

Novo tratamento para raios transmitidos na Técnica de Traçado de Raios utilizando a Teoria das Imagens

Stevan Grubisic, Walter Pereira Carpes Junior, João Pedro Assumpção Bastos.

Resumo— Este artigo apresenta um modelo teórico para a predição de campos eletromagnéticos em ambientes interiores. O modelo adota a Técnica de Traçado de Raios 2D, usando a Teoria das Imagens para a determinação de todos os percursos relevantes percorridos pelas ondas. Uma nova aproximação para a determinação dos raios transmitidos através de paredes é proposta e validada por meio de comparações com o método FD-TD. O cálculo dos campos é baseado na Ótica Geométrica (GO) e na Teoria Uniforme da Difração (UTD). Os resultados em um ambiente interior prático são mostrados por meio do mapeamento das potências recebidas, considerando uma ou mais antenas transmissoras no ambiente.

Palavras-Chave— traçado de raios, predição eletromagnética, ambientes interiores, comunicações sem fio.

Abstract— This paper presents a physical prediction model for indoor environments. This model is based on ray-tracing technique, using the Image Theory to take into account all valid paths. A new approach for transmitted rays through the walls is proposed and validated by comparison with results obtained through FD-TD method. The computation of fields is based on Geometrical Optics (GO) and Uniform Theory of Diffraction (UTD). The results in a practical indoor environment are presented by mapping the received power, considering one or more transmitting antennas.

Keywords— ray-tracing, field prediction, indoor environment, wireless communication.

Stevan Grubisic, Walter Pereira Carpes Junior, João Pedro Assumpção Bastos, GRUCAD – Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. E-mails: stevan@grucad.ufsc.br, carpes@grucad.ufsc.br, jpab@grucad.ufsc.br.

I. INTRODUÇÃO

O crescente aumento do número de usuários nos sistemas celulares, aliado à elevada demanda por novos serviços de comunicações sem fio, estabelece a necessidade de um planejamento detalhado destes sistemas. Nestes serviços, o delineamento das áreas de cobertura de cada célula, que são cada vez menores, deve ser rigoroso. Para isto recomenda-se a utilização de modelos de predição de campos.

Tradicionalmente, as predições baseiam-se em modelos empíricos e semi-empíricos. Entretanto, tais modelos geralmente não apresentam bons resultados em micro e pico células (p. ex., ambientes interiores), sendo adequada a adoção de métodos determinísticos [1].

Um modelo baseado na Técnica de Traçado de Raios utilizando a Teoria das Imagens (IT) será apresentado. Trata-se de um método assintótico, sendo, portanto, adequado quando os comprimentos de onda são pequenos em relação às dimensões dos obstáculos. Os campos são calculados por meio da soma coerente dos campos devidos a todos os raios relevantes que chegam ao receptor.

A Ótica Geométrica (GO) e a Teoria Uniforme da Difração (UTD) são utilizadas para o cálculo dos campos. Os campos direto, refletido e difratado são calculados a partir da determinação de seus percursos exatos. Uma nova proposta para o cálculo de campos devidos a raios transmitidos através de paredes será apresentada e validada por meio de comparações com o método FD-TD.

II. TÉCNICA DE TRAÇADO DE RAIOS

A Técnica de Traçado de Raios é utilizada para o rastreamento das trajetórias percorridas pelas ondas eletromagnéticas. Um raio óptico é definido como uma reta tangente à direção de propagação por onde a energia é transportada ao longo de sua trajetória [2].

Quando a propagação se dá em meios homogêneos, o percurso da onda corresponde a uma linha reta. Esta consideração é perfeitamente válida para a maioria dos sistemas de comunicação sem fio. Além disso, quanto maior for a frequência envolvida, mais as ondas se assemelham a raios ópticos (técnica assintótica), permitindo aplicar o

conceito de raios nas faixas superiores de frequência (UHF, por exemplo).

