

# Caracterização da Perda de Percurso Indoor de Redes 5G em Ondas Milimétricas

Anderson Fagiani e Arismar Cerqueira Sodré Junior

**Resumo**—As futuras redes móveis de quinta geração (5G) provavelmente irão operar na faixa de ondas milimétricas, com a finalidade de prover taxas superiores a 1 Gbps por usuário. Este artigo apresenta uma análise experimental da perda de percurso e do coeficiente de propagação em 28 e 38 GHz, que são faixas de frequências consideradas potenciais para sistemas 5G. As medidas foram realizadas em ambientes com propagação *indoor*. O valor gamma do modelo estatístico de propagação ABG (*Alpha-Beta-Gamma*) foi utilizado para a caracterização da perda de percurso. Já a estimação do coeficiente de propagação foi obtida por meio da aplicação do método de regressão não linear, por resultar em menor erro quadrático médio (RMSE – Root Mean Square Error).

**Palavras-Chave**—5G, comunicações celulares, indoor, ondas milimétricas, propagação.

**Abstract**—The future 5G networks will probably operate in mm-waves, with the aim of providing throughput higher than 1 Gbps per user. This paper presents an experimental performance analysis of the path loss and propagation coefficient at 28 and 38 GHz, which have been considered as potential frequency ranges for 5G systems. The measurements were carried in indoor environments. The gamma value of the ABG (*Alpha-Beta-Gamma*) statistic propagation model has been utilized for the path loss characterization. On the other hand, the estimation of the propagation coefficient has been obtained, by means of applying the nonlinear regression method to reduce the *Root Mean Square Error (RMSE)*.

**Keywords**—5G, indoor, mobile communication, millimeter-wave, propagation.

## I. INTRODUÇÃO

As redes de acesso das operadoras de telecomunicações vêm demandando maiores taxas e larguras de bandas de transmissão para escoar as informações geradas pelos seus usuários. Tal fenômeno é um reflexo do aumento do tráfego de informações entre os aplicativos dos dispositivos móveis. A faixa de ondas milimétricas tem sido considerada promissora para atender a esta crescente demanda das redes sem fio, pois possibilitam utilizar larguras de bandas de 1 GHz ou mais [1]. As pesquisas de transmissão sem fio da quinta geração de comunicações móveis (5G) tem-se concentrado nas faixas de frequências de ondas milimétricas, com destaque para as frequências de 28 e 38 GHz [1]. Alguns países já sinalizaram o interesse de utilizar outras faixas de frequências, porém, a proposta para a definição final, está prevista para 2019 no *World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19)* [2].

O sinal na faixa de ondas milimétricas possui comprimento de onda relativamente muito pequeno se comparado às dimensões dos obstáculos encontrados no meio físico. A frente

de onda do sinal de RF (radiofrequência) contorna os obstáculos por meio da reflexão ou da difração [3], espalhando-se por toda área, mesmo que trajeto entre o transmissor e o receptor esteja obstruído por obstáculos. Entretanto, essas novas frentes de ondas resultantes irão sofrer flutuações aleatórias de comportamento gaussiano em sua intensidade de potência, provocando o fenômeno conhecido como *sombreamento (shadowing)* [1, 3].

O estudo do comportamento da intensidade de potência do sinal propagado com o efeito do sombreamento em diferentes tipos de ambientes é de suma importância para a engenharia de telecomunicações. Com utilizações nos desenvolvimentos de novos modelos estatísticos de propagação que irão descrever os valores de perda de percurso de uma determinada área de cobertura. E, por meio das análises computacionais, possibilitarão que sejam desenvolvidos novos tipos de antenas mais eficientes. O objetivo deste trabalho é demonstrar o comportamento da perda de percurso do sinal transmitido em ondas milimétricas em ambientes *indoor*, e validar o método de caracterização para este tipo de local. Como contribuição é realizada uma análise estatística da perda de percurso do parâmetro  $\gamma$  do modelo de propagação ABG com sistema operando em uma única frequência de transmissão.

O trabalho está estruturado em quatro seções. A Seção II descreve os métodos para a caracterização da perda por percurso e a estimação do coeficiente de propagação. Na Seção III descreve o ambiente de medidas e o setup experimental utilizado. Na Seção IV apresenta a campanha de medições e os resultados experimentais obtidos. As conclusões são apresentadas na Seção V.

