de visada direta. Este cenário caracteriza-se como escritório devido a composição do ambiente. O cenário é ilustrado (Figura 1) a seguir.

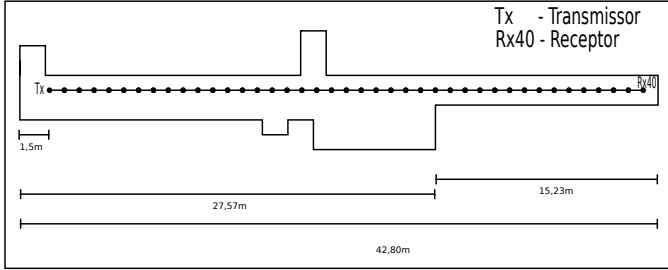


Fig. 1. Cenário do corredor

O corredor tem comprimento de 42,8 m. A posição do transmissor (Tx) está localizado a 1,5 m da parede. A posição do transmissor é fixa, enquanto que o receptor (Rx) foi deslocado em intervalos de distância de 1 metro até chegar à posição Rx40 (correspondente à distância de 40 m entre Tx e o Rx). Tal cenário é mostrado na Figura 1.

As campanhas de medições foram realizadas para três faixas de frequência: 2,4 GHz, 5,8 GHz e 10 GHz. Com o propósito de obter o valor da potência recebida. Na frequência de 2,4 GHz utilizou-se uma antena com abertura de 30° e 15 dB de ganho e uma antena com abertura de 30° e 8 dB de ganho para a transmissão e recepção, respectivamente. Em relação à altura as antenas estavam posicionadas a 1,35 m do chão.

Para a frequência de 5,8 GHz foram utilizadas duas antenas omnidirecionais com 8 dBi de ganho para a transmissão e recepção da potência do sinal, em relação à altura as antenas estavam posicionadas a 1,39 m do chão.

Na frequência de 10 GHz foram utilizadas duas antenas omnidirecionais com 2,5 dBi de ganho para a transmissão e recepção com altura de 1,39 m.

Em 2,4 GHz utilizou-se um varredor sintetizador 83752A Hewlett Packard com potência de transmissão de 15 dBm. Ao passo que em 5,8 GHz e 10 GHz a potência de transmissão foi de 20 dBm. Utilizou-se o Analisador de Sinal MS2692A para obter a média da potência recebida em cada ponto de medição para as três frequências.

### III. RESULTADOS

A partir da potência recebida (dBm) na campanha de medições para as frequências 2,4 GHz e 5,8 GHz, calculou-se a perda de propagação dos sinais e realizou-se uma análise destas perdas através da aproximação de uma função logarítmica representada pela Equação 1. É interessante mencionar que no cenário das medições há inúmeros dispositivos no prédio operando na faixa de frequência de 2,4 GHz (conforme a Figura 2), provocando interferência co-canal se comparada a 5,8 GHz. Como apresentado na Figura 3, observou-se que a frequência em 2,4 GHz demonstrou ter menor perda de propagação do sinal recebido ao longo do percurso, este comportamento já era esperado.

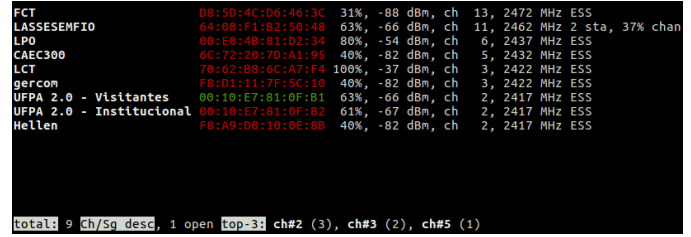


Fig. 2. Redes WiFi na faixa de 2,4 GHz

$$L = a + b \log(d) \quad (1)$$

Onde:

$d$  – é a distância em metros;

$L$  – é a perda de propagação, dada em dB;

$a$  e  $b$  – são constantes.