Para a determinação dos percursos, são levadas em consideração as diversas interações dos raios com os obstáculos (reflexão, refração e difração). O cálculo é então feito, utilizando os conceitos da Ótica Geométrica (GO) e da Teoria Uniforme da Difração (UTD), somando-se os campos provenientes dos diversos percursos.

A Técnica de Traçado de Raios possui duas abordagens: o método SBR (*Shooting and Bouncing Rays*), também conhecido como método da “Força Bruta”, e a Teoria das Imagens (IT - *Image Theory*).

O Método SBR consiste no lançamento dos raios a partir da antena transmissora, com espaçamento angular pré-determinado entre eles. Os raios percorrem seus percursos e, ao atravessarem uma região próxima a um receptor (dentro da esfera de recepção), adiciona-se a contribuição desse raio ao campo total recebido. O raio continua seu percurso até atingir um determinado número de interações com os obstáculos ou até atingir um limiar mínimo de campo, quando sua contribuição torna-se desprezível.

A IT, por outro lado, baseia-se apenas nos raios relevantes, ou seja, aqueles que saem do transmissor e atingem exatamente o receptor. Este método consiste em encontrar as imagens (árvore de imagens) geradas por fontes transmissoras e, a partir daí, determinar os pontos de reflexão nas superfícies, traçando o percurso exato entre a antena transmissora e a antena receptora. A Fig.1 mostra o exemplo de um dos trajetos percorridos pela onda entre o transmissor e o receptor, com reflexões nas superfícies S_1 e S_3 .

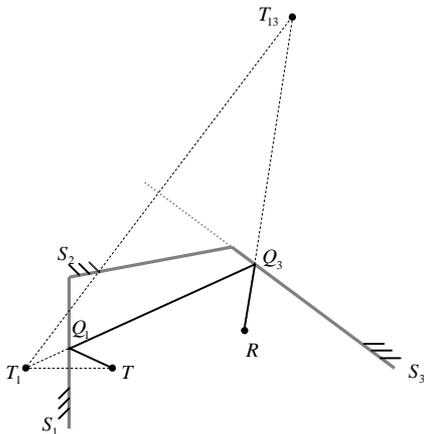


Fig.1. Exemplo de um percurso determinado pela IT.

Os raios difratados por arestas são diretamente traçados, representando também um percurso exato da onda. Entretanto, a determinação do percurso exato de um raio transmitido não é simples, pois este sofre um desvio ao atravessar um obstáculo. Em muitos cenários, como em ambientes exteriores, os raios transmitidos podem ser

descartados, sendo a IT uma boa solução nestes cenários. Já o método SBR é tradicionalmente mais utilizado em ambientes interiores.

Uma das principais vantagens da IT em relação ao método SBR é o fato de requerer apenas os raios relevantes. Entretanto, como já dito, um raio transmitido através de um obstáculo sofre um desvio ocorrido no percurso (refração) ao atravessá-lo. Desta forma, propõe-se a seguir um procedimento para o cálculo deste desvio que permite determinar com precisão o percurso exato dos raios transmitidos através de paredes.

III. DETERMINAÇÃO DOS RAIOS TRANSMITIDOS ATRAVÉS DE PAREDES

O “acompanhamento” dos raios no método SBR é natural na sua formulação. Um raio que incide numa parede gera dois novos raios (refletido e refratado). O raio refratado é acompanhado e, após sua segunda refração (ao sair da parede), é chamado de raio transmitido. Esse raio tem o mesmo tratamento de outro raio qualquer, sendo fácil de ser determinado e acompanhado pelo método SBR.