## II. PERDA DE PERCURSO E ESTIMAÇÃO DO COEFICIENTE DE PROPAGAÇÃO

A perda de percurso de um canal de comunicação é definida pela relação entre as potências dos sinais transmitidos pelo recebido em decibel [4]. Os modelos de propagação teóricos e os empíricos indicam que a intensidade do sinal recebido diminui logaritmicamente com a distância, seja em ambientes *indoor* ou *outdoor* [4]. A perda de percurso média em grande escala para uma separação qualquer entre transmissor e receptor, é expressa como uma função da distância ponderada pelo expoente de perda de percurso:

$$\overline{PL}(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^\gamma \quad (1)$$

onde  $\gamma$  é o expoente de perda por percurso que indica a razão com a qual essa perda aumenta com relação à distância  $d$  entre transmissor e receptor, e  $d_0$  é a distância de referência com

valor típico de 1 m em ondas milimétricas [4]. Esta distância de referência mínima deve ser considerada 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. O valor do expoente  $\gamma$  igual a 2 equivale ao modelo de transmissão direta entre transmissor e receptor sem obstruções no sinal propagado, conhecido como propagação no espaço livre. Esse efeito é descrito pela Equação de Friis [4, 5], a qual modela um canal de comunicação do tipo *line-of-sight* (LOS), o canal de comunicação que não possui a característica de transmissão direta é classificado como *non-line-of-sight* (NLOS). O modelo de perda por percurso média apresentado na Equação (1) pode ser redefinida em escala logarítmica por

$$\overline{PL}(dB) = \overline{PL}(d_0) + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2)$$

O modelo descrito na Equação (2) não considera o fato de que os efeitos do ruído ambiente e o valor do sombreamento podem ser muito diferentes em locais distintos dentro da mesma separação entre o transmissor e receptor. A Equação (3) considera esses efeitos do ruído e do sombreamento sobre a perda por percurso, a qual em medições realizadas em campo têm mostrado que, para qualquer valor de distância, a perda por percurso é uma variável aleatória e com distribuição log-normal em torno do valor médio dependente da distância, conforme indicado na Equação:

$$\overline{PL}(dB) = \overline{PL}(d_0) + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3)$$

onde  $X_\sigma$  é a variável aleatória com distribuição gaussiana de média zero e desvio padrão  $\sigma$ , valor esse medido comumente em dB [6]. Esse fenômeno produzido pela distribuição log-normal, nas amostras do sinal propagado é conhecido como sombreamento log-normal.

Contudo, somente a adição da variável aleatória com distribuição log-normal não modela o sombreamento presente no canal de comunicação de forma completa. As variações aleatórias no sinal propagado são marcadas por flutuações lentas que conseqüentemente irão implicar na existência de uma correlação não nula entre as amostras ao longo do tempo de um determinado ponto de medição. Ou seja, estas variações aleatórias temporais irão possuir uma correlação no domínio temporal. Considerando a mobilidade do dispositivo receptor e sua configuração espacial no canal de comunicação a correlação temporal entre as amostras do sinal está diretamente relacionada com a correlação espacial das amostras do sinal no canal de comunicação. Portanto, os efeitos do sombreamento provocados no sinal recebido irão possuir uma correlação tanto no domínio temporal quanto no espacial, que conseqüentemente irão provocar a variabilidade da potência média recebida. E tornando as correlações entre os domínios temporais e espaciais das variáveis aleatórias do sinal medido modelar o sombreamento do canal [7-9]. A proposta clássica da função de correlação entre as amostras do sinal a qual modela o sombreamento foi proposta por Gudmundson [10]:

$$R(k) = \sigma^2 a^{|k|} \quad (4)$$

onde

$$a = \varepsilon_d \frac{vt}{d} \quad (5)$$

sendo que  $\sigma^2$  é a variância provocada no sinal com valores típicos entre 3 a 10 dB [6],  $\varepsilon_d$  é o coeficiente de correlação do

sinal amostrado, por  $k$  amostras, entre dois pontos separados por uma distância  $d$ . Os parâmetros  $v$  e  $t$  são respectivamente a velocidade do receptor e o intervalo de tempo entre as amostras do sinal recebido [10].