Analisando-se os dados da Figura 3 (a) e aproximando-se pela expressão Equação 1 obtém-se as Equações 2 e 3 para a perda de propagação do sinal em 2,4 GHz e 5,8 GHz, respectivamente.

$$L_{2,4 \text{ GHz}} = 60,84 + 14,38 \log(d) \quad (2)$$

$$L_{5,8 \text{ GHz}} = 65,49 + 12,1 \log(d) \quad (3)$$

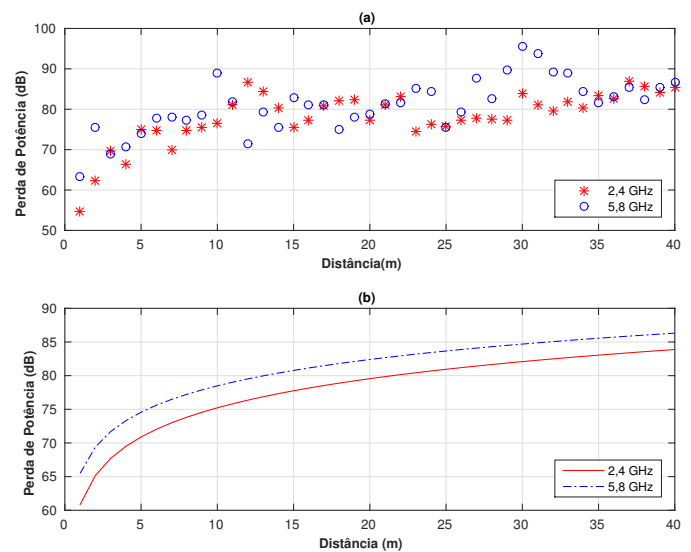


Fig. 3. Dados Medidos (a) e Aproximação logarítmica (b)

A partir da representação das respectivas aproximações logarítmicas (Figura 3 (b)), formulou-se estimativas de função linear (representado pela Equação 4) através do método matemático conhecido com Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) [11], obtendo-se os valores dos coeficientes da Equação 4. O resultado destas estimativas podem ser visualizadas na Figura 4.

$$Y = ax + b \quad (4)$$

Onde:

$x$  – é a distância em metros;  
 $y$  – é a perda de propagação, dada em  $dB$ ;  
 $a$  e  $b$  – são constantes.

Aplicando-se o MMQ nas aproximações logarítmicas das respectivas Equações 2 e 3, obteve-se as Equações 5 e 6, respectivamente.

$$Y_{2,4 \text{ GHz}} = 0,42x + 69,33 \quad (5)$$

$$Y_{5,8 \text{ GHz}} = 0,38x + 73,16 \quad (6)$$

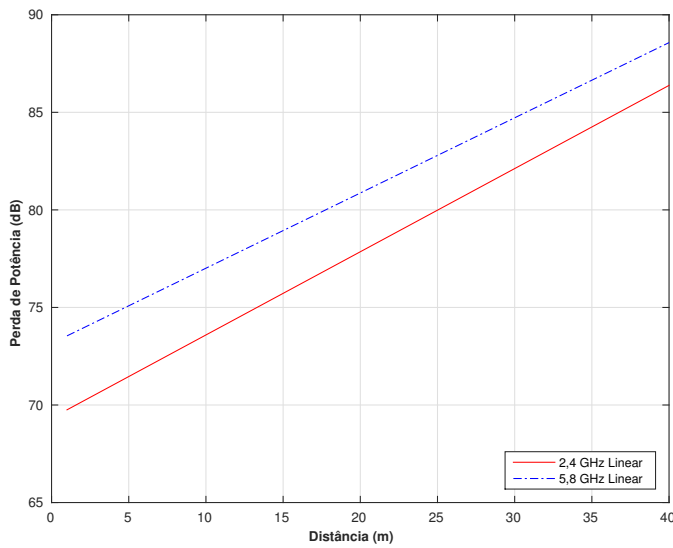


Fig. 4. Estimativa Linear

Com as duas retas obtidas, foi possível realizar a média das distâncias entre elas, de tal forma que  $\Delta$  ( $dB$ ) é a média da distância entre a reta  $y_{2,4 \text{ GHz}}$  e  $y_{5,8 \text{ GHz}}$ , calculada a partir da Equação 7, no qual  $\Delta$  teve o valor em torno de  $3 \text{ dB}$ .

