

Correção para Perda de Percurso em Ambientes Interiores com o Método FDTD-2D

Lucas S. Almeida, Rodrigo M.S. de Oliveira, Victor Dmitriev, Bruno W. Martins¹ e Fabrício J. B. Barros

Resumo — O método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo está consolidado na literatura para a predição de sinais eletromagnéticos. Em duas dimensões (FDTD-2D), é simples de implementar e não requer grande esforço computacional em termos de memória e tempo de processamento. Porém, com métodos bidimensionais, tal como FDTD-2D, calcula-se a atenuação do sinal eletromagnético com baixa concordância com experimentos. Neste trabalho, é proposto um fator de correção aplicado à curva de Perda de Percurso. A ideia é aumentar a precisão do método FDTD-2D para que forneça resultados adequados na análise do sinal eletromagnético em ambientes interiores. No desenvolvimento dos resultados foram utilizados dados experimentais de uma campanha de medição e dados preditos com a versão em três dimensões do método Traçado de Raios.

Palavras-chave — Perda de Percurso, método FDTD-2D, Fator de Correção.

I. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda de serviços em telecomunicações, como internet sem fio, telefonia celular e a TV Digital, torna-se essencial o desenvolvimento de projetos de sistema de comunicação. É importante obter informações acerca da propagação da onda eletromagnética no ambiente para a execução de projetos, pois estes dados são úteis para se determinar os pontos ótimos de acesso, maximizando-se a eficiência de potência do sistema [1].

Quando o ambiente considerado é o interior de prédios, é comum a variação brusca da energia eletromagnética, causada pelo movimento de pessoas no interior dos imóveis ou pela simples ação de fechar e abrir portas ou janelas [2]. Os fenômenos da reflexão, difração e refração são mecanismos que influenciam em um sistema de comunicação [3]. As características do sinal mudam durante um tempo muito curto ou a certas distâncias. Para quantificar a qualidade da transmissão de rádio no interior de ambientes, é necessário determinar alguns parâmetros do canal, a exemplo da perda de percurso [3].

Um modelo numérico utilizado para a predição de sinais eletromagnéticos que se tornou acessível e popular com o desenvolvimento de processadores mais eficientes, em termos de memória e tempo de processamento, foi o método das diferenças finitas no domínio do tempo FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*), que se baseia na solução numérica das equações de Maxwell do eletromagnetismo. Foi desenvolvido, pioneiramente, em [4] e melhorado ao longo dos anos principalmente pelos autores dos trabalhos [5] e [6]. A principal vantagem deste método é sua precisão e robustez, pois as fontes de erro nos cálculos são bem compreendidas e

podem ser limitadas para permitir modelos precisos para uma grande variedade de problemas de interação de ondas eletromagnéticas [6].

Para a predição de sinais eletromagnéticos com o método FDTD-2D o custo computacional em termos de consumo de memória e tempo de processamento são reduzidos, ou seja, o tempo de processamento é minimizado em comparação com a versão em 3D do método. É possível simular a propagação da onda eletromagnética utilizando o método FDTD-2D em um computador pessoal. Se estes resultados fossem próximos dos resultados fornecidos com o método FDTD-3D a aplicabilidade do método FDTD-2D poderia ser expandida.

Neste trabalho, é proposto um fator de correção aplicado à curva de perda de percurso, no interior de um prédio, que aumenta a conformidade entre os resultados obtidos com o método FDTD-2D e dados experimentais.

II. PARÂMETROS DE ANÁLISE

A. Perda de Percurso

O modelo de propagação no espaço livre é usado para prever a intensidade do sinal recebido quando o transmissor (T) e receptor (R) possuem um caminho de linha de visão desobstruído. O modelo prevê que a potência recebida diminui em função da distância de separação TR elevada a algum expoente. A potência no espaço livre recebida em uma antena separada da transmissora, irradiando, por uma distância d é dada pela equação (1) do espaço livre de Friis [3].

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

Em (1), P_t é a potência transmitida em Watts, $P_r(d)$ é a potência recebida também em Watts, G_t e G_r são os ganhos das antenas transmissora e receptora respectivamente, os mesmos são adimensionais e d é a distância de separação TR em metros.

