

Um Algoritmo Eficiente para o Traçado de Raios na Predição de Cobertura Radioelétrica em Ambientes Urbanos

Daniela N. Schettino e Fernando J. S. Moreira

Universidade Federal de Minas Gerais, Depto. Engenharia Eletrônica
Av. Pres. Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, CEP 31270-901

Resumo— Este trabalho trata da predição de cobertura radioelétrica em ambientes urbanos através da Teoria Uniforme da Difração (UTD). Para tal foi desenvolvido um algoritmo baseado no método das imagens para traçar os raios refletidos e difratados em um ambiente *quasi*-3D. As múltiplas reflexões e difrações, utilizadas no cálculo do campo espalhado, são consideradas através da separação das componentes multipercurso em quatro classes de raios distintas. A utilização destas classes elimina cálculos redundantes no traçado de raios entre um transmissor e os diversos receptores utilizados para caracterizar a região de cobertura. Conjuntamente, diversas técnicas de aceleração foram implementadas, reduzindo consideravelmente o tempo de processamento.

Palavras-chave— Caracterização do canal rádio, propagação eletromagnética, teoria uniforme da difração, traçado de raios.

I. INTRODUÇÃO

A principal justificativa para a predição de cobertura radioelétrica é minimizar o custo de planejamento e implementação de um sistema rádio. A crescente demanda por comunicações móveis, especialmente em áreas urbanas, levou à adoção de microcélulas. No planejamento destas microcélulas, a consideração de modelos estatísticos para a predição de cobertura do sinal de rádio pode levar a erros consideráveis, fazendo-se necessária a adoção de técnicas mais precisas, como, por exemplo, técnicas determinísticas. Dentre estas técnicas, as baseadas na Teoria Uniforme da Difração (UTD) [1] vêm se destacando na solução deste tipo de problema [2],[3]. A UTD é uma técnica assintótica que utiliza o traçado de raios para determinar as trajetórias dos multipercursos entre transmissor e receptor.

De acordo com a UTD, o primeiro passo para se calcular o campo espalhado é a determinação geométrica das trajetórias dos raios que partem de uma dada fonte até o receptor. Existem basicamente duas abordagens para se realizar este traçado de raios através do canal rádio: uma baseada na Teoria das Imagens (IT - *Image Theory*) [2],[3] e outra na técnica SBR (*Shooting-and-Bouncing Ray*) [4], também conhecida como Método da Força Bruta. A IT é mais rigorosa do que a SBR pois é capaz de determinar rigorosamente todas as componentes de multipercurso, inclusive os raios difratados, sem re-

dundância. A IT utiliza imagens ópticas do transmissor e dos pontos de difração, considerando as superfícies como sendo refletoras. Apenas as trajetórias direta, refletidas e difratadas, com número máximo de reflexões igual a N_R e de difrações igual a N_D , são consideradas no presente trabalho. A UTD, então, é utilizada para avaliar a contribuição dos campos associados às respectivas trajetórias.

Para se obter a predição de cobertura em uma certa região, receptores são distribuídos em toda a área de interesse. O traçado de raios e a avaliação assintótica do campo espalhado são, então, determinados para cada um destes pontos de observação. Dependendo da quantidade de mecanismos de propagação considerados, do número de obstáculos e da área de cobertura, a determinação de todas as contribuições dos multipercursos pode ser um processo demorado.

Assim, o objetivo deste trabalho é a apresentação de uma técnica voltada para a minimização dos cálculos na avaliação do campo espalhado, onde as múltiplas reflexões e difrações são consideradas através da separação das trajetórias em quatro classes de raios distintas: transmissor-receptor ($T - R$), transmissor-ponto de difração ($T - D$), ponto de difração-ponto de difração ($D - D$) e ponto de difração-receptor ($D - R$). As trajetórias completas entre transmissor e receptor contendo múltiplas reflexões e difrações são então formadas através da concatenação dessas diversas classes, permitindo que trechos de trajetórias que aparecem diversas vezes não precisem ser recalculados, principalmente no caso da predição de cobertura através de uma grade de receptores. Em cada classe são consideradas apenas reflexões. Consequentemente, todas estas classes são obtidas através de um procedimento uniforme, prático do ponto de vista computacional. O procedimento de formação e utilização dessas classes será descrito na Seção II. Na Seção III será apresentado um resultado numérico ilustrando o programa implementado, destacando as vantagens obtidas com a utilização das classes no algoritmo de traçado de raios.