$$\Delta = \left| \frac{\sum_{i=1}^n \frac{y_{2,4 \text{ GHz},i} - y_{5,8 \text{ GHz},i}}{n}}{n} \right| \quad (7)$$

Com o valor de  $\Delta$  foi possível realizar a mudança da análise em função da distância ( $m$ ) para a frequência ( $GHz$ ). Adota-se que  $\Delta_1$  (distância relativa de  $2,4 \text{ GHz}$  para  $5,8 \text{ GHz}$ ) será igual a  $3 \text{ dB}$ , desta forma  $\Delta_2$  (distância relativa de  $5,8 \text{ GHz}$  para  $2,4 \text{ GHz}$ ) terá o valor igual a  $-3 \text{ dB}$ . A Figura 5 representa as variações das distâncias de perda de potência (Figura 5 (a)) e suas respectivas aproximações logarítmicas (Figura 5 (b)) em função da frequência. Suas aproximações logarítmicas, com  $f$  em  $GHz$ , são expressas por:

$$L_{\Delta_1} = -2,97 + 7,8 \log(f) \quad (8)$$

$$L_{\Delta_2} = -5.96 + 7,8 \log(f) \quad (9)$$

Os valores do gráfico da Figura 6 (a), foram obtidos a partir da Equações 10 e 11. O gráfico da Figura 6 (b) foi aproximado pela Equação 1 aplicando-se nas Equações 10 e 11, respectivamente. Percebe-se que com a frequência

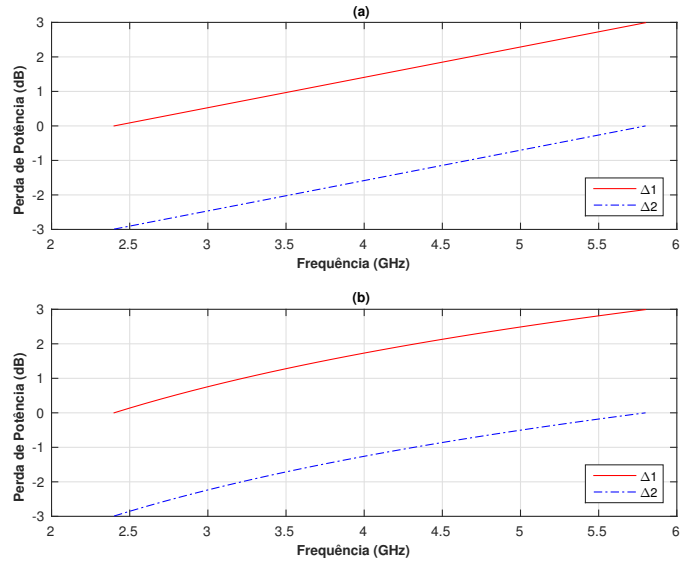


Fig. 5. Variações das distâncias de perda de potência (a) e Aproximações logarítmicas (b)

constante em  $10 \text{ GHz}$ , a perda de propagação ficará dependente da distância.

