

Análise e Comparação de Alguns Modelos de Propagação de Ondas Eletromagnéticas em Ambientes Internos (Indoor) na Faixa de Microondas

B. W. Martins, Victor Dmitriev, M. G. Lima e D. R. Ribeiro

Universidade Federal do Pará – Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá. CEP 66075-110. Caixa postal 479/ Belém - Pará - Brasil

Resumo — Modelos de propagação de ondas eletromagnéticas são importantes para o desenvolvimento de projetos de sistema de comunicação, para análise estratégica, tática e operacional de ambientes internos. Entre vários parâmetros que caracterizam a propagação de ondas destacamos a perda de energia por percurso e o desvanecimento por multipercursos. Consideramos o Modelo do Caminho Dominante e comparamos seus resultados com outros modelos de propagação, Traçado de Raio e Multi Wall, e com dados de campanhas de medições, em diferentes ambientes internos. A análise é feita na faixa de microondas.

Palavras-Chave — Análise operacional, Ondas eletromagnéticas, Modelos de propagação.

I. INTRODUÇÃO

Antes da execução de projetos de sistemas de comunicação, devem ser conhecidas características de propagação de ondas eletromagnéticas do ambiente. Em ambientes internos (dentro de prédios—indoor) é importante a simulação da propagação de ondas eletromagnéticas, para auxílio ao planejamento operacional. As ondas estão na faixa de frequências das microondas. A previsão de propagação geralmente fornece dois tipos de parâmetros: um em grande escala dado pela perda por caminho e outro em pequena escala dado por desvanecimento estatístico [1].

A informação da perda por caminho é vital para a determinação da cobertura de uma estação base e para a qualidade do sinal. Os parâmetros de pequena escala costumam fornecer dados estatísticos sobre variação local do campo e este, por sua vez, leva ao cálculo de parâmetros importantes que ajudam a melhorar o sinal no receptor e a minimizar o desvanecimento causado pela propagação em vários caminhos. Sem previsões de propagação as estimativas dos parâmetros só podem ser obtidas por medições de campo que são demoradas e caras, ficando operacionalmente inviáveis.

O objetivo deste trabalho é análise e comparação de modelos teóricos de propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes internos.

B.W. Martins, brwallacy@ig.com.br; V. Dmitriev, victor@ufpa.br, Tel (91) 3201-8080; M. G. Lima, mateusdexter@yahoo.com.br; Dionisio Raony, dionisio.raony@gmail.com.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES, através do Projeto Antenas e Modelos de Propagação Eficientes para o SBTVD-T, N.º 137/2008/CII/CGPE/DPB-Capes.

As seções II e III fornecem descrição dos modelos empíricos, determinísticos e estatísticos, e os desafios no desenvolvimento de modelos suficientemente precisos. Na seção IV descrevemos as principais características do Modelo do Caminho Dominante, usado nas simulações. Na seção V comparamos os resultados de medidas com as previsões realizadas com o método de Traçado de Raios e Multi – Wall com o Modelo do Caminho Dominante. As conclusões estão na seção VI.

II. MODELOS DE PREVISÃO DE PROPAGAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Nas últimas décadas foram desenvolvidos e aperfeiçoados vários modelos para a propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes internos. Esses modelos são desenvolvidos teórica ou empiricamente. Descrevemos alguns desses modelos e técnicas utilizadas para melhorar a eficiência dos mesmos.

A. Modelos empíricos

Os modelos empíricos são obtidos a partir de campanhas de medições em uma ou mais regiões, modelagem dos resultados obtidos e apresentação do resultado final (modelo) através de expressões que fornecem o valor mediano da atenuação (modelo de Hata [2], por exemplo). Existem ainda modelos, como o de Okumura [1], que por meio de uma série de curvas (obtidas através de medições) permitem determinar a atenuação média em função da distância do transmissor. Modelos dessa categoria, em especial os modelos dados por uma expressão matemática, apresentam a vantagem de serem, geralmente, de fácil aplicação e de necessitarem de um tempo de execução (computacional) relativamente baixo.

Por outro lado, por serem baseados em medições realizadas em locais específicos, modelos empíricos tendem a não fornecer resultados muito confiáveis quando aplicados a locais que difiram significativamente de onde foram realizadas as medições.

B. Modelos determinísticos

Modelos determinísticos utilizam alguma formulação da teoria eletromagnética, como a Teoria Geométrica da Difração, GTD (*Geometrical Theory of Diffraction*), a Teoria Uniforme da Difração, UTD (*Uniform Theory of Diffraction*),

o Método de diferenças finitas no domínio do tempo, FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*), o método de elementos finitos FEM (*Finite Element Method*), o método das diferenças finitas, etc.

