

Simulador de Traçado de Raios 3D para Caracterização de Canais Rádio-Móvel

André Mendes Cavalcante, João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa
Universidade Federal do Pará, Av. Augusto Corrêa 01, Belém-PA, Brasil.

Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante
Universidade Federal do Pará, Av. Augusto Corrêa 01, Belém-PA, Brasil.

Resumo — Um simulador tridimensional (3D) de traçado de raios para caracterização de canais rádio-móvel é apresentado. A teoria eletromagnética adotada pelo simulador é baseada na UTD e o método para o traçado dos raios é baseado na Teoria das Imagens (IT). A caracterização do canal rádio-móvel é feita através das predições da perda de potência e de parâmetros de dispersão temporal do canal. Para validação do modelo adotado pelo simulador, dois exemplos de aplicação foram gerados, um para ambiente *outdoor* e outro para um ambiente *indoor* simples. Comparações entre os resultados preditos pelo simulador e por medidas mostram uma boa concordância geral. Simulações das características de dispersão do canal também foram realizadas.

Palavras Chaves — Traçado de raios, modelo de propagação, teoria das imagens, teoria uniforme da difração, medidas.

I. INTRODUÇÃO

A principal justificativa para a caracterização de canais rádio-móvel é minimizar o custo de planejamento e de implementação de um sistema rádio [1]. Em sistemas móveis celulares, uma eficiente predição de cobertura favorece ao uso eficiente do espectro de frequência, sendo este um aspecto chave para dar vazão ao aumento expressivo da densidade de usuários experimentada por tais sistemas nos últimos anos [2].

Atualmente também vem ocorrendo a migração dos tradicionais rádios analógicos e sistemas de TV por radiodifusão para os novos sistemas digitais, que prometem melhorar a resposta em frequência, aumentando o conteúdo de informação e melhorando a imunidade ao ruído. A cobertura de sistemas de radiodifusão analógicos tem sido usualmente predita pela intensidade de campo média (potência média) disponível em um dado ponto receptor, junto com outras estatísticas de variabilidade temporal e espacial para contabilizar os efeitos de desvanecimento e incertezas da predição. Esta é uma aproximação simples e razoável usada para predição do desempenho do sistema, apesar de alguns efeitos prejudiciais do canal como a distorção por multipercurso em sistemas FM e imagens secundárias em sistemas de TV não poderem ser preditos com simples modelos de nível de sinal. Quando comparados com os sistemas analógicos, os sistemas digitais são mais sensíveis à degradação do canal na forma de distorção por multipercurso e desvanecimento [3]. Estes efeitos de

degradação podem resultar que bits de dados possam ser decodificados com erros. Se a taxa de erro de bits (BER) for grande, a correção de alguns ou de todos os quadros de dados se torna impossível, resultando em uma completa perda do conteúdo de informação transmitida. Pode-se mostrar que em um sistema de comunicação digital, a degradação por multipercurso é um indicador mais crítico do desempenho global do sistema que a relação sinal-ruído (SNR). Pois, algumas características relevantes do ambiente de propagação podem variar com o tempo (movimentos de carros, aviões, etc.), sendo que a resposta do canal em uma dada localização não pode ser considerada estática, o que demandará de um grande desempenho dos equalizadores na recepção para contornar esta não estacionariedade [3]. Estes efeitos de dispersão por multipercurso e desvanecimento do canal podem ser caracterizados com o uso das técnicas de traçado de raios, favorecendo ao projetista desses sistemas ao uso correto de técnicas para eliminação ou minimização destes efeitos prejudiciais do canal.

Neste trabalho é apresentado um simulador tridimensional (3D) de traçado de raios chamado RT-SIMULATOR capaz de realizar a caracterização de canais rádio-móvel. Na Seção II são apresentadas as principais características do simulador, como detalhes sobre a caracterização do cenário (ambiente), das antenas, do tratamento geométrico e eletromagnético dos raios, e por fim, dos modos de análises disponibilizados pelo simulador. Alguns resultados numéricos são apresentados na Seção III, onde alguns aspectos dos resultados são discutidos.