A partir da equação de Friis pode-se determinar a perda de percurso que representa a atenuação da onda como uma quantidade positiva, medida em dB, definida como a diferença entre a potência transmitida efetiva e a potência recebida, e pode, ou não, incluir o efeito dos ganhos das antenas [3]. Quando os ganhos são considerados unitários, ou seja, um radiador isotrópico capaz de irradiar potência em todas as direções, a perda de percurso pode ser dada em decibéis.

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

Aplicando propriedades logarítmicas, (2) pode ser reescrita como uma soma de logs.

¹ Lucas S. Almeida e B. W. Martins. Universidade Federal do Pará, Tucuruí-Pa, Brasil, e-mails: lucassilvaalmeida88@gmail.com e brunow@ufpa.br. Rodrigo de Oliveira, Victor Dmitriev, e Fabrício Barros Universidade Federal do Pará, Belém-Pa, Brasil, e-mails: rdglinux@gmail.com, victor@ufpa.br, fjbrito@gmail.com

$$PL(dB) = 20 \log\left(\frac{d}{1000}\right) + 20 \log(f) + 32,44 \text{ [dB]}. \quad (3)$$

Em (3) f representa a frequência do sinal transmitido em mega-hertz. A potência recebida em uma antena pode ser relacionada ao campo elétrico a partir da equação de Friis (1). A equação (4) é o caso com impedância intrínseca do espaço livre [3].

$$P_r(d) = \frac{|E|^2 G_r \lambda^2}{480\pi^2}, \quad (4)$$

no qual $P_r(d)$ é a potência recebida em Watts, $|E|$ representa a magnitude da parte radiante do campo elétrico no campo distante medido em V/m , G_r o ganho adimensional da antena receptora e λ é o comprimento de onda do sinal transmitido em metros. Para o caso de um radiador isotrópico, descrito anteriormente, G_r é unitário.

B. Correção de Wu

Uma correção para a perda de percurso no espaço livre, utilizando o método FDTD em duas dimensões, é descrita em [8]. É o primeiro trabalho voltado para a otimização do método FDTD-2D. A ideia é adicionar o fator de correção (FC) à curva da perda de percurso gerada pelo método FDTD-2D (PL_{2D}) para aumentar a conformidade com a curva da perda de percurso do espaço livre (PL).

$$PL(dB) = PL_{2D}(dB) + FC, \quad (5)$$

na qual $PL_{2D}(dB)$ é a perda de percurso fornecida pelo método FDTD-2D em dB, e FC é o fator de correção descrito em [8] por

$$FC(dB) = a \log(d) + b \log(f) + c. \quad (6)$$

Em (6), d é a distância entre transmissor e receptor (em metros) e f é a frequência (em mega-hertz). As constantes a , b e c contêm informações acerca das características das perdas. A constante a refere-se à perda devido ao canal de propagação, b está associado à frequência de operação da antena e a constante c refere-se às perdas ou ganhos da antena. Em (7), estão os valores das constantes a , b e c do fator de

correção para o espaço livre, conforme descrito em [8].

$$FC(dB) = 9,9959 \log(d) + 9,9981 \log(f) - 23,1850. \quad (7)$$

C. O Ambiente de Análise

Para o estudo da perda de percurso do sinal eletromagnético, foi considerado o interior do ambiente mostrado nas Figs. 1 e 2. Trata-se de um corredor localizado no segundo andar do prédio Cardeal Leme da PUC – Rio, no qual foi realizada uma campanha de medições descrita em [9].

A Fig. 2 é a planta baixa do ambiente interior mostrado na Fig.1. Nas medições, as antenas (transmissora e receptora) foram posicionadas à altura de 1,5 m sobre o piso; considerou-se propagação *LOS* (*line-of-sight*) e, no momento das medições, não existia movimentação de pessoas. O transmissor foi posicionado em 88 pontos diferentes, afastando-se do receptor a cada 0,5 m em linha reta. A primeira posição do transmissor (Tx1) foi fixada a 1 m do receptor (Rx) e a última posição analisada (Tx88) ficou a 44,5 m. Na Tabela 1, são descritos os parâmetros utilizados nas medições.