Os modelos teóricos, baseados em teoria eletromagnética, possuem vantagem em termos de confiabilidade dos parâmetros preditos, quando comparados aos modelos empíricos. Além disso, outra característica favorável a estes modelos é que pela sua própria natureza, eles podem ser aplicados sem maiores restrições aos mais variados tipos de ambientes.

As principais desvantagens destes modelos são: maior dificuldade de implementação em relação a modelos empíricos e a exigência de recursos computacionais significativamente grandes, em termos de memória e tempo de processamento.

Para modelos determinísticos pode ser utilizado a Técnica de Traçado de Raios, que consiste no rastreamento do campo eletromagnético através de raios, que têm suas trajetórias (ortogonais às frentes de onda) e interações com o ambiente investigado.

A escolha de um método para análise e desenvolvimento do modelo determinístico, depende da relação entre o comprimento de onda e as dimensões de objetos do ambiente em estudo.

C. Modelos estatísticos

Em sistemas de comunicações a faixa de frequências utilizada, a complexidade do ambiente e a mobilidade do receptor, fazem com que o sinal resultante seja formado por composição de ondas eletromagnéticas que percorreram caminhos distintos, entre transmissor e receptor, através de reflexões e difrações. A este fato, dizemos que a onda eletromagnética propagou-se por multipercurso [1].

Em um canal com multipercurso, cada raio percorre um caminho diferente entre transmissor e receptor e, portanto, o tempo de chegada de cada componente ao receptor será, via de regra, distinto. Dessa forma, o sinal resultante recebido será composto por um conjunto de versões do sinal enviado, que possuem retardos entre si. O sinal que sofreu espalhamento no tempo e o gráfico que mostra cada componente significativa de multipercurso, sua potência e o instante de tempo de chegada é denominado perfil de retardos (*power delay profile*) [3]. A partir do perfil de retardos, pode-se extrair parâmetros importantes. São eles:

- Retardo Excedido Médio (*mean excess delay*)
- Espalhamento Temporal rms (*rms delay spread*)
- Espalhamento Temporal Excedido (*excess delay spread*)

O retardo excedido médio descreve o retardo de propagação médio das componentes em relação à primeira componente que chega ao receptor. O espalhamento temporal rms mede o espalhamento temporal do perfil de retardos em torno do atraso excedido médio (valores típicos são da ordem de microsegundos em canais móveis *outdoor* e da ordem de nanosegundos em canais móveis *indoor*). Em sistemas digitais, o espalhamento temporal rms provoca interferência intersimbólica (ISI - *Inter-Symbolic Interference*), limitando a taxa de símbolos máxima a ser utilizada no canal. Por último, o espalhamento temporal excedido indica o atraso máximo, relativo à primeira componente recebida, para o qual a energia cai de um certo nível (X dB estipulado) abaixo do maior nível de energia recebido, sendo definido como:

$$\tau_{max}(X) = \tau_X - \tau_0 \quad (1)$$

onde τ_0 é o tempo de chegada do primeiro sinal (raio), τ_X o tempo do último raio com nível de potência ainda acima do limite X dB e abaixo do sinal de maior amplitude (não necessariamente o primeiro sinal detectado).

O espalhamento temporal excedido (*Excess Delay Spread*) define a extensão temporal do canal de rádio acima de um determinado limiar de recepção. O valor de τ_X é algumas vezes chamado de tempo de espalhamento da intensidade de potência, mas em todos os casos deve ser relatado como um limiar que relaciona o ruído com as componentes máximas recebidas do multipercurso.

Os parâmetros descritos anteriormente são úteis para se analisar o desempenho da comunicação quanto à taxa de erros. O espalhamento temporal rms é dado por:

$$\tau_{rms} = \sqrt{\bar{\tau}^2 - \bar{\tau}^2} \quad (2)$$

onde

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{n=1}^N P_n t_n}{\sum_{n=1}^N P_n} \quad e \quad \bar{\tau}^2 = \frac{\sum_{n=1}^N P_n t_n^2}{\sum_{n=1}^N P_n} \quad (3)$$

N é o número de raios recebidos, P_n e t_n são, respectivamente, a potência e o tempo de chegada do n -ésimo raio.

$$\tau_{rms} = \frac{1}{\sum_{n=1}^N P_n} \sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=n+1}^N P_n P_m (t_n - t_m)^2} \quad (4)$$

podemos escrever na forma

$$\tau_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=n+1}^N \rho_n \rho_m (t_n - t_m)^2} \quad (5)$$

onde ρ_x é a potência normalizada do x -ésimo raio,

$$\rho_x = \frac{P_x}{\sum_{n=1}^N P_n} \quad (6)$$

com $0 \leq \rho_x \leq 1$. De (5), é óbvio que o espalhamento temporal rms depende das diferenças de atraso do raio à antena receptora; não depende da potência de transmissão, mas apenas das relações de potência dos raios.