Devidamente caracterizadas as amostras do sinal propagado com o efeito do sombreamento, pode-se estimar o valor do expoente  $\gamma$  na caracterização da perda por percurso no canal de comunicação onde o sinal é transmitido. Tipicamente, esta estimação é realizada por algoritmos matemáticos de regressão não-linear, de modo que o erro quadrático médio entre os pontos medidos e os modelados seja minimizado. A proposta para a estimação do coeficiente de propagação é dada por [11]:

$$\gamma = \frac{P_R(d_0) - P_R(d_{RX})}{10\left\{\log_{10}\left(\frac{d_{RX}}{d_k}\right) - \log_{10}\left(\frac{d_0}{d_k}\right)\right\}} \quad (6)$$

onde  $P_R$  é a potência medida no receptor,  $d_0$  e  $d_{RX}$  denotam respectivamente as distâncias de referência e a distância do percurso entre o transmissor e o receptor, e  $d_k$  é a distância de espaçamento entre duas amostras sucessivas do sinal medido. A Figura 1 apresenta a validação do método de regressão não-linear. Na qual a perda por percurso calculada considerou um coeficiente de propagação igual a 2 dB para uma transmissão em ondas milimétricas de 28 GHz. As amostras geradas, simulando o efeito do sombreamento no sinal transmitido, foram geradas aleatoriamente com distribuições log-normal e desvio padrão de 2 dB [12]. No método estimação do coeficiente de propagação utilizando a regressão não-linear mostrado na Equação 6, resultou no valor do coeficiente de propagação médio de 2,018 dB, após obedecer o critério de Monte Carlo para 1.000 simulações [13]. Cada valor de amostra apresentada no gráfico, é o resultado médio de 1.000 simulações realizadas em cada intervalo de distância.

A raiz do erro quadrático Médio (RMSE – *Root Mean Square Error*) apresentada na Equação 7 é um critério utilizado nesse trabalho para avaliar o desempenho entre os valores do modelo teórico com o modelo que utiliza a regressão não-linear proposta na Equação 6. O resultado apresentado entre o modelo teórico e o simulado levou ao valor da raiz do erro quadrático médio de  $\approx 0,9\%$ , obedecendo ao critério de Monte Carlo [11]:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(p_i - p_{e,i})^2}{n}} \quad (7)$$

onde  $p_i$  e  $p_{e,i}$  denotam respectivamente os valores das amostras teóricas e simuladas para  $n$ ésimas realizações.

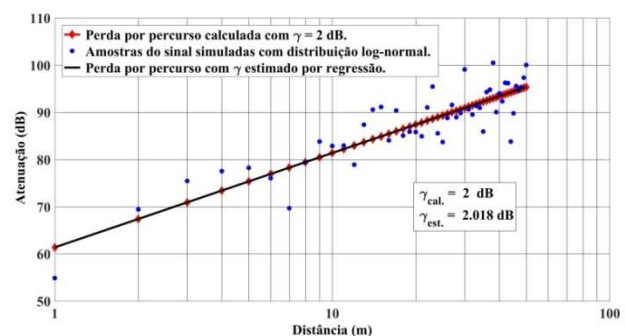


Fig. 1. Representação da perda por percurso para uma frequência de 28 GHz sob o efeito do sombreamento.

Um próximo passo é necessário a utilização de um modelo também validado que descreva por completo a perda por percurso com sombreamento nas faixas das ondas milimétricas. O modelo ABG (*Alpha-Beta-Gamma*) proposto em [14], é um modelo estatístico, que possui quatro parâmetros na determinação da perda por percurso média em função da distância e da frequência de transmissão, conforme apresentada na Equação 8:

$$\overline{PL}(dB)_{ABG} = 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \beta + 10\gamma \log\left(\frac{f}{f_0}\right) + X_{\sigma}^{ABG} \quad (8)$$

O  $\overline{PL}(dB)_{ABG}$  indica a perda por percurso média, valor esse medido em dB,  $\alpha$  e  $\gamma$  são coeficientes de perda por percurso dependentes da distância e da frequência respectivamente [14].  $\beta$  é o valor medido em decibel para compensar a perda por percurso [14].  $X_{\sigma}^{ABG}$  é a variável aleatória de comportamento gaussiano e média zero, com desvio padrão  $\sigma$  medido em dB, a qual descreve o sombreamento presente no canal de comunicação em função da distância e da frequência. Os parâmetros  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$  e  $\sigma$  são obtidos por meios de medições e processos estatísticos, de que forma que minimize o desvio padrão [14].