Fig. 1 Corredor utilizado para as medições.

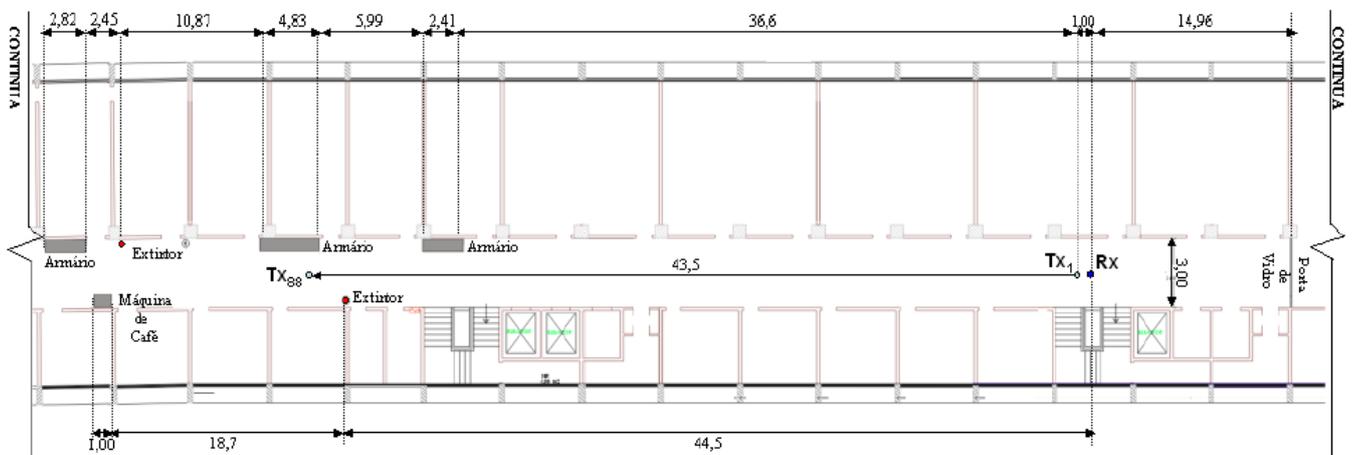


Fig. 2 Layout do corredor Leme e as posições do transmissor (Tx1 e Tx88). Os valores das dimensões estão em metros.

TABELA 1 – PARÂMETROS DO *SETUP* DE MEDIDAS.

Parâmetros	Valores
Faixa de frequência	950 a 1800 MHz
Largura de Banda	850 MHz
Número de amostras	1601
Resolução temporal ($\Delta\tau$)	1,17 ns
Retardo máximo	1882,35 ns
Tempo de análise	346 ns
Espaçamento em frequências das amostras	0,53 MHz
Potência de transmissão	10 dBm
Ganho do amplificador	25 dB
Perdas no Conector e Cabo	5dB

III. RESULTADOS

Para predição da perda de percurso, nos pontos descritos no corredor mostrado na Fig. 2, foi desenvolvido um programa utilizando o modo TMz (Transversal Magnético na direção de z) do método FDTD-2D, ou seja, considerou-se apenas os campos E_z , H_x e H_y nos cálculos. O programa foi escrito em C/C++ e simulado num *notebook* de 8 GB de RAM e processador de 1,9 GHz. Os dados foram analisados no *software* livre *Octave*.

O método FDTD-2D fornece os valores do campo elétrico na região de análise e, através de (4), é calculada a potência do sinal recebido. Estes valores determinam, através de (5), a perda de percurso nos 88 pontos mostrados na Fig. 2.

A Fig. 3 mostra as curvas da perda de percurso, medida e predita com os métodos FDTD-2D e Traçado de Raios 3D (descrito com detalhes em [9]). Na Fig. 3 é possível verificar que o método Traçado de Raios 3D reproduz de forma mais precisa a curva da perda de percurso, sobretudo nos 50 primeiros pontos (até 22,5 m).

A curva da perda de percurso predita pelo método FDTD-2D (em azul) não é adequada para representar a curva experimental (medida). Deve-se considerar alguns fatores que implicam nesta imprecisão. A predição em duas dimensões a energia se propaga apenas em um plano; outro fato é que as antenas utilizadas no experimento não podem ser representadas de forma adequada no modelo FDTD bidimensional.