III. DESAFIOS EM MODELAGEM DE PROPAGAÇÃO

Prever a propagação em ambientes internos, a fim de proceder a uma análise prévia, o que permite minimizar o número de estações base necessária para dar um serviço eficiente. Outro fator que no futuro será de grande interesse nos projetos é a limitação do nível de campo para um nível mais baixo restritivo, a fim de cumprir com os regulamentos de saúde pública.

A precisão da previsão de propagação em ambientes interiores envolve muitos aspectos. Estes incluem a precisão da localização e tamanho de imóveis, conhecimento das propriedades elétricas das paredes e de outros objetos, tráfego de pessoas e mobiliário podem influenciar nos resultados e fazer diferença na previsão.

Para lidar com a previsão de propagação nesses ambientes complexos, modelos de propagação foram desenvolvidos com base em técnicas de Traçado de Raios. A principal tarefa dessa técnica é determinar a trajetória de um raio lançado a partir de uma antena transmissora. Este procedimento

envolve o cálculo da interseção de um raio com uma superfície (caso em três dimensões) ou um raio com um segmento (caso em duas dimensões). Um procedimento importante que pode ser adotado, para melhorar a precisão da previsão no Traçado de Raios, implementa características da óptica geométrica – tal como raios refletidos, transmitidos, espalhados, difratados e a suas combinações. Contudo, na execução desta técnica, o tempo de cálculo pode ser enorme ou mesmo acima da capacidade dos computadores comuns se o ambiente de propagação é grande e/ou complexo.

Recentemente, a caracterização de estruturas de ambientes complexos (incluindo parede de metal, janelas emolduradas e diferentes formas de objetos no interior do ambiente) está recebendo a devida atenção à necessidade de uma previsão mais eficiente do mecanismo de propagação em ambientes interiores – indoor. Para enfrentar estes desafios, os métodos de previsão existentes devem ser modificados e melhorados, e novos procedimentos e técnicas devem ser desenvolvidos.

IV. MODELO DO CAMINHO DOMINANTE

Como alternativa para minimizar o tempo de processamento e consumo de memória computacional nos modelos de previsão determinísticos, é proposto um modelo em [4] que se concentra no caminho dominante entre o receptor e o transmissor. Este método não se concentra apenas no raio direto (como modelos empíricos) e não considera centenas de raios em um único pixel (como em técnicas que utilizam traçado de raios), ele considera o caminho em que a energia tem maior intensidade.

A. Caminho com maior intensidade de energia

A Fig. 1 mostra como os raios são lançados a partir dos Modelos de Traçado de Raios e Caminho Dominante. Até centenas de raios podem ser computados para cada receptor. As contribuições de todos os raios são superpostas para obter a energia recebida. Mas na maioria dos casos apenas 2 ou 3 raios estão contribuindo com até 95% da energia [5], ou seja, considerando apenas esses raios a precisão seria suficiente para previsão. É nesse fato que se concentra o modelo do caminho dominante.

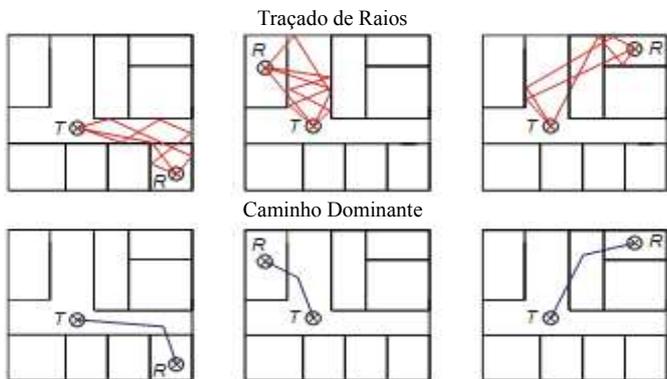


Fig. 1. Comparação dos diferentes modelos aproximados: modelo de traçado de raios (acima) considera vários raios em contraste com o modelo do caminho dominante que considera apenas os raios mais relevantes.