II. ALGORITMO DE TRAÇADO DE RAIOS

Nesta seção serão apresentadas as técnicas utilizadas para se realizar o traçado de raios em um ambiente bidimensional (2D). Primeiramente, serão descritos os procedimentos utilizados na determinação das múltiplas reflexões através da Teoria

das Imagens (IT). Serão descritos também os procedimentos para a determinação dos raios difratados. A formação das trajetórias completas entre transmissor e receptor, com múltiplas reflexões e difrações, serão apresentadas através da definição das diferentes classes de raios ($T - R$, $T - D$, $D - D$ e $D - R$). Por fim, é realizada a conversão das trajetórias 2D em trajetórias 3D, para a aplicação em modelos *quasi*-3D [5].

A descrição do ambiente aonde se realizará a predição de cobertura será feita através de um modelo aproximado. No caso de um ambiente urbano, esta simplificação pode ser feita através de uma representação 2D do cenário a ser analisado. Neste caso, os obstáculos do ambiente podem ser representados através de cilindros com seção reta arbitrária e arestas paralelas entre si. O ambiente é então representado através de um corte horizontal, como ilustra a Fig. 1.

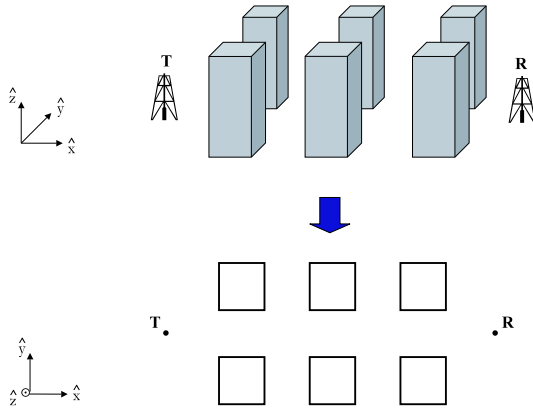


Fig. 1. Representação 2D de um ambiente urbano: corte horizontal.

A. Raios Refletidos

Para se determinar as trajetórias dos raios refletidos utilizou-se a IT [2],[3]. Nela, o transmissor (T) é refletido através dos vários obstáculos para se encontrar todos os caminhos ópticos até o receptor (R). Ou seja, a IT calcula as imagens de T geradas pelas diversas faces $\bar{S}$ que compõem os obstáculos. Em seguida, cada uma dessas diversas imagens passa por um processo semelhante ao do ponto original T . Ou seja, as imagens determinadas na iteração anterior são utilizadas como novas fontes para a iteração atual. O processo é sucessivamente aplicado a todas as imagens até um determinado número de iterações, dependente do número máximo de reflexões (N_R) a ser considerado [2],[3].

As imagens sucessivas de T são ordenadas em um esquema do tipo árvore hierárquica, ilustrada na Fig. 2. A raiz da árvore é T . O próximo nível é constituído pelas imagens de primeira ordem de T , geradas pelas diversas faces dos obstáculos. O segundo nível contém as imagens de segunda ordem (ou seja, as imagens das imagens de primeira ordem), e assim por diante. Cada fonte virtual é conectada à sua imagem geradora por um ramo, como mostra a Fig. 2. Os diversos índices ($i, j, k, \dots$) denotam as faces ($\bar{S}_i, \bar{S}_j, \bar{S}_k, \dots$) que geraram as imagens. Note que índices idênticos nunca aparecem juntos, já que a face que gera uma certa imagem não pode gerar a imagem desta.

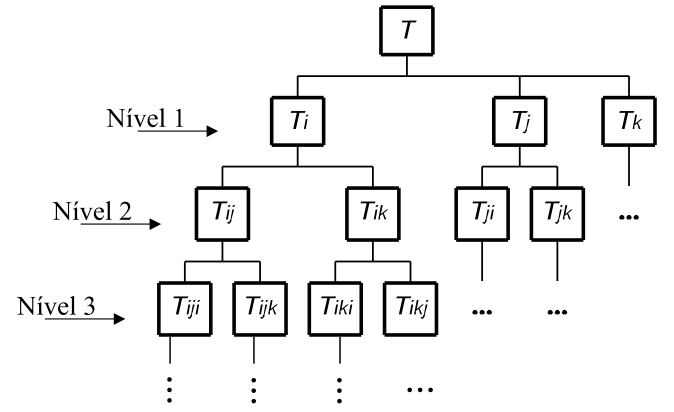


Fig. 2. Árvore hierárquica das imagens.