A IT, no entanto, apesar de suas inúmeras vantagens – por exemplo, a de “economizar” raios, considerando apenas os relevantes para os cálculos – possui um difícil tratamento na abordagem dos raios transmitidos. Na literatura, em geral, as implementações baseadas na IT nem mesmo consideram o efeito dos raios transmitidos, mesmo em ambientes interiores, nos quais sua contribuição pode ser significativa. Alguns softwares descritos na literatura utilizam aproximações que incluem coeficientes de transmissão semi-empíricos [3] ou ainda que consideram as trajetórias sem o desvio existente devido às refrações (ar-parede e parede-ar). Estas aproximações podem gerar bons resultados em determinadas análises qualitativas da distribuição dos campos. Porém, os erros ocasionados, principalmente devido à inexactidão da fase dos campos, em muitos casos podem comprometer os cálculos.

A seguir, será apresentada uma nova proposta para determinar um percurso aproximado (quase exato) dos raios transmitidos através de paredes (em 2D) e que se apresenta compatível com a IT. Este procedimento pode ser estendido para casos 3D.

Determinado o percurso, o cálculo do campo devido aos raios transmitidos é feito, respeitando-se os conceitos da GO e os respectivos coeficientes de transmissão resultantes.

Procedimento para determinar o percurso dos raios transmitidos

A Fig.2 mostra a trajetória de um raio transmitido através de uma parede. Esta configuração apresenta-se como um caso padrão, pois em problemas de predição de campos em

ambientes de comunicações sem fio, o meio 1 é o ar, sendo a parede (meio 2) representada como um material homogêneo (p. ex., concreto).

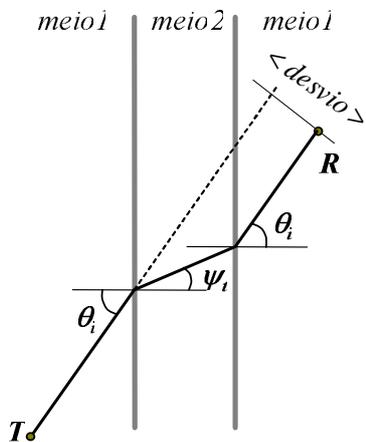


Fig.2. Trajetória de um raio transmitido através de uma parede.

Para os raios transmitidos através de um obstáculo tem-se um desvio do percurso devido à dupla refração existente quando o raio atravessa sua parede. Segundo a Lei de Snell da Refração, o ângulo de refração depende do ângulo de incidência (θ_i) e das constantes de propagação γ_1 e γ_2 dos materiais ($\gamma = \alpha + j\beta$):

$$\gamma_1 \text{sen} \theta_i = \gamma_2 \text{sen} \theta_t \quad (1)$$

No caso mais geral, o meio 2 possui constante de propagação complexa (condutividade não nula $\rightarrow \alpha \neq 0$). Neste caso, o ângulo θ_t é complexo e o ângulo de refração real ψ_t pode ser obtido da seguinte forma [5]:

$$\begin{aligned} \cos \theta_t &= \sqrt{1 - \text{sen}^2 \theta_i} = \sqrt{1 - \left(\frac{j\beta}{\alpha + j\beta} \right)^2 \text{sen}^2 \theta_i} = \dots \\ &= s \exp(j\zeta) = s(\cos \zeta + j \text{sen} \zeta), \end{aligned}$$

onde $\cos \theta_t$ é um número complexo, sendo s o seu módulo e ζ o ângulo. Assim,

$$\psi_t = \arctan\left(\frac{u}{q}\right), \quad (2)$$

onde

$$\begin{aligned} q &= s(\alpha_2 \cos \zeta + \beta_2 \text{sen} \zeta) \\ u &= \beta_1 \text{sen} \theta_i \end{aligned}$$