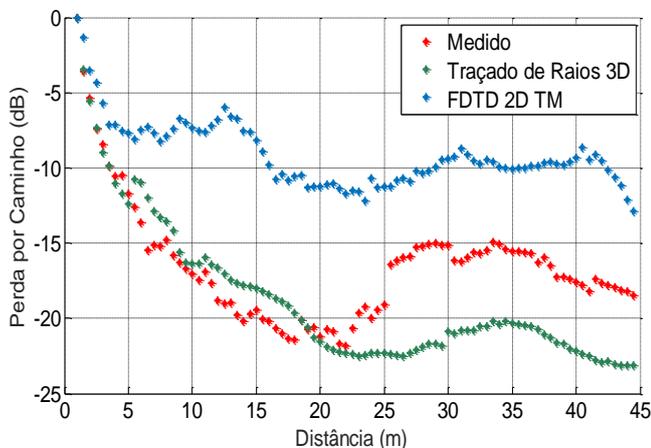


Fig. 3 Comparação das curvas da perda de percurso de dados medidos e simulados com Traçado de Raios e FDTD-2D (sem correções).

A curva dada pelo método FDTD-2D pode ter sua precisão melhorada com a adição do fator de correção (6). A Fig. 4 mostra a curva da perda de percurso obtida a partir do método FDTD-2D (em azul) com a correção dada em (6). Esta curva representa a curva experimental com precisão adequada.

Embora a predição melhore substancialmente, como mostrado na Fig. 4, é possível aproximar as curvas predita e experimental por meio do ajuste das constantes a , b e c . A variação destes coeficientes implica na variação da perda de percurso. O coeficiente a possui influência nos valores da perda de percurso nos pontos próximos a antena. O coeficiente c afeta a curva em pontos distantes, seu aumento implica em menores valores para a perda de percurso nos pontos afastados da fonte. O coeficiente b carrega informações da complexidade do ambiente, valores menores representam a perda de percurso em ambientes cujo sinal eletromagnético é recebido através de reflexões e difrações. Na equação (8) estão descritos os coeficientes propostos para o fator de correção.

$$FC_{Proposto} = -6.37\log(R) - 6.37\log(f) - 6.37[dB]. \quad (8)$$

A Fig. 5 mostra a predição da perda de percurso com o método FDTD-2D, modo TMz, com a correção proposta. O fator de correção (7) aumenta substancialmente a precisão de predição do método FDTD-2D.

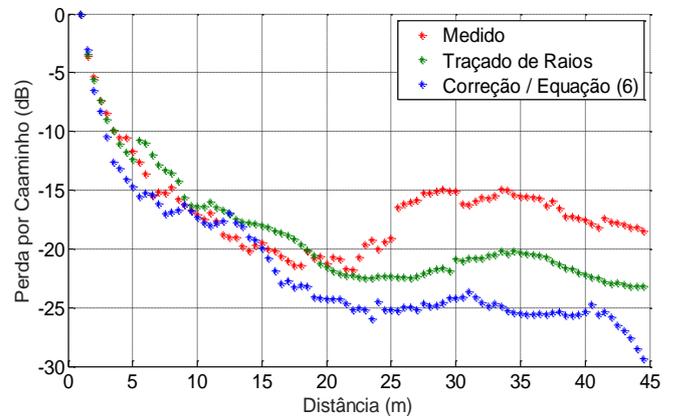


Fig. 4 Curvas da perda de percurso de dados medidos e simulados com Traçado de Raios e FDTD-2D com a correção (6).