Vale ressaltar que nem todas as possíveis imagens chegam a ser armazenadas na árvore, já que nem todas as faces $\bar{S}$ dos obstáculos são refletoras em relação à fonte em questão. Além disso, foi utilizado um teste para a redução do número de imagens a serem armazenadas, que consiste na determinação da Região de Iluminação (RI) de uma fonte virtual [2],[3]. Este teste faz o descarte das faces que não se encontram dentro da RI da fonte virtual e que, consequentemente, não são capazes de gerar imagens de ordem superior desta fonte. O teste também prevê a eliminação das faces que se encontram dentro da RI mas que são completamente bloqueadas por outras mais próximas à fonte virtual. Tais testes tornam o procedimento de traçado de raios bastante eficiente, principalmente no caso de ambientes compostos por um número elevado de obstáculos [5].

Após a determinação de todas as imagens necessárias, procede-se à identificação dos pontos de reflexão correspondentes. Para ilustrar este processo, considere a Fig. 3, que ilustra a determinação de uma trajetória com duas reflexões. Primeiramente traça-se um segmento ligando o receptor R à imagem de segunda ordem T_{ij} (que é a imagem de T_i em relação a $\bar{S}_j$). Este segmento deve interceptar a face que deu origem a essa imagem de segunda ordem ($\bar{S}_j$). A interseção entre $\overline{T_{ij}R}$ e $\bar{S}_j$ localiza o ponto Q_2 aonde ocorre a segunda reflexão. Para a localização de Q_1 , traça-se um segmento ligando Q_2 à imagem de primeira ordem T_i . Tal segmento deve necessariamente interceptar a face $\bar{S}_i$ que deu origem a essa imagem para que a trajetória seja válida. Esta interseção localiza, então, o ponto onde ocorrerá a primeira reflexão (Q_1). Com isso, identificamos uma possível trajetória que sofre duas reflexões, percorrendo o seguinte trajeto: $T \rightarrow Q_1 \rightarrow Q_2 \rightarrow R$ (Fig. 3). Caso Q_1 ou Q_2 não estejam sobre as respectivas faces ($\bar{S}_i$ e $\bar{S}_j$), a trajetória é descartada.

Finalmente, para que a trajetória seja realmente válida, basta verificar se os segmentos $\overline{TQ_1}$, $\overline{Q_1Q_2}$ e $\overline{Q_2R}$ não são obstruídos pelas demais faces $\bar{S}_k$ que representam os obstáculos do ambiente. Esta verificação de obstrução pode ser implementada de maneira eficiente através de técnicas de aceleração, como a técnica da Partição Volumétrica Espacial (SVP-Space Volumetric Partition) [6].

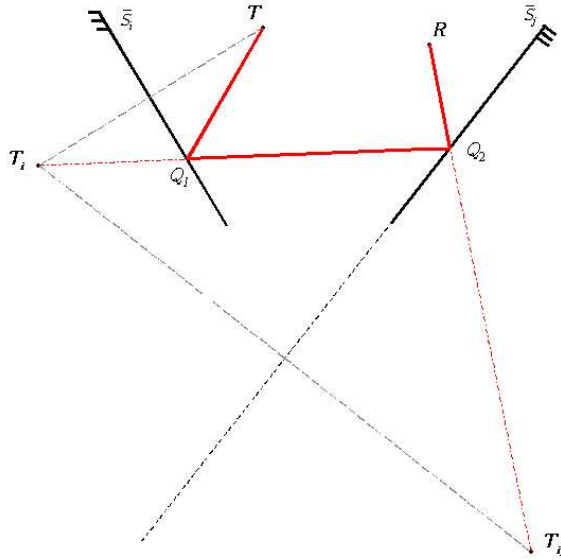


Fig. 3. Identificação de pontos de reflexão através da Teoria das Imagens.

O procedimento para se identificar os pontos de reflexão é feito para todas as imagens armazenadas na árvore. As imagens do primeiro nível poderão gerar trajetórias entre T e R com uma reflexão; as do segundo nível, raios com duas reflexões, e assim por diante. Para um número máximo de N_R reflexões, deve-se montar a árvore de imagens até o N_R -ésimo nível.