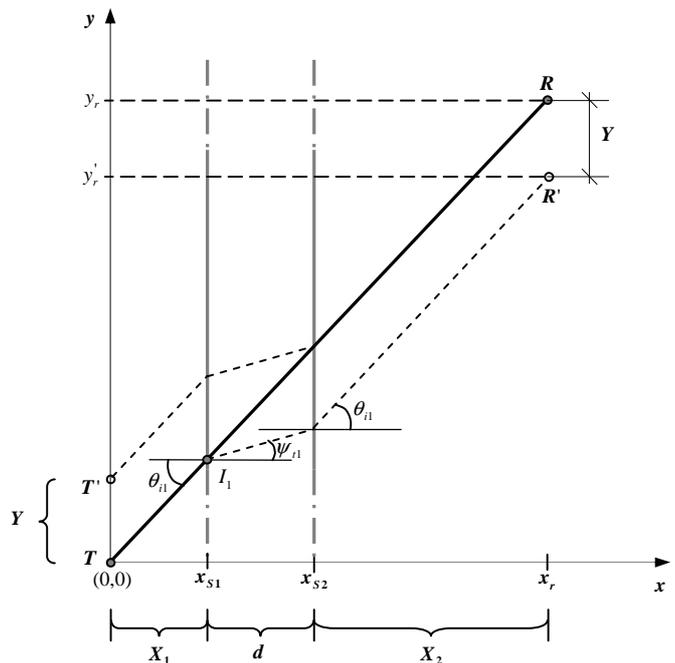


Fig.3. Parâmetros geométricos utilizados no procedimento.

Conhecendo-se o ponto de transmissão e o ponto de recepção (onde se deseja calcular o campo) e havendo uma parede de espessura d entre esses dois pontos, não é trivial a priori traçar o raio de forma exata como acontece na determinação dos raios direto, refletido e difratado. O seguinte procedimento é então proposto para a determinação do raio que, como será visto, é a trajetória “quase exata” do raio transmitido (Fig.3 e Fig.4):

- arbitra-se um sistema de coordenadas cartesianas 2D (xy) com sua origem coincidindo com o ponto de transmissão ($x_t=0$ e $y_t=0$), de tal forma que o ponto de recepção fique posicionado no primeiro quadrante desse sistema ($x_r>0$ e $y_r>0$) e que o eixo y seja paralelo à parede;
- traça-se um raio em linha reta (sem o desvio) entre os pontos de transmissão $(0,0)$ e recepção (x_r, y_r) e determina-se o ponto de intersecção $I_1 = (x_{S1}, y_{S1})$ do raio com a parede;
- utilizando o “ângulo de incidência” θ_{i1} e aplicando as equações (1) e (2), determina-se o ângulo da primeira refração ψ_{t1} (obs.: na segunda refração, o ângulo será idêntico ao ângulo de incidência θ_{i1});
- traça-se o raio, partindo do transmissor e respeitando as mudanças de direção (nas passagens ar-parede e parede-ar, de acordo com os ângulos calculados), acompanhando este traçado até atingir um ponto R' , onde $x'_r = x_r$. Neste

ponto, determina-se a distância entre os pontos R e R' ($Y = y_r - y'_r$), que é a mesma entre T e T' .

- determina-se a distância ($X_1 = x_{S1}$) do ponto de transmissão até a parede e a distância ($X_2 = x_r - x_{S2}$), do ponto de recepção até a parede.

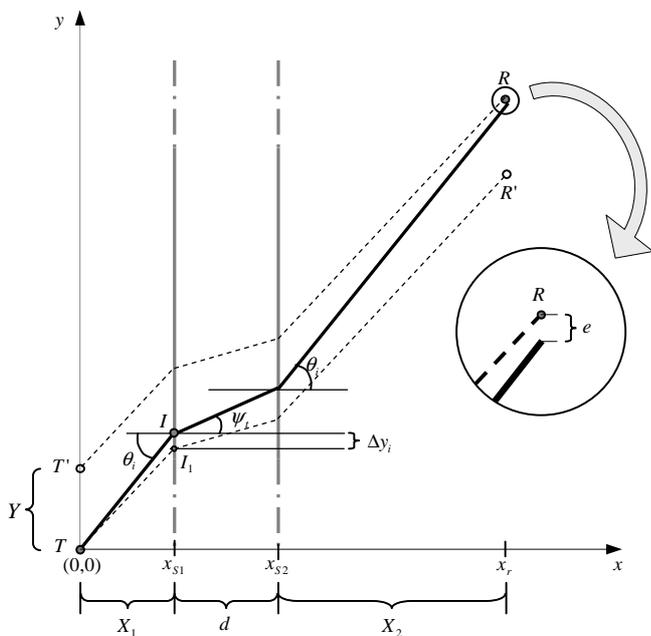


Fig.4. Ilustração do percurso encontrado e detalhamento do erro e .