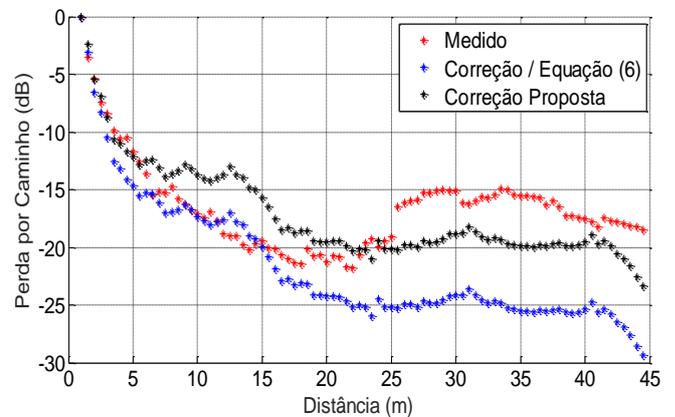


Fig. 5 Curvas da perda de percurso de dados experimental/medidos e simulados com FDTD-2D com a correção proposta (7).

A Fig. 6 mostra a curva predita com o método Traçado de Raios, a curva obtida utilizando-se a correção (7) e a curva experimental. A curva obtida com o método FDTD 2D adicionado a correção proposta possui melhor representação da curva experimental, sobretudo nos pontos mais afastados da fonte, nos quais existe limitação ao método Traçado de Raios devido à falta de representação dos raios refletidos e difratados nestes pontos.

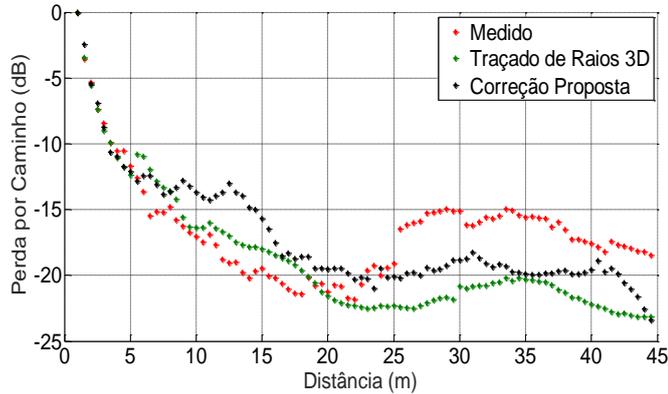


Fig. 6 Perdas por Caminho experimental e preditas através do método Traçado de Raios 3D e do método FDTD-2D com a correção proposta.

A predição da perda de percurso através do modelo proposto, conforme mostram as Figs. 5 e 6, possui maior exatidão nas posições próximas e distantes da fonte. Entre 1m e 8m, o modelo proposto consegue acompanhar bem os resultados obtidos usando o modelo tridimensional e medidas experimentais; entre 8m e 16,5m, o modelo proposto possui representação aceitável; entre 16,5m e 43,5m, o modelo proposto possui melhor representação que o modelo tridimensional baseado em traçado de raios.

Para medir diferenças entre valores preditos e valores experimentais da perda de percurso, utilizou-se a definição de desvio relativo [3]. No caso dos valores da perda de percurso, obtidos com o método Traçado de Raios e experimentalmente, o desvio relativo é mostrado na Fig.7. A média e o desvio padrão possuem os valores 0,1916 e 0,1332, respectivamente. Os dados preditos a partir de 25 m estão mais afastados dos valores experimentais, conforme mostra a Fig 7.

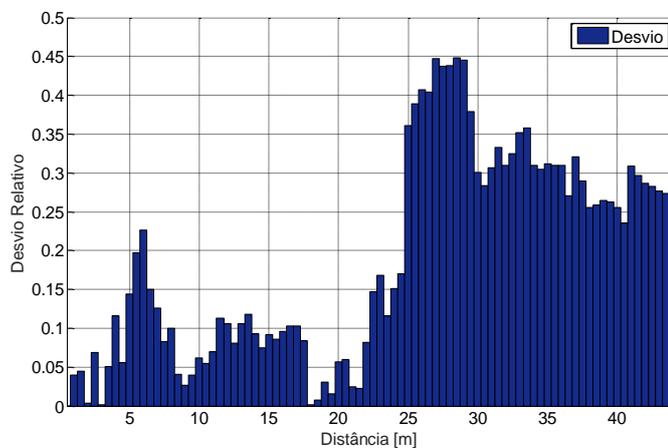


Fig. 7 Erro relativo, média e desvio padrão dos valores preditos com o modelo Traçado de Raios 3D em relação às medidas experimentais.