O modelo ABG considera uma análise com múltiplas frequências, quando analisado com uma única frequência é atribuído o valor 2 para o parâmetro  $\gamma$ , que se assemelha ao modelo *floating-intercept* AB proposto no 3<sup>rd</sup> *Generation Partnership Project* (3GPP) [15]. Os testes realizados nesse trabalho teve o objetivo de caracterizar o valor de  $\gamma$  em frequência de transmissão única para ambiente indoor. Outros modelos que descrevem a perda por percurso, como CI *Closed-In* (CI) e *Closed-In* com frequência ponderada (CIF) também são propostos para as análises nas faixas de ondas milimétricas. Entretanto, os estudos comparativos já realizados em [15] não resultam em diferenças significativas que impactam nos resultados desse trabalho.

### III. CENÁRIOS DOS TESTES

Os estudos de propagação em 28 e 38 GHz foram realizados no Laboratório *Wireless and Optical Convergent Access* (WOCA) em ambiente *indoor* no prédio do campus do Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL). Com o objetivo de reproduzir dois cenários de propagação distintos (LOS e NLOS), o transmissor foi instalado em duas posições distintas: interna e sem obstruções, denotado como TX-L1, para reproduzir o ambiente LOS. E interna e com obstruções de alvenarias e móveis, denotado como TX-L2, para reproduzir o ambiente NLOS. As posições relativas aos pontos de medidas bem como as localizações usadas na transmissão são apresentadas na Figura 2.

O primeiro cenário *indoor* é o transmissor instalado no corredor com poucas obstruções que o circundam, assemelhando com um canal LOS. O segundo cenário foi instalado o transmissor em um ambiente de laboratório com diversas obstruções de diferentes naturezas que se encontram próximas ao transmissor, os pontos de recepção analisados foram considerados sem a vista direta, em ambiente externo ao laboratório para se caracterizar um canal NLOS. A Figura 3(a) mostra o ambiente do corredor utilizado no primeiro cenário de medidas LOS e na Figura 3(b) o ambiente de laboratório.

Utilizando-se do gerador de sinais Keysight EXG N5173B 9 kHz a 40 GHz, aqui chamado de transmissor, foi transmitidas as frequências de 28 e 38 GHz ambas com nível de potência de portadora de 12 dBm. A antena transmissora utilizada foi do tipo corneta com largura de faixa de operação

de 22,24 – 45 GHz, ganho de 12,6 dBi e abertura de feixe de 19° em 28 GHz [16] e instalada a uma altura de 1,80 m com referência a partir do piso. Na frequência de 38 GHz foi utilizada a mesma antena transmissora, a qual apresentou um ganho de 15,6 dBi e abertura de feixe de 23° [16]. É importante informar, que não havia outros dispositivos operando com estas mesmas frequências de 28 e 38 GHz.