Finalmente, note que o processo é idêntico no caso do observador ser um ponto de difração (D). Ou seja, o procedimento discutido anteriormente serve tanto na construção das classes $T - R$ como na das classes $T - D$.

B. Raios Difrattados

A inclusão dos efeitos da difração é extremamente importante quando existe desvanecimento pronunciado na região onde se quer determinar o nível de potência [3]–[6]. Para a inclusão dos mecanismos de difração, deve-se inicialmente identificar a localização dos pontos de difração nas arestas dos obstáculos que compõem o ambiente do canal rádio. Como se adotou uma descrição 2D do ambiente, tais arestas são representadas pelos pontos comuns aos segmentos adjacentes que descrevem as faces dos obstáculos. Consequentemente, estes são os próprios pontos de difração no modelo 2D.

Após a localização dos pontos de difração (aqui representados por D), cada um deles será tratado como uma fonte transmissora. Em seguida, constrói-se uma árvore de imagens para cada uma destas fontes, exatamente da maneira como realizado para T (Seção II-A). A única diferença é que os segmentos adjacentes associados à aresta onde ocorre a difração não geram imagem de primeira ordem.

Para a criação da árvore de imagens de um ponto D , primeiramente determinam-se as faces dos obstáculos que estão dentro da região de visibilidade de D , de forma semelhante ao teste da Região de Iluminação (RI) abordado na Seção II-A [2],[3]. Essa região de visibilidade é delimitada pelas faces que formam a aresta de difração. Entre as faces contidas nesta

região, apenas as que tiverem sua porção refletora voltada para o ponto D são consideradas na construção do primeiro nível da árvore de imagens. O processo para a determinação das imagens de ordem superior de D (até o N_R -ésimo nível), considerando a RI de cada imagem, é exatamente aquele utilizado no cálculo das imagens de ordem superior de T (veja Seção II-A). A determinação de possíveis obstruções nas trajetórias também é feita através da técnica SVP [6].

As imagens dos pontos D são então utilizadas para traçar os raios que saem destes pontos, sofrem múltiplas reflexões (ou nenhuma) e chegam ao receptor R (classe $D - R$) ou a um ponto de difração D (classe $D - D$), que pode inclusive ser o mesmo ponto de partida. Vale ressaltar que, uma vez determinadas as trajetórias entre dois pontos de difração $D_i - D_j$, as trajetórias entre $D_j - D_i$ são automaticamente obtidas pelo caminho inverso da trajetória entre D_i e D_j , sem a necessidade de se repetir o processo de traçado de raios para este par.

C. Classes de Raios

O procedimento para a determinação dos multipercursos entre T e R , considerando-se múltiplas reflexões e difrações, consiste primeiramente na separação das trajetórias em quatro classes de raios distintas ($T - R$, $T - D$, $D - D$ e $D - R$), onde cada classe só contém raios refletidos entre os pontos correspondentes. Após a determinação das trajetórias pertencentes a cada uma destas classes, como discutido nas Seções II-A e II-B, realizam-se diversas concatenações entre estas classes para a obtenção de todas as possíveis trajetórias entre T e R , até o limite de N_R reflexões ou N_D difrações.

As trajetórias entre T e R que não passam por nenhum ponto de difração são obtidas diretamente dos raios armazenados na classe $T - R$, a qual contém também o raio direto. Para as trajetórias envolvendo uma única difração, deve-se considerar inicialmente os raios que partem de T e chegam a um determinado ponto de difração D_i , ou seja, considerar uma trajetória pertencente à classe $T - D$. Finalmente, considera-se uma trajetória partindo de D_i e chegando em R , contida na classe $D - R$. Para trajetórias com mais de uma difração, deve-se concatenar um ou mais elementos da classe $D - D$ entre elementos das classes $T - D$ e $D - R$, de tal forma que o último ponto D de uma classe seja exatamente o primeiro da classe imediatamente a seguir. Por exemplo, para uma trajetória com três difrações, inicia-se por um elemento da classe $T - D$, concatena-se em sequência dois elementos da classe $D - D$, e finalmente concatena-se um elemento da classe $D - R$, sempre com pontos D em comum entre classes adjacentes. A Fig. 4 ilustra um caso onde uma trajetória da classe $T - D$ e outra da classe $D - D$ aparecem em multipercursos distintos—no caso, em particular, para receptores distintos. Tal repetição pode, inclusive, ocorrer para um mesmo receptor R .