O desvio relativo mostrado na Fig. 8 foi calculado utilizando os valores obtidos com o modelo proposto e os dados experimentais. A média e o desvio padrão são 0,1665 e 0,0884, respectivamente. Estes valores são menores que aqueles preditos com o modelo de Traçado de Raios 3D (Fig.7) e descritos no parágrafo anterior.

Na Fig. 8, a partir de 25 metros a representação do sinal predito com o método FDTD 2D possui desvio padrão menor que aquele dado pela curva determinada por Traçado de Raios. Isso significa que o método FDTD 2D com a correção proposta possui melhor representação dos dados experimentais.

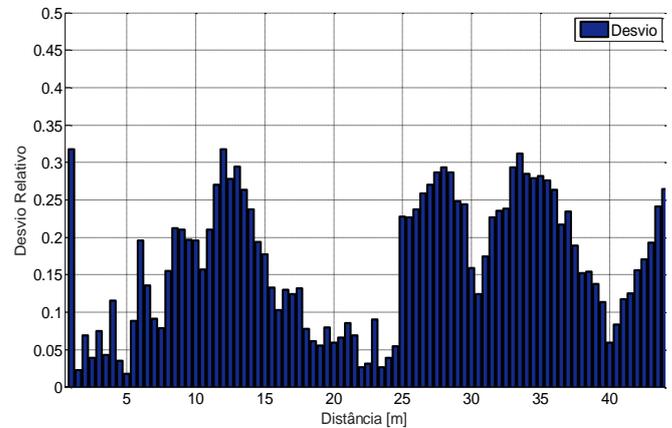


Fig. 8 Erro relativo, média e desvio padrão obtidos com os valores medidos experimentalmente e calculados usando o FDTD-2D com a correção proposta.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foram otimizados os coeficientes do Fator de Correção de Wu *et Al.*, para melhor representação da perda de percurso. Este ajuste faz com que a curva da perda de percurso produza boas aproximações a partir dos dados gerados através do método FDTD-2D, relativamente aos dados experimentais. Os resultados fornecidos pelo método FDTD-2D, com a correção proposta, possui melhor precisão para a curva da perda de percurso experimental que aquela gerada pelo método de Traçado de Raios 3D.

Dessa forma, estes resultados possibilitam a implementação de um *software* para determinar a perda de percurso, utilizando o método FDTD-2D com a correção proposta, com um custo computacional menor.

REFERÊNCIAS

- [1] LIMA, B.W.M., “Modelo para Representação de Ambientes 3D Utilizando Composição de Modos do Método FDTD-2D”, Tese (doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia (ITEC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2017.
- [2] COX, D.C. “Delay dopper characteristics of multipath delay spread; average excesso delay for 910 MHz urban mobile radio paths”, *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, v. AP-23, n.5, mar. 1975, p. 206-213.
- [3] RAPPAPORT, T. S., “Comunicações sem fio: princípios e práticas”. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- [4] YEE, K.S., “Numerical Solution of Initial Boundary Value Problem Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media”, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 14, p. 302-307, 1966.
- [5] J. W. H. Lee and A. K. Y. Lai, "FDTD analysis of indoor radio propagation", in *IEEE Antennas and Propagation Society International*

Symposium. 1998 Digest. Antennas: Gateways to the Global Network. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No.98CH36), Atlanta, GA, 1998, pp. 1664-1667 vol.3.

- [6] TAFLOVE, A., and HAGNESS, S. C., “*Computational Electrodynamics, The Finite Difference Time Domain Methods for Eletrodynamics Analysis*”. New York: Artech House Inc., 2005.
- [7] BALANIS, C. A., “*Teoria de Antena: Análise e Síntese*”. 3ª Ed., Rio de Janeiro, LTC, 2009.
- [8] WU, Y., LIN, M., WASSELL, I., “*Path Loss Estimation in 3D Enviroments Using a Modified 2D Finite-Difference Time-Domain Technique*”, in *IET 7th International Conference on Computational in Electromagnetic*. 2008.
- [9] BARROS, F. J. B., “*Traçado Tridimensional de Feixes para a Obtenção das Características de Propagação do Canal de Banda Ultralarga em Ambientes Interiores*”, Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2010.