- Determina-se um novo ponto de intersecção da onda incidente com a parede (ponto I , ver Fig. 4). Esta correção no ponto de intersecção permite obter um raio relevante, já que o raio que passa por I_1 não o é (não atinge o ponto de recepção). As coordenadas do ponto de incidência I “quase exato” são $x_i = x_{S1}$ e $y_i = y_{S1} + \Delta y_i$, onde

$$\Delta y_i = \frac{Y \cdot X_1}{X_1 + X_2}; \tag{3}$$

- encontrado o ponto I , determina-se o ângulo de incidência θ_i (entre o raio incidente e o vetor normal à superfície) e calcula-se o ângulo de refração ψ_r , sendo que o ângulo da segunda refração é o próprio ângulo θ_i .

Observa-se que o percurso do raio que passa por I não atinge exatamente o ponto de recepção (ver detalhe da Fig. 4). A seguir será comentada a causa deste erro e , em seguida, será mostrado por meio de alguns exemplos numéricos que tal erro é praticamente desprezível, não comprometendo os valores calculados dos campos transmitidos.

Avaliação do Erro do Raio Transmitido

O procedimento proposto, como mencionado, apresenta um erro e . Este erro no percurso ocorre porque o ângulo de refração varia com o ângulo de incidência, segundo a Lei de Snell da Refração, equação (1).

Seguindo o procedimento proposto, o “ajuste” no ponto de incidência do raio na parede (isto é, acréscimo de Δy no ponto de incidência inicial) é feito utilizando uma relação linear de proporcionalidade entre as distâncias nas dimensões x e y . O ângulo ψ_{r1} é calculado utilizando a equação (2) e este depende do ângulo de incidência inicial θ_{i1} . Com o novo ponto de incidência (após o ajuste), o ângulo de incidência varia para θ_i , mudando também o ângulo de refração para ψ_r . Acompanhando o percurso encontrado, observa-se que essa mudança provoca uma pequena diferença (e) entre o ponto de recepção e o ponto de chegada do raio traçado. É importante perceber que caso não houvesse variação nos ângulos refratados, ou seja, se $\psi_r = \psi_{r1}$, o raio traçado alcançaria o ponto exato de recepção ($e = 0$). Assim, como geralmente $\psi_r \neq \psi_{r1}$, existe um erro ($e \neq 0$); porém, como será visto, este erro é praticamente desprezível.

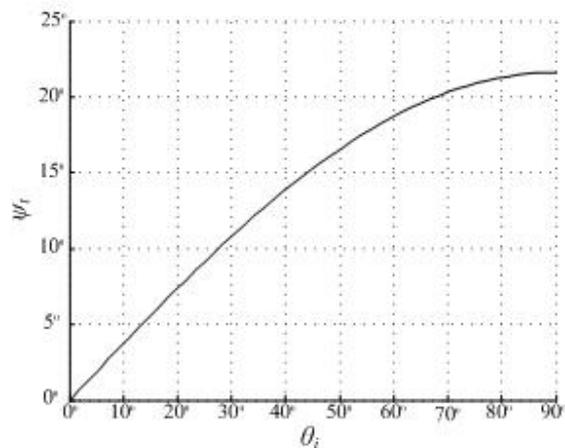


Fig.5. Variação do ângulo de refração real em função do ângulo de incidência.