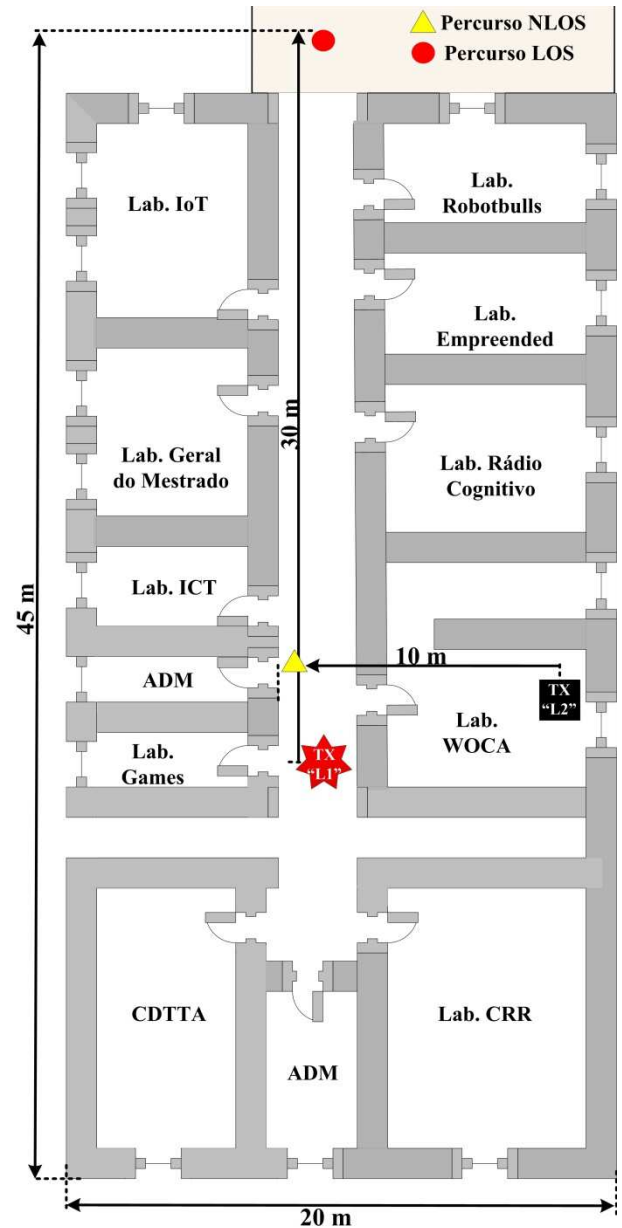


Fig. 2. Estrutura do ambiente e localizações dos transmissores e dos pontos de medidas LOS (TX "L1") e NLOS (TX "L2").



Fig. 3. Ambientes internos utilizados como cenários para as realizações das medidas, (a) ambiente LOS e (b) ambiente NLOS.

O receptor utilizado, foi Keysight o *FieldFox Microwave Analyser* N9952A com a faixa operação de até 50 GHz. A antena receptora utilizada do tipo *slotted-waveguide* [16] foi instalada na altura de 1,80 m de referência a partir do piso. Na frequência de 28 GHz a antena receptora apresentou um ganho de 14 dBi e abertura de feixe de 32°. Na frequência de 38 GHz foi utilizada a mesma antena receptora que apresentou um ganho de 15,3 dBi e com uma abertura de feixe de 35° [16]. A Figura 4 mostra as antenas transmissora e receptora utilizadas nos levantamentos das medidas experimentais.

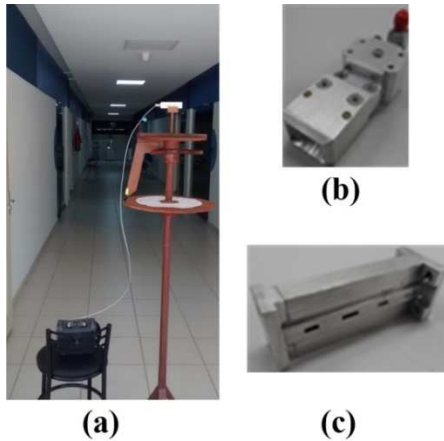


Fig. 4. (a) Setup do experimento de recepção (b) antena de transmissão (c) antena de recepção.

#### IV. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Com os valores das potências recebidas em escalas logarítmicas, tanto para as frequências de 28 e 38 GHz foi determinada a perda de percurso para os sinais. E estimado os valores dos coeficientes de propagação para os cenários LOS e NLOS, utilizando a Equação 6. Foi um total de 30 pontos de medidas para caracterizar o ambiente do tipo LOS em um corredor de 30 metros e 10 medidas para caracterizar o ambiente NLOS com extensão de 10 metros, cada ponto de medidas foram realizadas 1.000 medições para obter o valor médio de potência recebida.

Na Figura 5, as informações foram obtidas no cenário *indoor* caracterizado como LOS. Em 28 GHz, o coeficiente de propagação estimado foi de  $\gamma = 2,1345$  ficando próximo ao valor resultante em simulações que não contém obstruções, ou seja,  $\gamma$  igual a 2. A Figura 6, também é um ambiente caracterizado como do tipo LOS, entretanto para a frequência de transmissão foi configurada em 38 GHz que demonstrou no coeficiente de propagação estimado  $\gamma = 2,0521$  que também é um valor próximo para ambientes simulados que não contém obstruções.

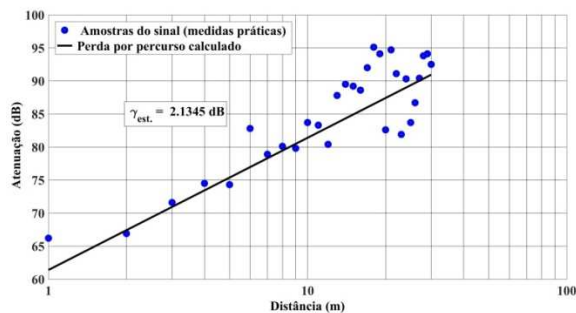


Fig. 5. Estimação do coeficiente de propagação e da perda por percurso na frequência de 28 GHz em ambientes do tipo LOS.