Os parâmetros do modelo do Caminho Dominante são o comprimento do percurso do raio, o número e tipos de interações, a intensidade de energia, a potência recebida, o

desvanecimento por multipercursos, etc. Estes são determinados e utilizados na previsão da perda de energia entre o transmissor e o receptor. Adiante, observa-se que o tempo de processamento computacional, nesse modelo, é muito inferior ao método de traçado de raios e da gama de modelos empíricos. E ainda, a precisão do modelo do Caminho Dominante em ambientes muito complexos (onde ocorrem múltiplas interações) é ainda maior do que a precisão do Modelo de Traçado de Raios, por conta da limitação, deste último, no número de interações consideradas.

B. Algoritmo

Depois de analisar as restrições de modelos determinísticos sobre a propagação de raios, os requisitos para um novo modelo podem ser formulados: um novo modelo deve centrar-se no caminho dominante entre o transmissor (T) e receptor (R), pois este caminho leva a maior parte da energia; não deve considerar centenas de caminhos irrelevantes; não deve depender de pequenos detalhes do banco de dados que descreve o ambiente simulado; deve ter a possibilidade de calibração simples, com dados de referência, por exemplo, de medições.

Considerando esses requisitos o algoritmo do modelo do Caminho dominante foi desenvolvido e pode ser subdividido em duas etapas:

- Determinação do Caminho Dominante (Geometria);
- Previsão da perda por percurso ao longo dos trajetos.

Na primeira etapa, o caminho dominante é determinado. A Fig. 2 (lado esquerdo) mostra um cenário onde o transmissor (T) está localizado em um corredor. As informações sobre o arranjo das paredes são usadas para determinar os tipos de cantos. O caminho dominante entre T e R deve levar em conta cantos convexos via receptor. Uma árvore com todos os cantos convexos é computada. Todos os cantos visíveis a partir do canto examinado são novos ramos da árvore. Como mostrado na Fig. 2 (lado direito), onde a árvore começa nos cantos visíveis a partir de T. O receptor R também é incluído na árvore. Cada vez que o receptor é encontrado na árvore, os cantos ao longo do caminho são determinados pelo ramo seguinte de volta à T. A Fig. 2 mostra que existe mais de um caminho entre T e R.

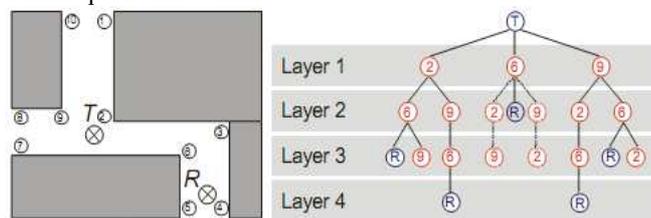


Fig. 2. Cenário com paredes, transmissor e receptor (esquerda) e a estrutura da árvore construída pelo algoritmo (direita).

C. Perda por percurso

Após o cálculo da árvore, o algoritmo tem de decidir qual caminho tem a menor perda de propagação. Isto é feito através da comparação entre as perdas dos diferentes caminhos e o melhor caminho é chamado de Caminho Dominante com Perda Mínima (*Minimum-loss dominant path – MLDP*) [4].

A previsão da perda de energia por caminho ao longo do

trajeto é feita usando a seguinte equação:

$$L = 20\log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 10p\log(l) + \sum_{i=1}^n f(\varphi, i) + \sum_{j=1}^m t_j - \Omega \quad (7)$$

L é a perda de energia por caminho em dB, em um caminho de comprimento l (em metros). λ é o comprimento de onda e Ω o fator guia de onda; $f(\varphi, i)$ é uma função que determina a perda por interação em dB, ou seja, a perda quando se muda a direção de propagação. O ângulo entre a direção anterior e a nova direção de propagação é φ . A perda aumenta linearmente com o ângulo, começando com uma compensação α_1 . A linearidade termina no ângulo φ_1 e a perda será constante (em nível α_2) para ângulos acima de φ_1 . O i é o número da interação, por exemplo, $i = 2$, segunda interação nesse caminho de propagação.

O fator p depende da visibilidade entre o pixel atual e o transmissor. Adaptar p para a situação permite diferentes expoentes de perda de energia por caminho e pontos individuais de interrupção, dependendo das condições de visada direta, LOS (*Line of Sight*), visada direta com obstrução, OPS (obstrução *Line of Sight*) e sem visada direta, NLOS (*Non Line of Sight*).