II. CARACTERÍSTICAS DO RT-SIMULATOR

O simulador RT-SIMULATOR foi desenvolvido na linguagem de programação DelphiTM 6.0 (*Object Pascal*). Suas rotinas foram todas desenvolvidas baseadas no paradigma da orientação à objetos. Sua interface com o usuário é bem amigável, sendo totalmente baseada em janelas. As rotinas gráficas de visualização foram desenvolvidas com o auxílio da biblioteca gráfica OpenGL. Os detalhes sobre as características técnicas do simulador RT-SIMULATOR serão descritos a seguir:

A. Representação dos Cenários

O cenário no simulador pode ser representado por um arquivo no formato DXF (formato usado para intercâmbio de dados entre programas CAD) ou por um arquivo no formato

* UFPA, Av. Augusto Corrêa, 01, Belém-PA, Brasil, tel: +55-91-2111302, Fax: +55-91-2111634, A. M. Cavalcante, amc@ufpa.br, G. P. S. Cavalcante, gervasio@ufpa.br, J. C. W. C. A. Costa, jweyl@ufpa.br. Este trabalho foi financiado pelo Convênio ERICSSON/AMCEL/UFPA.

SCE (formato proprietário). Uma limitação intrínseca da representação no formato DXF é de fornecer apenas uma descrição geométrica do cenário (localização e dimensão dos obstáculos), necessitando de um pós-processamento adicional para a inserção da descrição morfológica (propriedades elétricas das faces do cenário). Porém, um pós-processamento automático não é trivial, pois neste formato é difícil individualizar de uma forma automática as faces do cenário. Uma solução simplista usada pelo simulador para minimizar este problema é considerar que todas as faces do cenário apresentam as mesmas propriedades elétricas (definidas pelo usuário no simulador). Apesar do formato DXF apresentar a vantagem do cenário poder ser definido em qualquer programa CAD comercial, a questão das propriedades elétricas limita muito o seu uso, visto a grande diversidade de materiais existentes nos ambientes móveis de interesse. Adicionalmente, arquivos neste formato contêm muita informação de interesse apenas para programas CAD, o que deixa os arquivos carregados de informações redundantes. O outro formato suportado pelo simulador é o SCE, que foi desenvolvido para suprir as limitações apresentadas pelo formato DXF, representando o cenário de uma forma simples, porém completa. Este novo formato representa o cenário por blocos, sendo cada bloco individualizado por suas propriedades elétricas e geométricas. Os cenários neste formato são gerados por um ambiente computacional chamado RT-CAD, também desenvolvido pelos autores. O ambiente de desenvolvimento do RT-CAD é mostrado na Fig.1 e a visualização do cenário carregado pelo RT-SIMULATOR é mostrado na Fig.2:

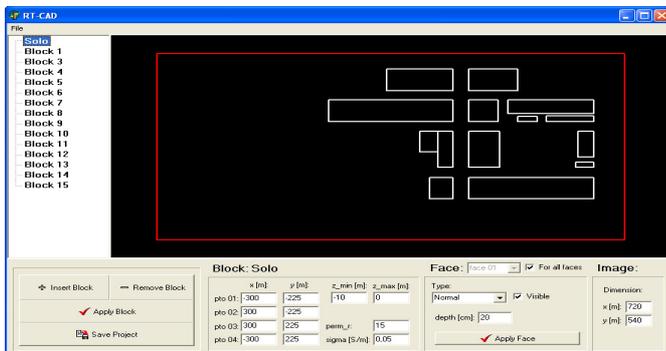


Fig. 1. Ambiente de Desenvolvimento do RT-CAD.

