

Avaliação de Modelos de Radiopropagação para TV Digital em Percursos Mistos

Leslye Castro Eras¹, Michele Almeida¹, Diego K. N. da Silva¹, Hélio. R. O. Ferreira¹, Nelson Santos¹, Fabrício J. B. Barros², Gervásio P. S. Cavalcante¹

¹ Universidade Federal do Pará, Pará, Brasil,

² Universidade Federal do Pará, Tucuruí, Pará, Brasil,

leslye@ufpa.br, michelealmeida13@gmail.com, diegokasuo@ufpa.br, heliooeriras@ufpa.br, nelson_mateus69@yahoo.com.br, fbarros@ufpa.br, gervasio@ufpa.br

Resumo—Neste trabalho são apresentados os resultados preliminares do estudo da propagação de campo elétrico para TV digital em percurso misto (terra-água doce), na região amazônica. A campanha de medições, consta de um total de 239 pontos de recepção, distribuídos em 3 radiais, nos quais 19 pontos foram medidos sobre a terra e 220 pontos foram medidos sobre a água. Os valores dos dados coletados foram comparados com os valores obtidos com os seguintes modelos de propagação encontrados na literatura: ITU-R P.1546-5, Okumura-Hata, Funções de Green Diádicas e Traçado de Raios. As métricas para testar o desempenho dos modelos foram o erro RMS (Root Mean Square) e o desvio padrão. Dos modelos antes mencionados, os valores da intensidade de campo elétrico calculados com o modelo da ITU-R P.1546-5 apresentou maior coerência com os valores dos dados medidos.

Palavras-Chaves— trajeto misto, TV digital, ITU-R P.1546-5, campo elétrico

Abstract— *This paper presents the preliminary results of the electric field propagation along mixed paths (ground- fresh water) for digital TV study, in the amazon region. The measurement campaign has a total of 239 reception points distributed in 3 radials, 19 points were measured over ground and 220 points were measured over water. The values of measurement data were compared with the values obtained with following propagation models from literature: ITU-R P.1546-5, Okumura-Hata, Green dyadic functions and Ray Tracing. The metrics to test the performance of the models were the RMS (Root Mean Square) error and standar deviation. Among the mentioned models, the values of intensity of electric field calculated with ITU-R P.1546-5 model shows the better agreement with the values of measured data.*

Keywords— mixed path, digital TV, ITU-R P.1546-5, electric field.

I. INTRODUÇÃO

O serviço de TV é transmitido para 90 % das residências brasileiras. Atualmente encontra-se em andamento a implementação do serviço de TV digital, no Brasil e ao redor do mundo. Entre as vantagens da TV digital tem-se: permitir visualizar uma imagem de melhor qualidade porque viabiliza a televisão de alta definição e utilização mais eficiente do espectro eletromagnético. Pelo fato da TV digital encontrar-se em diferentes ambientes sejam urbanos, montanhoso, mistos entre outros, torna-se importante estudar a propagação do sinal,

para facilitar o planejamento de instalação ou otimização do serviço [1].

O caso de estudo que se apresenta neste trabalho corresponde a um percurso misto característico de cidades amazônicas devido à presença de rios largos. São apresentados dados medidos e simulados. Os dados medidos foram coletados em percursos mistos na área de Belém-Baía do Guajará, tanto sobre a terra como sobre a água doce para uma frequência de 521 MHz, que pertence a um canal comercial de TV digital.

Os artigos achados na literatura estudam trajetos mistos compostos de terra e mar [2-9] e a maioria destes trabalhos foi desenvolvida para baixas frequências, nas faixas de MF (*Medium Frequency*) e LF (*Low Frequency*). Vale salientar que esta coleta de dados para percursos mistos é ainda incipiente na literatura especializada, sendo estas medidas uma relevante contribuição deste trabalho.

Para comparar os dados medidos serão usados neste trabalho os modelos Okumura-Hata [10], ITU-R P.1546 [2], Modelo de Traçado de Raios [11] e Modelo de Funções Green Diádicas [12]. Outros modelos e modelos próprios estão em desenvolvimento.

O presente artigo está dividido em cinco seções: Seção II apresenta uma descrição dos equipamentos de medição e os ajustes dos parâmetros correspondentes. Seção III descreve a campanha de medições. Seção IV modelos de propagação e análises dos resultados, apresentando os modelos de propagação usados comparando-os com os dados medidos. Seção V as conclusões do trabalho proposto.