Assim que todas as combinações possíveis entre as classes forem efetuadas, até o limite de N_R reflexões e N_D difrações, o procedimento de traçado de raios 2D estará concluído. A seguir é apresentada a conversão das trajetórias 2D em 3D, utilizadas no modelo *quasi*-3D.

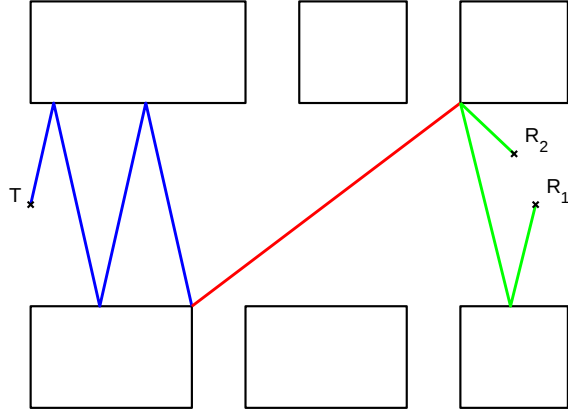


Fig. 4. Trajetórias para dois receptores distintos, com raios comuns pertencentes às classes $T - D$ e $D - D$.

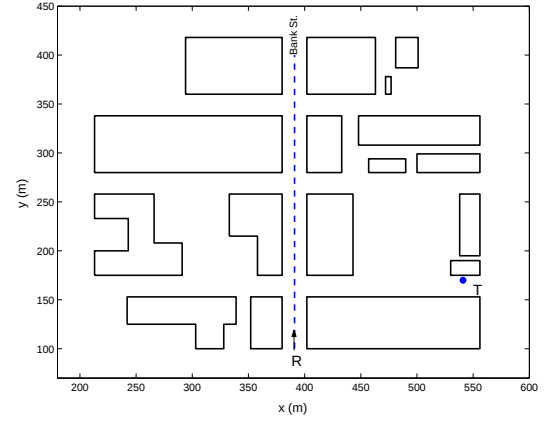


Fig. 5. Configuração de uma região da cidade de Ottawa. Observação ao longo da Bank St.

D. Conversão das Trajetórias 2D em 3D

No presente trabalho adotou-se uma representação *quasi*-3D para o modelamento do ambiente [5]. Neste modelo, as alturas das antenas são assumidas muito menores do que as alturas dos obstáculos, de forma que difrações e reflexões nos topos dos obstáculos tenham efeitos desprezíveis. O solo é considerado plano, de tal modo que as arestas verticais dos obstáculos sejam todas perpendiculares ao solo, e, conseqüentemente, paralelas entre si. Nestas condições, o modelo *quasi*-3D considera a reflexão no solo simplesmente aplicando-se o conceito de imagem no receptor (ou transmissor). Assim, haverá sempre uma trajetória de T até R (sem reflexão no solo) associada a outra de T até a imagem de R . Consequentemente, ambas trajetórias possuirão a mesma projeção no plano do solo, previamente determinadas pelas técnicas 2D. Logo, as trajetórias são inicialmente determinadas através do modelo 2D apresentado anteriormente (Fig. 1), assumindo transmissor e receptor com as mesmas alturas. Em seguida, cada trajetória 2D dará origem a duas 3D, onde uma delas refere-se à reflexão no solo. A conversão das trajetórias 2D em 3D é feita com o auxílio das distâncias percorridas ao longo das trajetórias 2D e as alturas das antenas em relação ao solo, como descrito em [5].

III. RESULTADOS

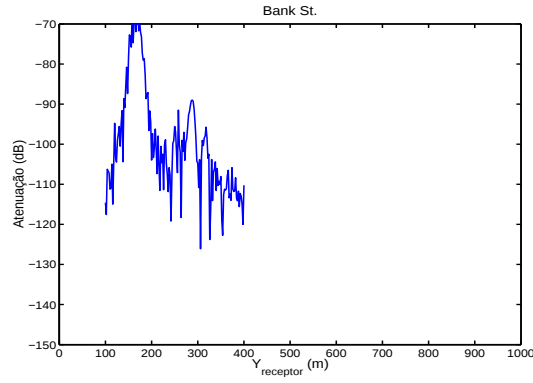
Nesta seção serão apresentados resultados obtidos através da técnica de UTD implementado, referentes à predição de cobertura em uma região da cidade de Ottawa, Canadá, representada na Fig. 5. Esta figura indica também a posição do transmissor e dos receptores, de acordo com [7]. O traçado de raios considerou $N_R = 5$ e $N_D = 2$ (caso *quasi*-3D). A excitação foi realizada através de um dipolo de Hertz verticalmente polarizado, em 910 MHz. Como sugerido em [8], foram adotados os seguintes valores para as características elétricas dos obstáculos: permissividade relativa $\epsilon_r = 7$ e condutividade $\sigma = 0,2$ S/m. Para o solo, $\epsilon_r = 15$ e $\sigma = 0,05$ S/m. A Fig. 6(a) ilustra a atenuação predita, a qual apresenta discordâncias máximas de aproximadamente 10 dB em alguns pontos específicos quando comparada às medições apresentadas em [7] (reproduzidas aqui na Fig. 6(b)).