$$y_{\Delta_1} = y_{2,4 \text{ GHz}} + L_{\Delta_1}(f = 10GHz) \quad (10)$$

$$y_{\Delta_2} = y_{5,8 \text{ GHz}} + L_{\Delta_2}(f = 10GHz) \quad (11)$$

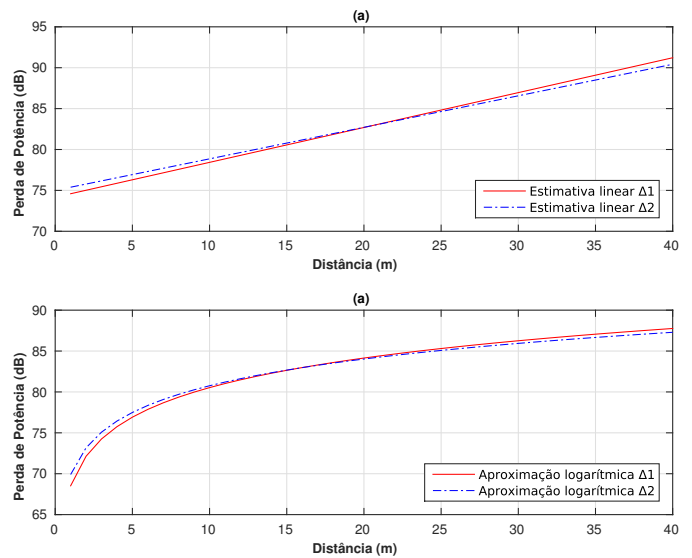


Fig. 6. Estimativa linear (a) e Aproximação logarítmica (b)

Na Figura 7, apresenta-se gráficos com valores extrapolados para perda de potência no cenário de estudo na faixa de  $10 \text{ GHz}$ , obtidos a partir da tendência logarítmica de  $y_{\Delta_1}$  e  $y_{\Delta_2}$ , formulando-se as Equações 12 e 13, respectivamente. Na Figura 7 também apresenta-se o gráfico da tendência logarítmica dos dados medidos para a mesma faixa de  $10 \text{ GHz}$ .

$$L_{10 \text{ GHz}\Delta_1} = 68,52 + 12 \log(d) \quad (12)$$

$$L_{10\text{ GHz}\Delta 2} = 69,9 + 10,85 \log(d) \quad (13)$$

Onde  $d$  representa a distância entre o transmissor e receptor em metros.

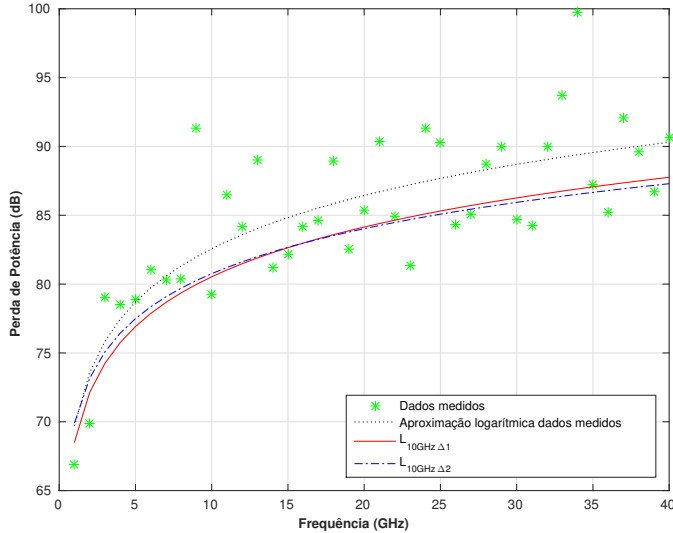


Fig. 7. Aproximação da potência recebida para frequência de 10 GHz

A Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE – *Root Mean Square Error*) é dada pela Equação 14, é uma medida utilizada neste trabalho para avaliar o quão próximo dos pontos teóricos (extrapolados) os pontos medidos ficaram. Os valores de RMSE calculados para  $L_{10\text{ GHz}\Delta 1}$  e  $L_{10\text{ GHz}\Delta 2}$  foram de 2,23 dB e 2,33 dB, respectivamente.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}} \quad (14)$$

Analisando-se os valores RMSE obtidos, pode-se determinar que a melhor representação, a partir da extrapolação, para a frequência de 10 GHz no cenário descrito foi através dos valores pertencentes às medidas da frequência em 2,4 GHz (Equação 12). Sendo que o mesmo apresentou menor valor RMSE, considerado baixo [12].