II. EQUIPAMENTO

Para o desenvolvimento da transmissão da campanha de medições, tanto sobre a terra como sobre a água, foram usados os seguintes equipamentos: transmissor Toshiba TDU8087LB com uma potência de 6 KW, uma antena constituída por painéis de dipolos *KATHREIN-WERKE KG* praticamente omnidirecional que tem um ganho de 11,1 dBd, sendo a altura sobre o terreno de 114,58 metros e a polarização horizontal. A perda da linha de transmissão é de 1,48 dB. Portanto a ERP máxima (Potência Efetiva Irradiada) é de 77,17 dBm.

Para a recepção no caso da água o equipamento foi instalado em um barco e no caso da terra o equipamento foi instalado em um carro. Foram usados um analisador de

espectro Site Master *ANRITSU S332E*, um GPS de modelo *GARMIN'S GPS 12 MAP Personal NavigatorTM*, uma antena de recepção de modelo Antena *Dipole HP651A* com ganho 0 dBd para a frequência de 521MHz, com uma altura de 4 m sobre a superfície tanto da terra como da água, um computador portátil *Dell Inspiron 5437* e um inversor para conectar os equipamentos.

III. CAMPANHA DE MEDIÇÕES

O Site Master foi configurado para mostrar a faixa de 518 MHz até 524 MHz, que são os 6 MHz de largura de banda do canal de TV, e os dados da potência recebida, na frequência central de 521 MHz. As coordenadas do ponto medido foram tomadas com auxílio de um GPS. Além do mais, a antena receptora foi direcionada em cada ponto de recepção, de tal maneira que se obtivesse a máxima potência de recepção em cada medição. A Figura 1 apresenta o cenário de medição que corresponde ao percurso misto Belém-Baía do Guajará, Site Master, GPS, barco e parte do equipamento usado para as medições sobre a água.



a) Cenário Belém-Baía do Guajará



b) Parte do equipamento de medições (água)

Fig 1. a) Cenário, b) Parte do equipamento de medições sobre a água

Um total de 239 pontos de recepção foi medido, dos quais 19 foram medidos sobre a terra e 220 sobre a água, distribuídos em três radiais como se mostra na Tabela I e na Figura 2.

TABELA I - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS NAS RADIAIS.

Radial	Número de Pontos na terra	Distância total na terra (Km)	Número de Pontos na água	Distância total na água (Km)
Radial 1	7	1,67	100	5,007
Radial 2	6	1,64	65	5,22
Radial 3	6	1,62	55	3,56

IV. MODELOS DE PROPAGAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os modelos de propagação usados neste trabalho, o tratamento dos dados medidos e a comparação entre os valores de dados medidos e os valores dos dados calculados.

A intensidade de campo elétrico foi calculada para cada ponto de recepção da campanha de medições. Uma vez obtidos estes valores da intensidade de campo elétrico, tanto os valores dos dados medidos como os valores calculados foram organizados em anéis como se mostra na Figura 2.

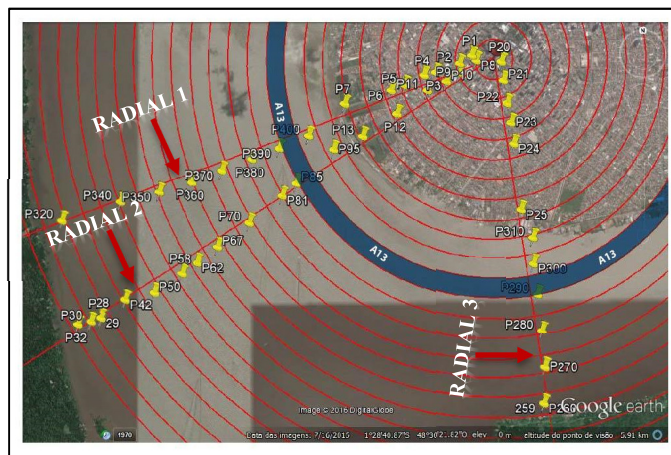


Fig. 2. Pontos de medição, trajeto misto Belém - Baía do Guajará.