Na predição de cobertura, uma grade de receptores é definida sobre a região de interesse, mantendo-se o transmissor fixo. Nestas condições, todos os elementos das classes $T - D$ e $D - D$ só precisam ser determinados uma única vez, otimizando enormemente o tempo de processamento do traçado de raios. No exemplo analisado (Figs. 5 e 6), foram utilizados 150 receptores (um a cada 2 m). Na primeira simulação (primeiro ponto de recepção), todas as 4 classes são calculadas. A partir do segundo receptor, somente as classes $D - R$ e $T - R$ precisam ser recalculadas. Com isso, o tempo de processamento para cada novo receptor (a partir do segundo) é aproximadamente 3 vezes menor do que o do primeiro.

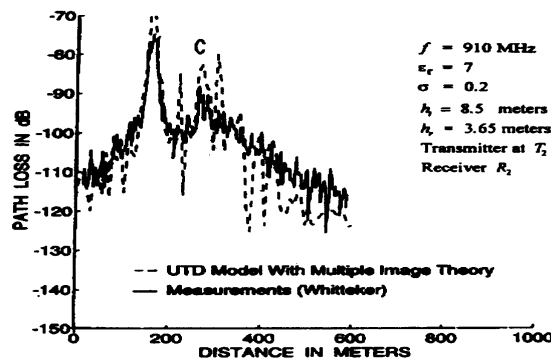
Vale ainda ressaltar que o cálculo das trajetórias através destas classes faz com que os elementos pertencentes a cada uma, que podem aparecer diversas vezes em trajetórias distintas (veja a Fig. 4), só precisem ser determinados e armazenados uma única vez. Para demonstrar a relevância de tal fato, a Fig. 7 mostra quantas vezes trajetórias pertencentes às classes $T - D$, $D - D$ e $D - R$ são utilizadas para o receptor na posição (391 m, 100 m) na configuração ilustrada pela Fig. 5. Os gráficos da Fig. 7 indicam o percentual do total de raios que foram utilizados, dentro de cada classe.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um algoritmo eficiente de traçado de raios através da divisão das trajetórias em quatro classes distintas ($T - R$, $T - D$, $D - D$ e $D - R$), permitindo uma otimização do tempo para a predição de cobertura baseada na UTD. Com a utilização destas classes, diversas trajetórias que aparecem repetidas vezes em multipercursos distintos não precisam ser reavaliadas. Além disso, na caracterização de cobertura através de uma grade de receptores, as trajetórias das classes $T - D$ e $D - D$ só precisam ser determinadas uma única vez, desde que o transmissor seja fixo. A construção de cada classe é feita através de um procedimento uniforme, que utiliza a Teoria das Imagens e diversas técnicas de aceleração disponíveis na literatura aberta. Um enlace prático foi analisado e as comparações com medições indicaram discrepâncias máximas de 10 dB, mesmo não tendo sido considerada a *slope diffraction*.



(a) Atenuação predita pela UTD em receptores ao longo da Bank St., com transmissor na posição (541 m, 170 m).

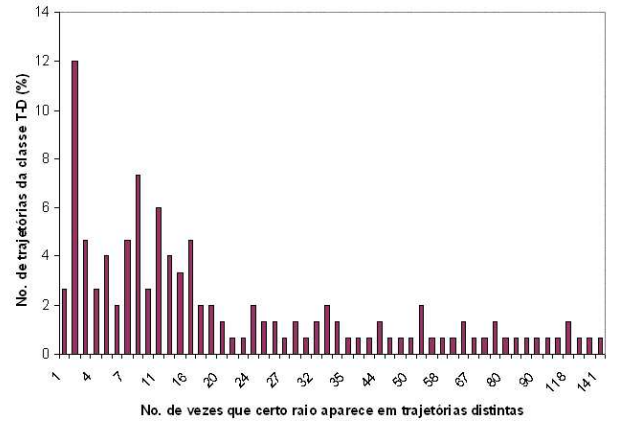


(b) Atenuação ao longo da Bank St.: medições e UTD (Fig.4 da Ref. [8]).