O número atual de interação é importante, porque nem todas as interações são ponderadas da mesma forma. Interações com os maiores índices i levam a redução das perdas em relação às interações com os índices menores. Isso é considerado porque a onda está se tornando cada vez mais difusa após cada interação. Assim, quanto mais opções para interações, mais ocorrem ondas difusas (mais opções significam menos perda total). Perdas devido a mudanças horizontal e vertical na direção de propagação são determinadas de forma independente.

O fator guia de onda Ω depende das características do material da parede (perda por reflexão), da orientação (ângulo de reflexão) e da distância entre o caminho e a parede. A perda de reflexão nas paredes ao longo do caminho e a distância entre a parede e o caminho possuem influência em α . Quanto mais o caminho dominante estiver próximo a parede, menor a perda de reflexão e maior o fator guia de onda. O ganho por guia de onda é determinado para cada pixel antes do início da previsão. Durante a previsão esse ganho é acumulado ao longo do caminho de propagação. Em corredores e em ruas estreitas esse ganho é maior do que em áreas abertas [6].

Ainda para a determinação da perda de energia por percurso em cenários interiores, as transmissões através das paredes devem ser consideradas adicionalmente. A parcela t_j significa a perda por transmissão de j paredes, ou seja, t_2 é a perda de transmissão da segunda parede que foi penetrada pelo raio que representa o caminho dominante.

V. MEDIDAS E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

O modelo do Caminho Dominante é comparado com resultados de campanhas de medições que foram realizadas em diferentes tipos de edifícios. A descrição detalhada dos equipamentos utilizados e das medidas obtidas podem ser encontradas em [7]. Esses resultados também foram comparados ao modelo de Traçado de Raios 3D (IRT) e ao modelo empírico *Multi-Wall* (MW).

Para implementação do modelo do Caminho Dominante,

primeiramente, é preciso construir uma base de dados que descreva o ambiente no qual iremos analisar. A fim de obter uma descrição mais precisa da propagação da onda, os dados da arquitetura do ambiente são armazenados em um formato de vetores 3D, incluindo todas as paredes, portas e janelas. Todos os elementos no interior do edifício são descritos em termos de elementos planos. Cada parede é, por exemplo, representada por um plano e sua extensão é localizada e definida por seus cantos (vide Fig. 3). Além disso, para cada elemento individual, as propriedades do material podem ser consideradas em [8].

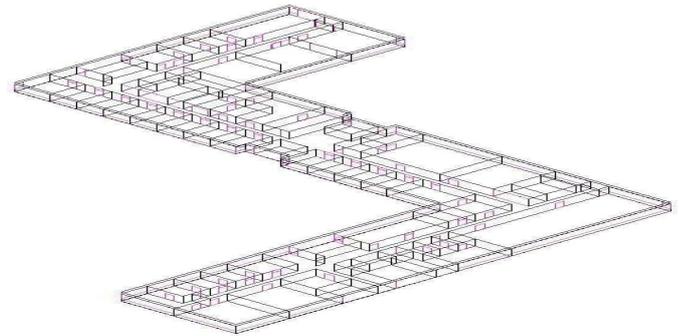


Fig. 3. Elementos planos que delimitam os objetos e as paredes de ambientes interiores.

Medições foram realizadas em um moderno edifício que é essencialmente construído de concreto e vidro, descritas em [7]. O banco de dados de um único piso do edifício contém 108 objetos planos com mais de 130 subdivisões (janelas, portas e paredes).

As medições incluem 20 diferentes posições do transmissor e várias direções, para cada posição. Duas posições do transmissor são analisadas neste trabalho. Os resultados da previsão foram simulados no software [8], com os modelos de predição Traçado de Raios, *Multi-Wall* e Caminho Dominante. As Figs. 4 a 6 mostram os resultados simulados para o transmissor na posição 8. As medições da perda por caminho obtidas neste edifício foram realizadas com um sinal CW. A frequência portadora utilizada foi de 1800 MHz e a potência do transmissor foi de 20 dBm.

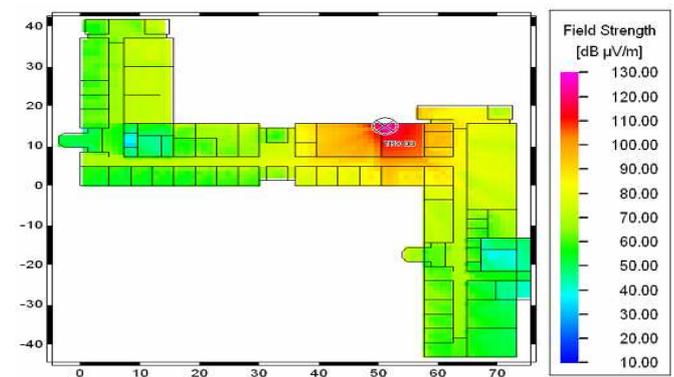


Fig. 4. Predição para a posição 8 do transmissor com o Modelo do Caminho Dominante.