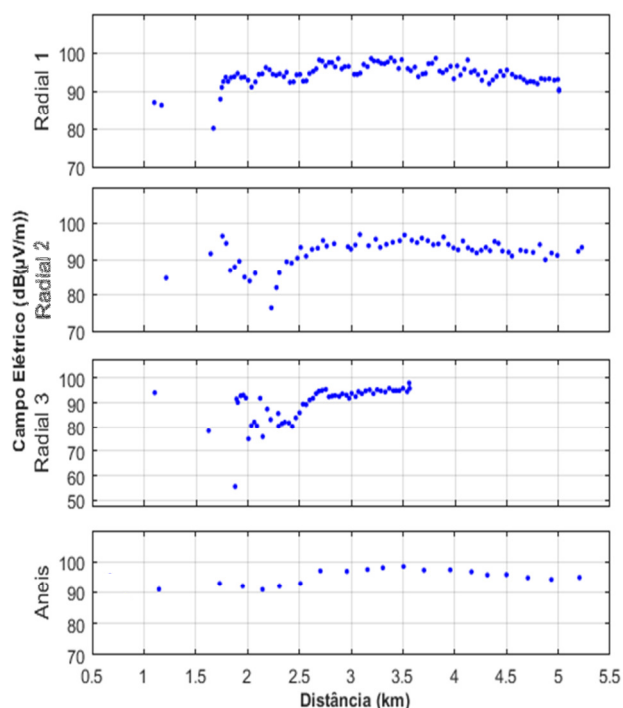


Fig 3. Intensidade do campo elétrico dos dados medidos para os Radiais 1, 2 e 3, e os dados medidos apresentados em Anéis.

Assim, foram traçados anéis de 200 em 200 metros tendo como centro o ponto de transmissão, formando coroa como a apresentada em azul na Figura 2. Foi calculada a média dos pontos que ficaram dentro da área de cada coroa, ao final ficaram 19 coroas, ou seja, 19 pontos na recepção. Os dados foram tratados em anéis para considerar a área de medição como um meio uniforme, dado que foi obtida a média dos valores tanto medidos como calculados. Na Figura 3, apresentam-se os valores dos pontos medidos para cada radial e os valores dos dados medidos em anéis.

A. Modelo Okumura-Hata

Um primeiro modelo usado é o modelo de Okumura Hata, que é um modelo empírico. Geralmente é calculada a perda de percurso, mas neste trabalho será calculada a intensidade de campo elétrico para uma cidade pequena e média, as equações usadas estão baseadas em [10]:

$$E = 69,82 - 6,16 \log(f_{MHz}) + 13,82 \log(h_t) + a(h_r) - (44,9 - 6,55 \log(h_t))(\log(d))^b \quad (1)$$

$$a(h_r) = (1,1 \log(f) - 0,7)h_r - (1,56 \log(f) - 0,8) \text{ dB} \quad (2)$$

Onde: f é frequência (MHz) na faixa $150 \leq f \leq 1500$ MHz, h_t e h_r são a altura (em metros) efetiva da antena transmissora e receptora, respectivamente, com ($1 \leq h_r \leq 10$) e ($30 \leq h_t \leq 200$), d é a distância (km) e o parâmetro b igual a 1 porque a distância é menor a 20 km.

A comparação entre os valores dos dados medidos e os valores dos dados calculados pode ser observada na Figura 4. Os valores da intensidade de campo elétrico fornecidos por Okumura Hata se mostraram superiores em relação aos dados medidos. O fato de ter um campo medido baixo, apesar da proximidade do transmissor sobre a terra, é devido à presença de alguns edifícios bloqueando a linha de visada entre transmissor e receptor.

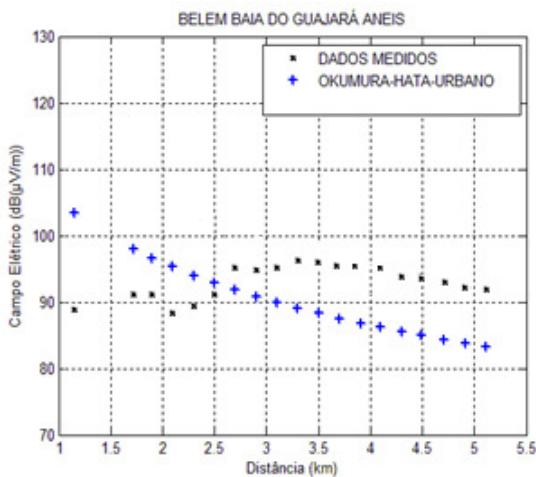


Fig. 4. Intensidade de Campo Elétrico para os dados Medidos e dados Calculados com o Modelo Okumura-Hata.