A Fig. 5 mostra a variação do ângulo de refração em função do ângulo de incidência para uma onda de 1GHz propagando-se no ar com polarização vertical (ou seja, perpendicular ao plano de incidência) e que incide numa parede de concreto ($\epsilon_r = 7$ e $\sigma = 47,3$ mS/m em 1GHz [4]) de 20cm de espessura. Percebe-se que, para pequenos ângulos de incidência, tem-se uma maior taxa de variação ($\partial \psi_r / \partial \theta_i$) do ângulo refratado. Isto poderia levar à conclusão de que o erro é maior para ângulos de incidências menores. Porém, isto não necessariamente ocorre, pois para ângulos de incidência menores, a distância Y também é menor, diminuindo o erro e (por exemplo, para $Y=0$ tem-se incidência normal, resultando em $e = 0$).

Desta maneira, percebe-se que o erro e é função não só da derivada do ângulo de transmissão em relação ao ângulo de incidência ($\partial\psi_i/\partial\theta_i$) mas também da distância Y . A TABELA I apresenta alguns valores do erro e em função do ângulo de incidência θ_i e da distância Y .

TABELA I - Valores de erro e em função do ângulo de incidência e da distância Y .

θ_i	2,25°	17,43°	38,17°	53,25°	72,86°	79,91°	82,02°
Y (mm)	4,79	39,20	106,6	198,8	553,8	1012,5	1304,2
e (mm)	0,0573	0,417	0,681	0,600	0,216	0,0845	0,0545

Observa-se que erros menores ocorrem quando o ângulo de incidência é quase nulo (pois nesses pontos Y é muito pequeno) e também quando o ângulo de incidência é grande (pois a derivada $\partial\psi_i/\partial\theta_i$ para esses ângulos, conforme a Fig.5, é quase nula).

Apesar desta variação do erro, observa-se que seus valores são muito baixos em qualquer situação, não sendo de interesse prático uma análise matemática mais detalhada deste erro.

IV RESULTADOS

Para a validação do procedimento proposto de determinação dos raios transmitidos, simulou-se o cenário mostrado na Fig. 6. Trata-se da incidência de uma onda com frequência de 1GHz sobre uma parede de concreto com 20cm de espessura.

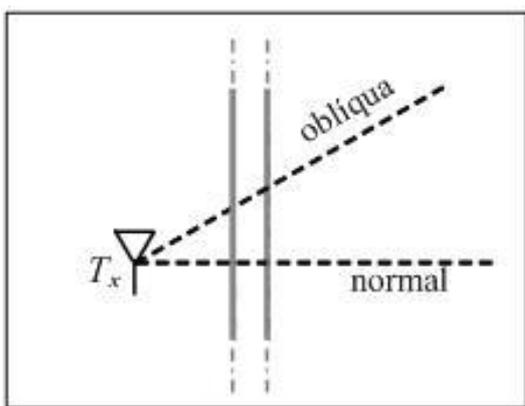


Fig.6. Rota de avaliação dos campos transmitidos

O cálculo utilizando o modelo proposto foi feito ao longo das linhas normal e oblíqua (rotas de avaliação dos campos).

Adicionalmente, fez-se também uma simulação utilizando um modelo FD-TD 2D, também desenvolvido no GRUCAD/UFSC e já validado. A comparação destes resultados (Traçado de Raios e FD-TD) é apresentada na Fig.7 (campos ao longo da linha normal) e na Fig. 8 (campos ao longo da linha oblíqua).