Os resultados da previsão utilizando o modelo do Caminho Dominante são mais realistas em relação aos resultados dos outros dois modelos. As intensidades do campo eletromagnético dadas pelos Modelos de Traçado de Raio e *Multi-Wall*, especialmente depois de várias difrações, e a maiores distâncias possuem precisão inferior ao modelo

do Caminho Dominante (tabela I e Fig. 5 e 6). Isso pode ser explicado pelo fato de que o Modelo de Traçado de Raios considera 4 difrações e 5 reflexões.

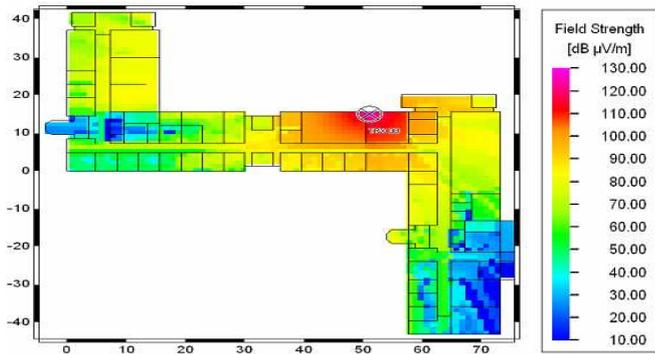


Fig. 5. Predição para a posição 8 do transmissor com o Modelo de Traçado de Raios 3D (IRT) considerando 6 transmissões, 4 difrações, 5 reflexões e várias combinações destes.

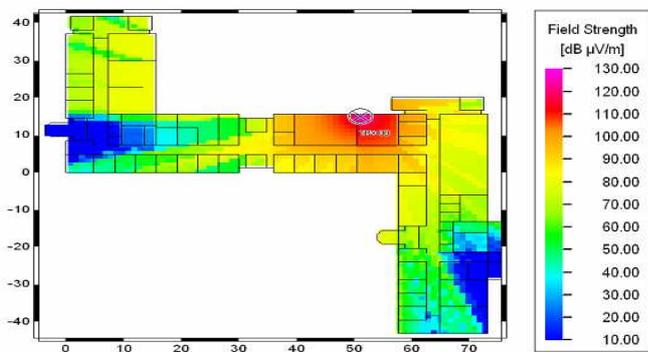


Fig. 6. Predição para posição 8 do transmissor com Modelo Multi-Wall.

A precisão do Modelo Multi-Wall é ainda pior, pois é consequência do fato de que considera apenas o raio direto e não considera as reflexões e difrações. As Fig. 7 e 8 mostram a diferença entre as previsões realizadas com o Modelo do Caminho Dominante e as medidas realizadas com o transmissor nas posições 2 e 8. As diferenças entre previsão e medição são mostradas na tabela I.



Fig. 7. Diferença entre medições e predição pelo Modelo do Caminho Dominante, com o transmissor nas posições 8 (direita).

A Tabela I mostra a diferença entre previsões e medidas para o Modelo do Caminho Dominante, bem como para os Modelos Traçado de Raios e Multi-Wall.

Outra campanha de medições foi realizada em um edifício mais velho [7], construído principalmente de tijolos e madeira. As Figs. 9 e 10 mostram previsões para duas posições do

transmissor. O banco de dados, de um único piso do edifício contém 107 objetos planares. A frequência portadora para a medição foi de 1800 MHz.



Fig. 8. Diferença entre medições e predição pelo Modelo do Caminho Dominante, com o transmissor na posição 2 (direita).

TABELA I COMPARAÇÃO ENTRE PREDIÇÃO X MEDIÇÃO (EM dB)

Posição do Transmissor	IRT		CAMINHO DOMINANTE		MULTI-WALL	
	Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio Padrão
TRX 2	1.25	6.04	-1.73	5.12	-4.31	5.82
TRX 8	3.99	9.30	3.69	4.39	1.54	16.55

Na Fig. 9, alguns caminhos de propagação são apresentados. Cada difração e cada transmissão causam uma atenuação adicional ao longo do caminho de propagação. Esse cálculo é feito em 2D, pois o transmissor e o receptor estão localizados no mesmo andar. A comparação entre as medições e as previsões com os diferentes modelos estão na tabela II. Também, neste cenário, o Modelo do Caminho Dominante mostra uma boa precisão.