Na água, a linha de visada é estabelecida em todos os pontos do enlace. Os valores da intensidade de campo elétrico medidos são maiores aos valores dos dados calculados devido às reflexões que reforçam o sinal sobre a água. Além disto, a intensidade de campo elétrico calculada com este modelo, como se pode observar na Figura 4, atenua-se com a distância, pois o mesmo é usado para cidades e, portanto, não segue o comportamento do sinal medido. O erro RMS calculado entre os dados medidos e os calculados é de 7,57 dB e o desvio padrão do modelo Okumura Hata é de 5,48 dB.

B. Modelo Funções de Green Diádicas

Um segundo modelo é o modelo de Funções de Green Diádicas, que tem caráter determinístico e permite a resolução de problemas para fenômenos de espalhamento, radiação e propagação eletromagnética [13].

Considerando que este modelo trabalha com grandes distâncias, ele foi aplicado para modelar os dados somente sobre a baía do Guajará a partir de 2 km. O modelo considera um meio de duas camadas: meio 1 o ar e meio 2 a água. O transmissor encontra-se no meio 1 e o receptor também no meio 1. Os parâmetros elétricos da água doce usados foram:

permissividade relativa (80) e a condutividade (0,005 S/m), encontradas em [14].

A equação para calcular o campo elétrico é:

$$\bar{E}_H(\bar{R}) = -\frac{w\mu_0\bar{p}}{4\pi} \int_0^\infty \frac{e^{jh_1z_0}}{h_1} \left\{ [\bar{M}_{01\lambda}(-h_1) + a\bar{M}_{01\lambda}(h_1)] + [\bar{N}_{e1\lambda}(-h_1) + b\bar{N}_{e1\lambda}(h_1)] \frac{jh_1}{k_1} \right\} d\lambda \quad (3)$$

Onde $\bar{M}_{gn\lambda}(h)$ e $\bar{N}_{gn\lambda}(h)$ são funções vetoriais em coordenadas cilíndricas, os detalhes desta equação podem-se ser visualizados em [12].

Os resultados estão apresentados na Figura 5, sendo que os dados calculados sobre a água têm coerência com os dados medidos a partir dos 3 km, portanto o erro RMS entre os dados medidos e calculados, considerando unicamente a água, é de 6,58 dB e o desvio padrão deste modelo é de 3,37 dB.

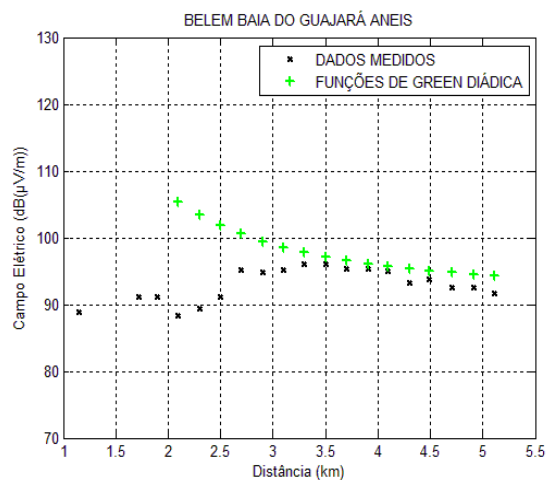


Fig 5. Intensidade de Campo Elétrico para os dados Medidos e dados Calculados com o Modelo de Funções de Green Diádicas.

C. Modelo de Traçado de dois Raios

Um terceiro modelo, *Ray Tracing*, foi testado considerando os parâmetros elétricos tanto da terra como da água. Neste caso, considerando que o cenário sobre a água tem poucos obstáculos, usaram-se somente dois raios: raio direto e o raio refletido sobre a água ou sobre a cidade dependendo do percurso, como se ilustra na Figura 6 (os primeiros 1700 m correspondem a terra e os outros o percurso sobre a água).

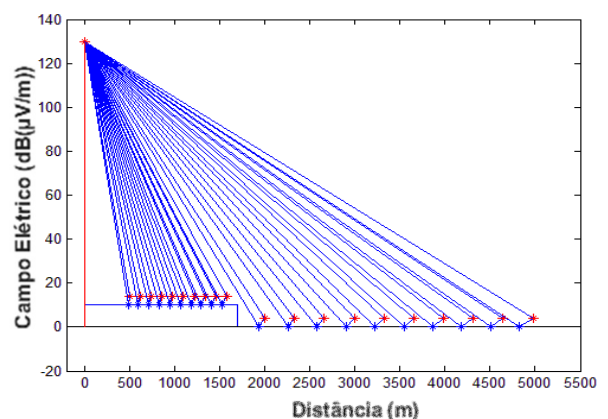


Fig 6. Ilustra a disposição considerada de raios para cada enlace.