#### IV. CONCLUSÕES

O estudo do comportamento da frequência em 10 GHz tem apresentado crescente interesse em comunicação sem fio, onde um dos fatos que contribuem para isto é a não concorrência com outros dispositivos/equipamentos nesta mesma faixa. A extrapolação proposta por este trabalho obteve resultados satisfatórios, pois se obteve um valor RMSE considerado baixo, através da análise do comportamento dos sinais nas frequências em 2,4 GHz e 5,8 GHz. Esta análise utilizou aproximações lineares e logarítmicas através das médias das distâncias, onde foi possível calcular os coeficientes de extrapolação e representar a perda de potência recebida para 10 GHz. Para o cenário estudado neste trabalho pode-se concluir que a extrapolação para 10 GHz a partir de dados medidos em 2,4 GHz obteve o melhor resultado. Este estudo abre caminho

para extrapolação da perda de propagação para outras faixas de frequências sem a necessidade de haver medições, mas estimar a partir de medições conhecidas.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem todo apoio empregado pelos membros do Laboratório de Computação e Telecomunicações (LCT) da Universidade Federal do Pará (UFPA). Ao CNPq pelo apoio financeiro em forma de bolsa.

#### REFERÊNCIAS

- [1] M. Boutin, A. Benzakour, C. Despains, and S. Affes, "Radio wave characterization and modeling in underground mine tunnels," vol. 56, no. 2, pp. 540–549, 2008.
- [2] E. Hašimbegović and E. Kočan, "Experimental results for statistical properties of signal envelope in indoor fading channel at 2.4GHz," in *Telecommunications Forum Telfor (TELFOR), 2014 22nd*, pp. 230–233, Nov. 2014.
- [3] A. Tkac and V. Wieser, "Channel estimation using measurement of channel impulse response," in *ELEKTRO, 2014*, pp. 113–117, May 2014.
- [4] T. Chrysikos and S. Kotsopoulos, "Site-specific validation of path loss models and large-scale fading characterization for a complex urban propagation topology at 2.4 ghz," in *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, vol. 2, pp. 2078–0958, 2013.
- [5] Z. H. Hu, Y. Nechayev, and P. Hall, "Measurements and statistical analysis of the transmission channel between two wireless body area networks at 2.45GHz and 5.8GHz," in *ICECom, 2010 Conference Proceedings*, pp. 1–4, Sept. 2010.
- [6] Y. Azar, H. Zhao, and M. E. Knox, "Polarization diversity measurements at 5.8 GHz for penetration loss and reflectivity of common building materials in an indoor environment," in *Third International Conference on Future Generation Communication Technologies (FGCT 2014)*, pp. 50–54, Aug. 2014.
- [7] L. dos Santos Lima, L. F. G. Soares, and M. Endler, "WiMAX: Padrão IEEE 802.16 para banda larga sem fio," monografia, Pontifícia Universidade Católica do Rio De Janeiro, Setembro 2004.
- [8] L. C. Eras, I. Batalha, D. K. N. da Silva, H. R. O. Ferreira, W. S. F. 1, F. J. B. Barros, and G. P. S. Cavalcante, "Measurements and modeling for indoor environments analysis at 10 GHz for 5G," in *9th European Conference on Antennas and Propagation, 2015. EUCAP 2015*, 2015.
- [9] Y. Huang, L. Talbi, T. A. Denidni, A. Charbonneau, and M. Otmani, "Modeling human motion for indoor radio channel at 10 GHz," in *Proc. Int. Symp. Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, pp. 733–736, Dec. 2005.
- [10] A. Roivainen, V. Hovinen, N. Tervo, and M. Latva-aho, "Outdoor-to-indoor path loss modeling at 10.1 GHz," in *Proc. 10th European Conf. Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–4, Apr. 2016.
- [11] O. Helene, *Metodos dos Minimos Quadrados*. Editora Livraria da Física, 2006.
- [12] S. P. Sotiropoulos, S. K. Goudos, K. A. Gotsis, K. Siakavara, and J. N. Sahalos, "Application of a composite differential evolution algorithm in optimal neural network design for propagation path-loss prediction in mobile communication systems," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 364–367, 2013.