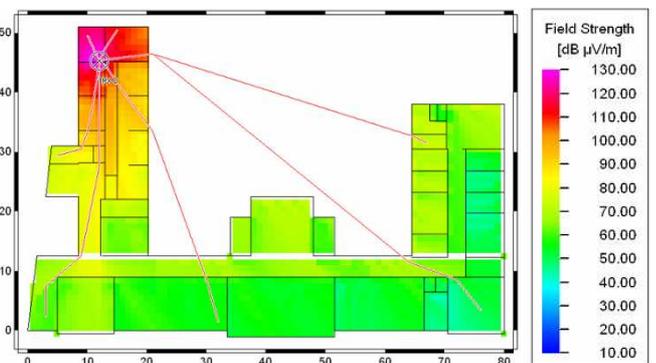


Fig. 9. Previsão com o Modelo do Caminho Dominante com alguns caminhos de propagação, o transmissor está na posição 0.

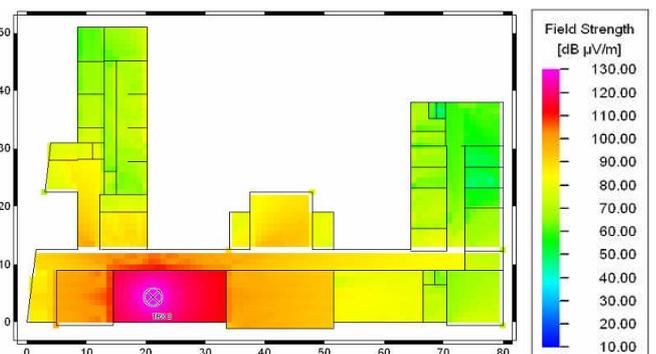


Fig. 10. Previsão com o Modelo do Caminho Dominante com o transmissor na posição 3.

TABELA II COMPARAÇÃO COM AS MEDIÇÕES

Posição do Transmissor	IRT		CAMINHO DOMINANTE		MULTI-WALL	
	Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio Padrão
TRX 0	-0.85	12.11	-3.11	5.85	-1.39	11.39
TRX 3	-2.18	7.23	-0.87	6.39	-3.96	9.83
TRX 7	-0.85	9.76	-2.86	5.64	0.60	6.04

Mais medições foram realizadas, agora, em um edifício com vários andares construído principalmente de concreto e vidro. A base de dados que descreve este edifício contém 355 objetos planares. Neste cenário, a antena transmissora está localizada no topo do edifício. As medições, descritas em [7], e previsões, desenvolvidas em [8], foram feitas no prédio, abaixo da antena e em um edifício adjacente (Figs. 11 e 12).

A frequência portadora para as medições foi de 950 MHz. Como neste cenário, a estação móvel (receptora) e a antena (estação base) estão localizadas em diferentes andares (altura da antena: 20,5 m; altura de previsão: 15,4 m, 5º andar), o modo 3D do Modelo do Caminho Dominante em [8] foi utilizado para esta simulação. Além disso, várias camadas entre o transmissor e o receptor são usadas para melhorar o resultado em vez de apenas um plano de previsão (altura do receptor). As diferenças entre previsões e medições são apresentadas na tabela III. Todas as medidas juntamente com uma descrição detalhada dos equipamentos podem ser encontradas em [7] e [9].

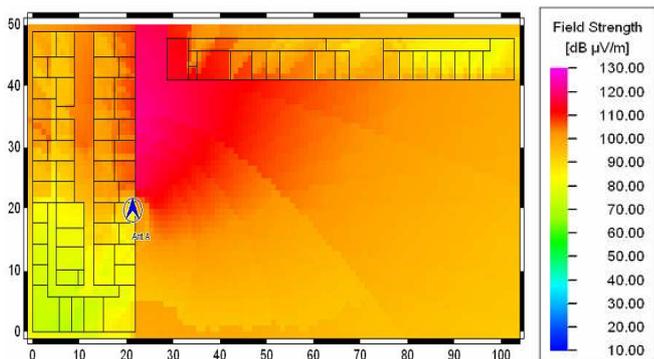


Fig. 11. Predição com o Modelo do Caminho Dominante (3D) com a antena na posição A.