Para calcular o campo elétrico considerou-se uma polarização horizontal. Para o cálculo da intensidade de campo elétrico foi usada a seguinte equação (4) [11], sendo que o coeficiente de reflexão complexo foi calculado considerando o exato ângulo de incidência, sem a aproximação considerada na no modelo de terra plana que considera $\Gamma = -1$:

$$|E_{TOTAL}(d)| = \frac{E_0 d_0}{d} [1 + \Gamma \exp(-j\theta_\Delta)] \quad (4)$$

Onde:

- E_0 : Campo E no espaço livre (V/m).
- d_0 : Distância de referência do transmissor propagando no espaço livre, $d > d_0$.
- θ_Δ : Diferença de fase, $\theta_\Delta = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}$
- Γ : Coeficiente de reflexão

Os resultados para o modelo de traçado de raios e os dados medidos são mostrados na Figura 7.

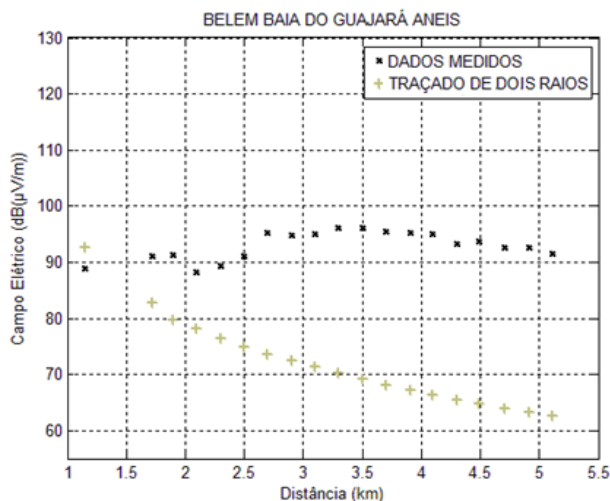


Fig. 7. Intensidade de Campo Elétrico dos dados Medidos e dados Calculados com o Modelo de Traçado de dois Raios

Para a terra foram usados os parâmetros de terra úmida com permissividade relativa (30) e a condutividade (0,07 S/m). Para a água foi considerada a permissividade relativa (80) e a condutividade (0,005 S/m), que correspondem a água doce [14]. Os dados simulados não apresentam concordância, tanto que o erro RMS é de 26,95 dB. Esse erro talvez seja atribuído à utilização de parâmetros constitutivos que não condizem com o trajeto sobre a Baía do Guajará e a falta de modelagem de edificações no percurso da cidade. Além disso, o desvio padrão do traçado de raios é de 4,88dB.

D. Modelo da Recomendação ITU-R P. 1546-5

Um último modelo é ITU-R P.1546-5, apresentado como um conjunto de curvas que tem como parâmetros: frequência, distância, altura da antena receptora, altura da antena transmissora, tipo de terreno e porcentagem de tempo. No caso em que os valores com os quais vão se realizar os cálculos não coincidam com os valores nominais, têm que se realizar interpolações e, posteriormente, correções que vão

depender do cenário para o qual estão sendo desenvolvidos os cálculos [2].

Neste trabalho, para aplicar a recomendação ITU-R P. 1546 foi considerado o perfil desde o transmissor até cada um dos pontos de medição do trajeto misto.

A seguir é descrito o procedimento para calcular a intensidade de campo elétrico para os percursos: terra, água e misto.

Na Terra, foram escolhidas as curvas com as quais se realizaram as interpolações. No caso presente foram usadas as curvas para 100 MHz e 600 MHz, com uma porcentagem de tempo de 50%. As interpolações calculadas consideraram a frequência, a distância entre transmissor e receptor e a altura da antena transmissora, nessa ordem. É importante mencionar que para calcular a altura da antena transmissora, considera-se o perfil do terreno e as equações para o cálculo da altura da antena transmissora. As interpolações podem ser encontradas detalhadamente em [2].