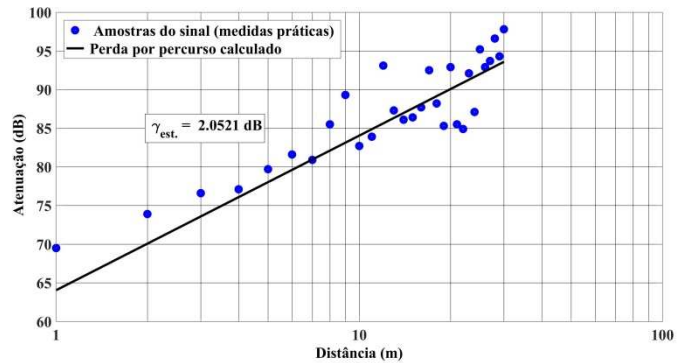


Fig. 6. Estimação do coeficiente de propagação e da perda por percurso na frequência de 38 GHz em ambientes do tipo LOS.

As Figuras 7 e 8 apresentam os resultados para ambientes *indoor* caracterizados como NLOS. Os valores dos coeficientes de propagações estimados resultantes foram de 2,3105 e 2,2267 nas frequências de 28 e 38 GHz respectivamente. Considerando que o percurso NLOS é relativamente curto para um sistema de comunicação, os valores de coeficientes de propagação encontrados foram ligeiramente superiores se comparados com cenário anterior, devido aos tipos de obstruções encontradas no ambiente de teste.

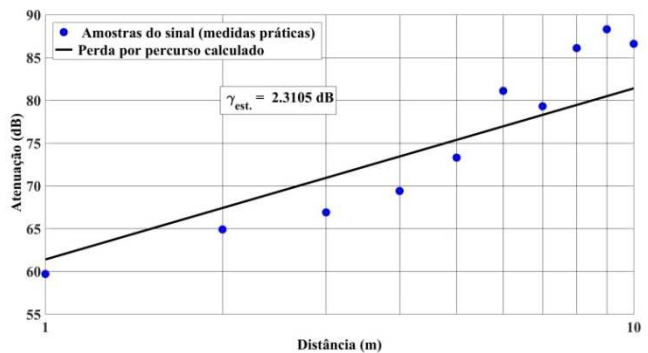


Fig. 7. Estimação do coeficiente de propagação e da perda por percurso na frequência de 28 GHz em ambientes do tipo NLOS.

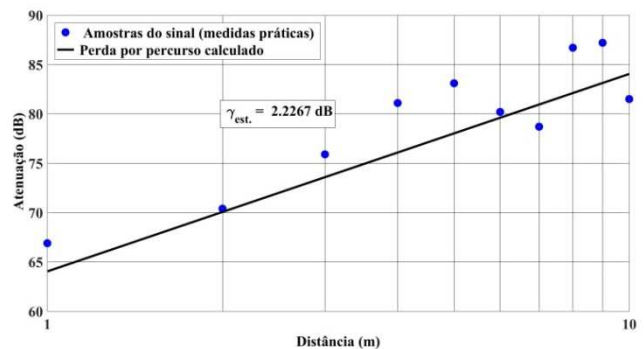


Fig. 8. Estimação do coeficiente de propagação e da perda por percurso na frequência de 38 GHz em ambientes do tipo NLOS.

#### V. CONCLUSÕES

Neste artigo foi investigado o comportamento da perda de percurso em ambiente *indoor* nas frequências de 28 e 38 GHz, utilizando de técnicas de regressões não-lineares para obtenção do coeficiente de propagação. Os resultados apresentados da perda de percurso e do coeficiente de propagação em ambiente

*indoor* com LOS se mostraram próximo ao valor do ambiente classificado como espaço livre, em ambas as frequências. Vale ressaltar que desvios nos valores podem ocorrer devido as reflexões do sinal no ambiente. Para os valores encontrados em um ambiente *indoor* em NLOS irão depender do número de obstruções existentes no trajeto entre o transmissor e o receptor. Entretanto, foi considerado um ambiente NLOS mais próximo das características encontradas para um ambiente de laboratório. Os resultados obtidos irão contribuir referencialmente com outros estudos investigativos e nos desenvolvimentos de simuladores de propagação *indoor* para as faixas de frequências de ondas milimétricas. Além também de aprimorar para outros os métodos mais eficazes para a estimação do coeficiente de propagação em ambientes *indoor*. Como proposta futura de aplicabilidade para os cenários 5G considera-se a proposta de utilização do modem GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*), desenvolvido pelo grupo de pesquisa do Inatel em colaboração com a *Dresden Technical University* na Alemanha [17].