Os resultados com o Modelo do Caminho Dominante para este cenário são bons (considerando a complexidade do cenário). A Tabela III mostra a diferença em relação às medições para os modelos de previsão.

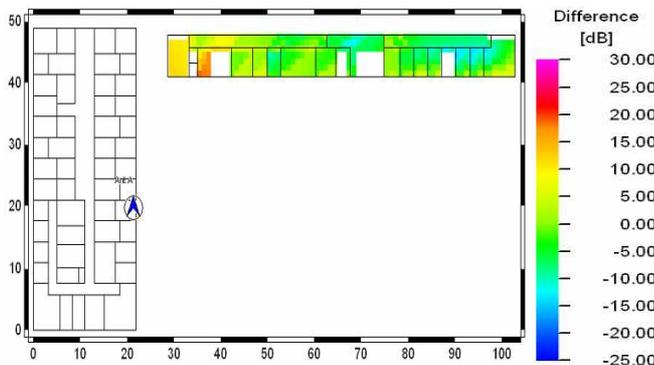


Fig. 12. Diferença entre medições e predição com o Modelo do Caminho Dominante (modo 3D), para a antena na posição A.

TABELA III COMPARAÇÃO DOS MODELOS COM AS MEDIÇÕES

Posição do Transmissor	IRT		CAMINHO DOMINANTE		MULTI-WALL	
	Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio Padrão
Antena A no 5º andar	2.97	5.37	-1.25	6.45	0.68	8.46

V. CONCLUSÕES

Para desenvolvimento de projetos de sistema de comunicação, análise estratégica, tática e operacional, em ambientes internos, é essencial ter informações acerca da onda eletromagnética nesses ambientes. Modelos determinísticos são importantes na predição da propagação da onda, em particular, as produzidas por frequências na faixa de microondas.

Neste trabalho, resultados de campanhas de medições foram comparados com resultados do Modelo do Caminho Dominante e de outros modelos de propagação – Modelo de Traçado de Raios e o Modelo empírico Multi-Wall. O modelo que considera o caminho dominante de energia, entre transmissor e receptor, gera resultados confiáveis para a análise do sinal eletromagnético no ambiente indoor. Esse modelo considera as propriedades das paredes, portas e janelas na simulação. O software em [8] permite a manipulação tanto dos parâmetros relativos ao ambiente simulado (paredes, portas, janelas, etc.) quanto àqueles correspondentes as leis físicas da propagação de ondas eletromagnéticas.

Este trabalho está direcionado ao estudo da propagação da onda eletromagnética em ambientes indoor para auxílio ao planejamento, análise – dos principais parâmetros de propagação eletromagnética – e aplicações operacionais em áreas de defesas.

REFERÊNCIAS

- [1] T. S. Rappaport, “Wireless Communications – Principles and Practice”. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2001.
- [2] Hata, M. “Propagation loss prediction models for land mobile communications”, ICMMT '98 Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings, p. 15-18, Aug. 1998.
- [3] E. G. Pelaes, H. de Melo Júnior, J. C. W. A Costa, “Caracterização de Canais Rádio-Móvel em Ambientes Exteriores: uma Abordagem utilizando Filtros Digitais”, 3rd International Information and Telecommunication Technologies Symposium - I2TS. Juny,2004.
- [4] G. Wölfle and F.M. Landstorfer, “Dominant Paths for the Field Strength Prediction”, 48th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) 1998, Ottawa, Ontario, Canada, May 1998, pp 552-556.
- [5] G. Wölfle, R. Wahl, P. Wildbolz, P. Wertz, “Dominant Path Prediction Model for Indoor and Urban Scenarios”, 11th COST 273 MCM, Duisburg (Germany), Sep. 2004.
- [6] D. Porrat and D. C. Cox, “UHF Propagation in Indoor Hallways”, Ieee Transactions On Wireless Communications, Vol. 3, No. 4, July 2004.
- [7] G. C. Angelo, I.Neto, and L. M. Correia: “Health and Penetration Issues in Buildings with GSM Base-Station Antennas on Top”. In 48th Intern. Conf. on Veh. Techn. (VTC), pp. 450–454, Ottawa, May 1998.
- [8] Software Tool WinProp for the Planning of Mobile Communication Networks (incl. Demo-version): < http://www.awe-communications.com/internet/ >. Acesso em 27/08/2010.
- [9] G. Woelfle, P. Wertz, F.M. Landstorfer: “Performance, accuracy and generalization capability of indoor propagation models in different typof buildings”, 10th IEEE Internat. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) 1999, Sept. 1999, Osaka, Japan F5-2.