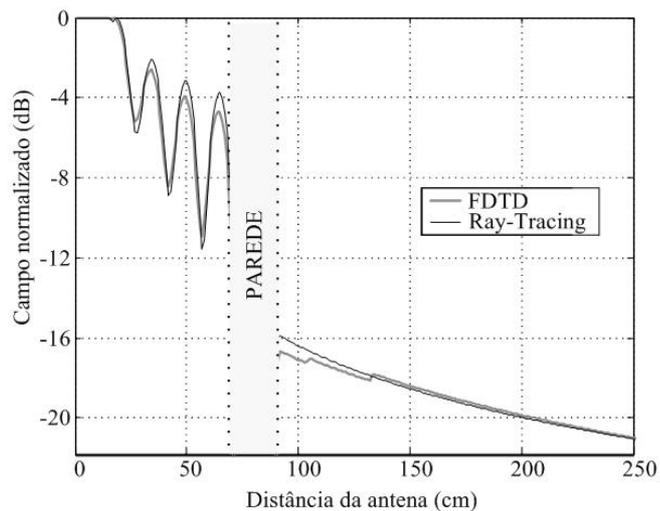


Fig.7. Comparação dos campos ao longo da linha normal.

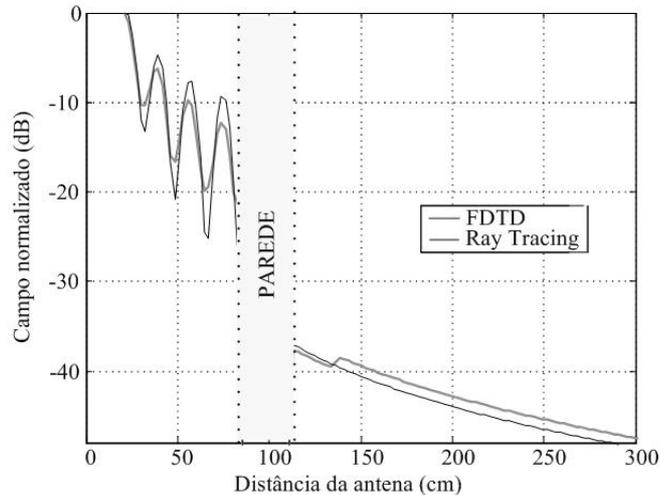


Fig.8. Comparação dos campos ao longo da linha oblíqua.

Observa-se que o comportamento do campo é corretamente descrito tanto quando a incidência da onda é normal à parede como em incidência oblíqua. Desta forma, a eficiência do procedimento de determinação dos percursos proposto pôde ser confirmada, já que os campos apresentam-se em concordância quando comparados com os valores calculados através do método FD-TD.

Mapeamento das potências recebidas em um ambiente interior prático

A principal aplicação do modelo implementado é no levantamento da distribuição de campos em ambientes interiores. Esta distribuição é obtida considerando-se sondas isotrópicas nos pontos de recepção. Com isso, utiliza-se uma malha de recepção (neste exemplo adotou-se 36 pontos por metro quadrado) e calcula-se a potência recebida em cada ponto.

O cenário analisado é um ambiente interior composto por 6 salas e dois corredores, com dimensão total de $39\text{m} \times 28\text{m}$.

Em uma primeira análise, utilizou-se uma antena transmissora (dipolo de meia onda) radiando uma potência EIRP = 30dBm posicionada no centro do ambiente. A Fig.9 ilustra o mapeamento das potências para este exemplo.

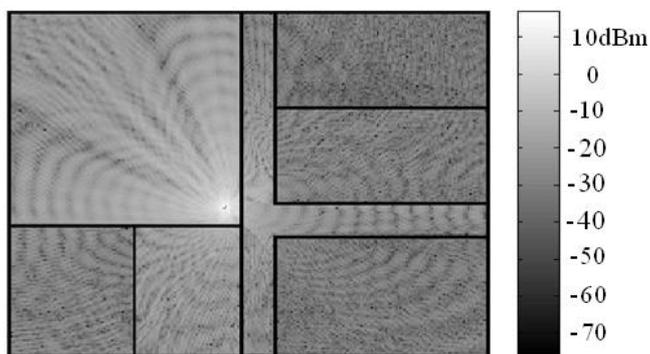


Fig.9. Mapeamento das potências recebidas para um posicionamento central da antena transmissora.