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Finep/Funtel (Convênio 01.14.0231.00 – Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR)), CNPq, CAPES, FAPEMIG, MCTI E FINATEL. Anderson Fagiani agradece ao apoio técnico nas realizações dos experimentos ao Dr. Igor Feliciano da Costa do laboratório WOCA.

#### REFERÊNCIA

- [1] T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, M. K. Samimi, and S. Sun, "Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design", *IEEE Transactions on Communications*, v. 63, n. 9, pp. 3029-3056, Sep. 2015.
- [2] International Telecommunications Union (ITU). (2017, ) ITU. [Online]. [www.itu.int](http://www.itu.int).
- [3] Jr., George R. MacCartney, "Indoor Office Plan Environment and Layout-Based mmWave Path Loss Models for 28 GHz and 73 GHz" *Vehicular Technology Conference Spring, IEEE*, vol. 83, May 2016
- [4] T. S. Rappaport, "Comunicações sem fio - Princípios e práticas", 2nd ed. São Paulo, Brasil: Pearson Brasil, 2009.
- [5] J. A. J. Ribeiro, "Propagação das Ondas Eletromagnéticas - Princípios e Aplicações" 2nd ed. São Paulo, Brasil: Érica, 2004.
- [6] G. R. MacCartney, J. Zhang, S. Nie, T. S. Rappaport, "Path Loss Models for 5G Millimeter Wave Propagation Channels in Urban Microcells" *IEEE Global Communications Conference*, Dec. 2013.
- [7] X. Zhang, F. Baccelli, R. W. Heath Jr., "An Indoor Correlated Shadowing Model" *Global Communications Conference (GLOBECOM), IEEE*, Dec. 2015.
- [8] X. Cai and G. B. Giannakis, "A Two-Dimensional Channel Simulation Model for Shadowing Processes" *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 52, no. 6, pp. 1558-1567, Nov. 2003.
- [9] Arismar Cerqueira S. Jr., "Antenna Development for 5G Networks [Invited Paper]," *IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference*, August, 2017.
- [10] M. Gudmundson, "Correlation model for shadow fading in mobile radio" *Electronics Letters*, vol. 27, no. 23, p. 2145-2146, Nov. 1991.
- [11] C. C. Pu, S.Y. Lim, P. C. Ooi "Measurement Arrangement for the Estimation of Path Loss Exponent in Wireless Sensor Network" *IEEE Computing and Convergence Technology (ICCCCT)*, Dec. 2012.
- [12] M. H. Sunil Srinivasa, "Path loss exponent estimation in large wireless networks" *Information Theory and Applications Workshop*, Feb. 2009.
- [13] G. L. Yongchang Hu, "Self-Estimation of Path-Loss Exponent in Wireless Networks and Applications" *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, vol. 64, no. 11, Nov. 2015.
- [14] G. R. MacCartney, J. Zhang, S. Nie, T. S. Rappaport "Path Loss Models for 5G Millimeter Wave Propagation Channels in Urban Microcells" *IEEE Global Communications Conference*, Dec. 2013.
- [15] S. Sun, T. S. Rappaport "Investigation of Prediction Accuracy, Sensitivity, and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Wireless Communications" *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, vol. 65, no. 5, May 2016.
- [16] Arismar Cerqueira S. Jr., I. F. da Costa, R. A. dos Santos, D. H. Apadoti "Waveguide-based Antenna Arrays for mm-waves 5G Networks" *IET Antennas Special Issue*, 2017.
- [17] M. Matthew, L. L. Mendes, N. Michailow, D. Zhang, G. Fettweis, "Widely Linear Estimation for Space-Time-Coded GFDM in Low-Latency Applications" *IEEE Transactions on Communications*, v. 63, pp. 4501-4509, 2015.