As correções aplicadas neste modelo foram:

- Correção pela altura da antena receptora para determinar se a área ao redor da antena é urbana, suburbana ou rural.
- Correção devida ao ângulo livre de obstáculos.
- Correção da ERP, porque no Modelo da ITU as curvas apresentadas tem como base uma ERP de 1kW e neste trabalho a ERP máxima é de 52,08 kW.

O processo para calcular a intensidade do campo elétrico no percurso da água é parecido com o desenvolvido para o cálculo da intensidade de campo elétrico na terra, sendo que neste caso são usadas as curvas que correspondem ao mar quente. Foram aplicadas as correções por altura da antena receptora e a correção da potência de transmissão. A correção por altura de antena receptora sobre a água foi 0 dB, portanto não se tem obstáculos ao redor da antena receptora; as equações usadas no cálculo estão em [2].

Para realizar o cálculo no trajeto misto, calcula-se o trajeto completo, primeiro considerando o percurso total como água e depois como se todo percurso fosse terra. Uma vez realizados os cálculos dos trajetos totais, considerando percurso total sobre água e terra, aplicou-se as equações a seguir.

Para calcular intensidade de campo elétrico, tem-se [2]:

$$E = (1 - A) \cdot E_{land}(d_{total}) + A \cdot E_{sea}(d_{total}) \quad (8)$$

No caso, $E_{land}(d_{total})$ e $E_{sea}(d_{total})$ correspondem, respectivamente, ao valor de campo elétrico calculado em um mesmo ponto de recepção considerando como se percurso total fosse água e como o percurso fosse terra. O fator de atenuação do trajeto misto (A) é dado por:

$$A = A_0(F_{sea})^V \quad (9)$$

Onde F_{sea} é a fração total do percurso que se encontra sobre a água, calculada com a equação (10). Os parâmetros são apresentados na Figura 8:

$$F_{sea} = \frac{d_{ST}}{d_{total}} \quad (10)$$

Para calcular $A_0(F_{sea})$ usa-se a seguinte equação:

$$A_0(F_{sea}) = 1 - (1 - F_{sea})^{2/3} \quad (11)$$

V , calcula-se com a seguinte expressão:

$$V = \max \left[1.0, 1.0 + \frac{\Delta}{40.0} \right] \quad (12)$$

Sendo:

$$\Delta = E_{sea}(d_{total}) - E_{land}(d_{total}) \quad (13)$$

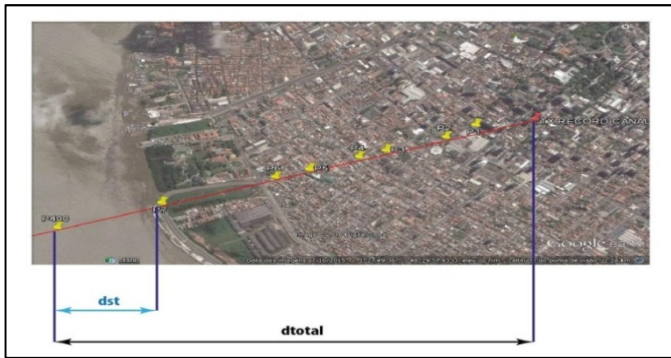


Fig. 8. Trajeto misto considerando como se tudo fosse água e como se tudo fosse terra.

Os dados calculados usando a recomendação ITU-R 1546-5 comparados com os dados medidos apresentam-se na Figura 9.

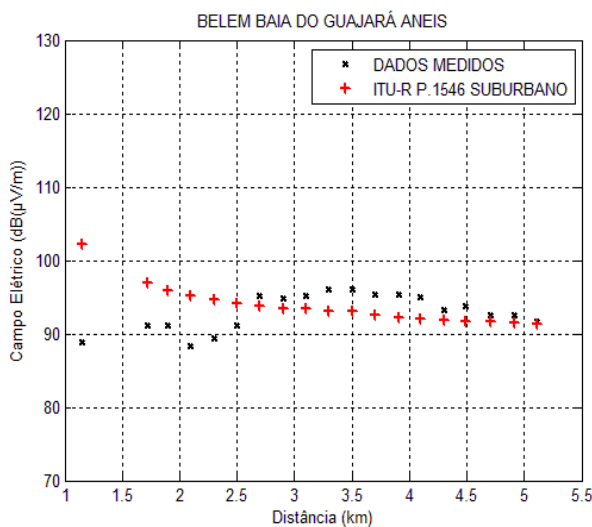


Fig. 9. Intensidade de Campo Elétrico, dos dados Medidos e dados Calculados com o Modelo ITU-R P.1546

Os resultados calculados para o trajeto misto apresentaram o menor erro RMS em comparação com os outros modelos estudados neste trabalho. O primeiro ponto no gráfico é superestimado devido às edificações no entorno do terreno. O erro RMS é 4,43 dB e o desvio padrão é de 2,57dB.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo da propagação de campo elétrico em um percurso misto (terra-água doce) na cidade de Belém do Pará para uma frequência de 521 MHz.