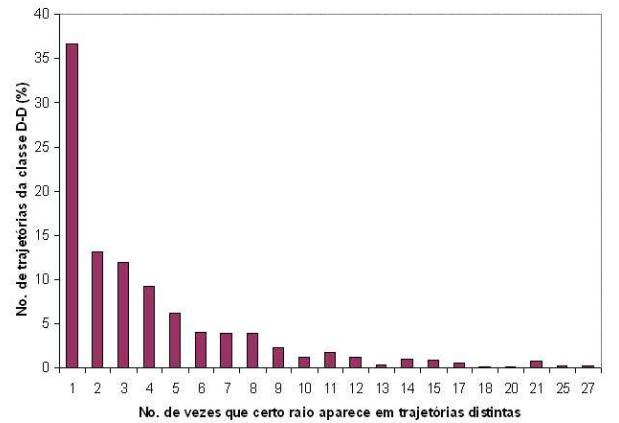
Fig. 6. Atenuação ao longo da Bank St.

REFERÊNCIAS

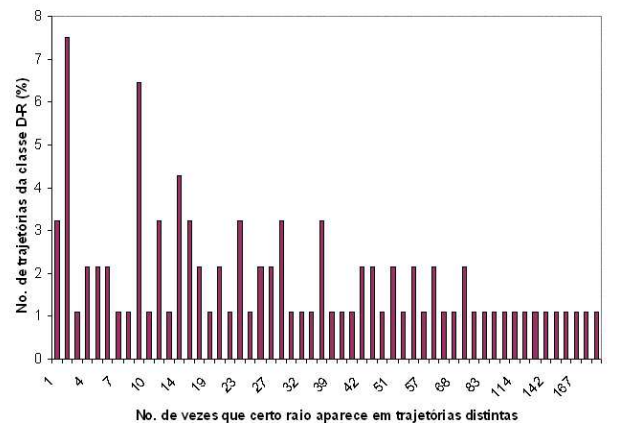
- [1] R. F. Kouyoumjian and P. H. Pathak, "A uniform geometrical theory of diffraction for an perfectly conducting surface," *Proc. IEEE*, vol. 62, pp. 1448-1461, Nov. 1974.
- [2] M. C. Lawton and J. P. McGeehan, "The application of a deterministic ray launching algorithm for the prediction of radio channel characteristics in small-cell environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, pp. 955-969, Nov. 1994.
- [3] K. Rizk, J.-F. Wagen, and F. Gardiol, "Two-dimensional ray-tracing modeling for propagation prediction in microcellular environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 46, pp. 508-518, May 1997.
- [4] G. Liang and H. L. Bertoni, "A new approach to 3-D ray tracing for propagation prediction in cities," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 46, pp. 853-863, Jun. 1998.
- [5] H.-W. Son and N.-H. Myung, "A deterministic ray tube method for microcellular wave propagation prediction model," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, pp. 1344-1350, Aug. 1999.
- [6] M. F. Catedra, J. Perez, F. S. Adana, and O. Gutierrez, "Efficient ray-tracing techniques for three-dimensional analyses of propagation in mobile communications: application to picocell and microcell scenarios," *IEEE Antennas Propagat. Magazine*, vol. 40, pp. 15-28, Apr. 1998.
- [7] J. H. Whitteker, "Measurements of path loss at 910 MHz for proposed microcell urban mobile systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 37, pp. 125-129, Aug. 1988.
- [8] S. Y. Tan and H. S. Tan, "Propagation model for microcellular communications applied to path loss measurements in Ottawa City streets," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 44, pp. 313-317, May 1995.



(a) Classe $T - D$



(b) Classe $D - D$



(c) Classe $D - R$

Fig. 7. Número de vezes que raios das classes $T - D$, $D - D$ e $D - R$ são utilizados, para um receptor localizado na posição (391 m, 100 m) da Fig. 5.