Em uma segunda análise, posicionou-se a antena no canto da sala, mas radiando a mesma potência do exemplo anterior (30 dBm). Os resultados apresentados na Fig.10 mostram que, neste caso, não há uma distribuição uniforme dos campos devido ao mau posicionamento da antena.

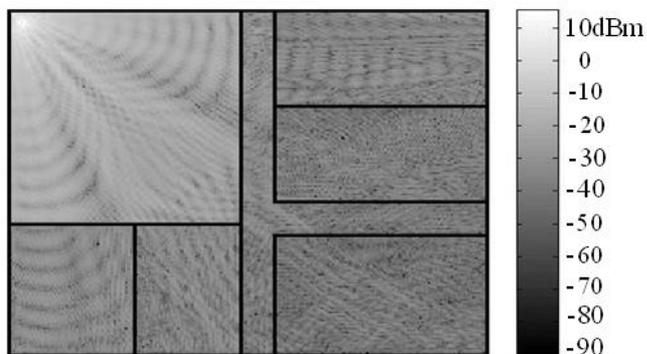


Fig.10. Mapeamento das potências recebidas para o posicionamento da antena transmissora num canto da sala.

Numa última análise, cujos resultados são mostrados na Fig.11, foram utilizadas duas antenas transmissoras radiando, cada uma, a metade da potência dos exemplos anteriores (ou seja, 27dBm cada uma). Não houve uma preocupação na otimização do posicionamento das antenas. Ainda assim, percebe-se uma melhora na uniformidade dos campos em relação ao caso anterior.

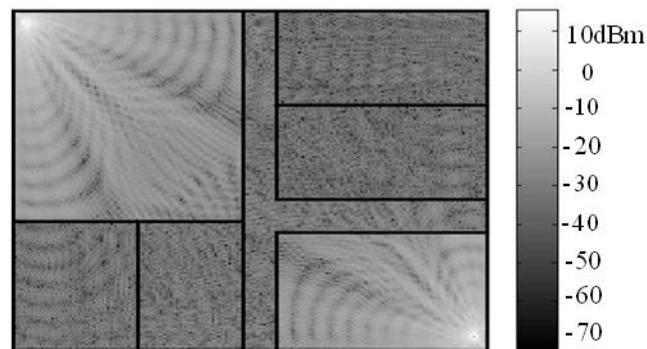


Fig.10. Mapeamento das potências recebidas para duas antenas transmissoras colocadas em cantos opostos da sala.

V CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um modelo de predição de campos utilizando a Técnica de Traçado de Raios baseada na IT. Um novo procedimento para a determinação do percurso dos raios transmitidos através de paredes, compatível com a IT, foi proposto e incluído no modelo.

Finalmente, foram apresentados alguns exemplos de aplicação deste modelo e sua validação através da comparação com resultados obtidos com o método FD-TD. Nestes exemplos, a análise da cobertura no interior dos cenários estudados foi feita através do mapeamento das potências.

REFERÊNCIAS

- [1] O. Gutiérrez, F. S. Adana, M. F. Cátedra, et al. *Ray-Tracing Techniques for Mobile Communications*, ACES Journal, v. 15, no. 3, p.209-231, Nov. 2000.
- [2] D. A. McNamara, C. W. I. Pistorius, J. A. Malherbe. *Introduction to the Uniform Theory of Diffraction*, Artech House, Boston, 1990.
- [3] R. P. Torres, L. Valle, M. Domingo, et al. *CINDOOR: An Engineering Tool for Planning and Design of Wireless Systems in Enclosed Spaces*, IEEE Antennas Propagat. Magazine, v. 41, p. 11-22, Aug. 1999.
- [4] S. R. Saunders. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, Wiley & Sons, 1999.
- [5] C. B. Balanis. *Advanced Engineering Electromagnetics*, Wiley & Sons, 1989.