Foram avaliados quatro modelos de propagação. O modelo que deu o menor erro foi o ITU-R P.1546-5, apresentando um erro de 4,43 dB e um desvio padrão de 2,57dB. Outros modelos como o do Okumura Hata calculado para uma área urbana apresentou um erro de 7,57 dB, pois ele é para cidade e não prevê o comportamento na água. O modelo baseado em Funções Diádicas de Green foi usado unicamente para o percurso sobre a água, e apresentou um erro de 6,58 dB, porque é adequado apenas para distâncias maiores a 2 km. Finalmente, o modelo de traçado de raios (Ray Tracing) apresentou um erro de 26,95 dB.

Os modelos usados fazem parte de um estudo inicial do comportamento da intensidade de Campo elétrico da TV digital para percursos mistos, sendo que estas comparações e avaliação de modelos serão usadas para o desenvolvimento de um modelo de Rádio Propagação para percursos misto, no caso terra-água doce para TV digital. Este modelo deverá considerar as características elétricas dos meios, representar o *Recovery Effect* observado na zona de transição terra-água (fenômeno de reforço do sinal que os modelos aqui usados não levam em consideração), além das possíveis difrações também na zona de transição nessa faixa de frequência UHF.

VI. REFERENCIAS

- [1] Teleco Inteligencia em Telecomunicações. "Estatística do Brasil-Geral." Disponível Online em: <http://www.teleco.com.br/estatis.asp>, 2014.
- [2] UIT-R, Recomendación, P-1546, "Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz," Ginebra, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Septiembre 2013.
- [3] G. Millington, G.A Isted, "Ground-Wave Propagation Over an Inhomogeneous Smooth Earth, Part 2," *Electrical Engineers Journal of the Institution*, vol. 97, pp.190-191, July 1950.
- [4] M. Bellec, et al., "Measurements of Vertically Polarized Electromagnetic Surface Waves Over a Calm Sea in HF Band Comparison to Planar Earth Theories," *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 62, no. 7, July 2014.
- [5] C. Bourlier and G. Kubické, "Ground Wave Propagation Along an Inhomogeneous Rough Surface in the HF Band: Millington," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 49, no. 4, April 2011.
- [6] T. Kawano, T. Ishihara, K. Goto, "Experimental results on the recovery effect appearing in the ground wave propagation over land-to-sea mixed-path," *Antennas and Propagation Society International Symposio IEEE*, 2007
- [7] E. R. Iglesias, "MATLAB-Based FEM-Parabolic-Equation Tool for Path-Loss Calculations Along Multi-Mixed-Terrain Paths," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 56, no. 3, June 2014.
- [8] C. Teague, P. Lilleboe, D.Barrick, "Estimation of HF Radar Mixed-Media Path Loss Using the Millington Method," *Waves and Turbulence Measurement (CWTM)*, IEEE/OES Eleventh, 2015.
- [9] B.A. Witvliet, et al., "Mixed-path trans-horizon UHF measurements for P.1546 propagation model verification," *Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, IEEE-APS Topical Conference on, 2011
- [10] J. M. Hernando, "Transmisión por Radio," Madrid, Editorial Centro de estudios Ramón Areces S.A, cuarta edición, 2003.
- [11] T. S. Rappaport, "Comunicações sem fio Princípios e práticas," segunda edição, Pearson Education do Brasil, 2009.
- [12] D. K. N. Silva, "Predição de Campo Elétrico para TV Digital Usando Funções De Green Diádicas," Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal do Pará, Julho 2014.
- [13] G. P. S. Cavalcante; D. A. Rogers; A. J. Giarola, "Analysis of electromagnetic wave propagation in multilayered media using dyadic Green's functions," *Radio Science*, Volume 17, Number 3, pp. 503-508, May-June 1982.
- [14] UIT Recomendación, P.527-3, "Características Eléctricas de la Superficie de la Tierra," Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1992 Green's functions," *Radio Science*, Volume 17, Number 3, pp. 503-508, May-June 1982.