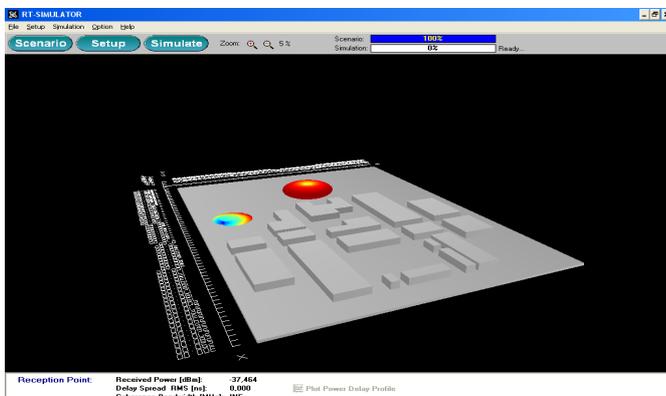


Fig. 2. Cenário carregado pelo RT-SIMULATOR no formato SCE.

No formato de arquivo de cenário desenvolvido (*.SCE), as faces isoladas não são individualizadas morfológicamente, e sim o sólido da qual elas fazem parte. Isto simplifica em muito o formato tornando a base de dados do cenário menos carregada de informações.

B. Caracterização das Antenas

As antenas no simulador são definidas basicamente por seus diagramas de radiação, por suas polarizações e por suas disposições no espaço 3D. Detalhes sobre a inserção dessas informações no simulador serão descritos a seguir:

1) *Diagrama de Radiação*: Nas técnicas de traçado de raios 3D, um dos parâmetros de entrada fundamental das antenas usadas nas simulações é seu diagrama de radiação 3D. Quando se adotam antenas de referência (eg. isotrópica, dipolo de meia-onda), os respectivos diagramas de radiação já são bem definidos no espaço tridimensional, apresentando formulações fechadas, porém, quando o objetivo é avaliar uma situação real de um sistema *wireless* operacional, antenas comerciais não possuem tais características, sendo apenas fornecidos pelos fabricantes os seus diagramas nos planos vertical e horizontal. Neste caso, é necessário o uso de algum método de interpolação para a geração do diagrama 3D dessas antenas. No simulador, o diagrama de radiação pode ser definido por um conjunto de antenas padrões (e.g. isotrópica, omni-direcional e dipolo de meia-onda) ou por um arquivo de diagrama de radiação no formato PlanetTM (*.MSI), distribuído pelos principais fabricantes de antenas. No caso do uso de arquivos MSI, o simulador usa um método de interpolação simples e eficiente descrito em [4] que fornece uma boa aproximação. Em [4] mostra que o erro médio absoluto cometido ao se usar este método para uma antena dipolo de meia-onda é de 1,6 dB e para um arranjo uniforme de dois dipolos é de 1,8 dB.

2) *Polarização*: Outro parâmetro de entrada fundamental das antenas é sua polarização. No simulador as características de polarização das antenas devem ser fornecidas pelo usuário, i.e. tipo de polarização (linear, circular e elíptica), diferença de fase entre as componentes do campo elétrico E_θ e E_ϕ e ângulo de *tilt* de polarização [5]. Quando as polarizações das antenas transmissora (Tx) e receptora (Rx) não forem iguais, haverá um descasamento de polarização (*polarization mismatch*), ou comumente chamado de efeito de despolarização (*depolarization effect*). A parcela de potência extraída pela antena receptora do sinal (raio) incidente não será máxima por causa das perdas por despolarização (*polarization loss*) associadas a esse efeito. A perda por despolarização é calculada pelo simulador através de um fator de perda (*polarization loss factor*) PFL definido em [5]. Em geral, equipamentos comerciais típicos fazem uso de antenas com diferentes tipos polarização, para combater os efeitos de desvanecimento. Então, a consideração do efeito por despolarização trará melhores resultados se comparados com medidas reais geradas por tais equipamentos.

3) *Rotação*: A última informação das antenas usadas na simulação a ser fornecida para o simulador é a disposição tridimensional no espaço das mesmas. O usuário deve inserir a rotação em graus nos três eixos (x , y e z) e poderá visualizar o efeito dessa rotação nos diagramas de radiação na tela principal do simulador, conforme mostrado na Fig.2.

C. Tratamento Geométrico dos Raios

Existem basicamente duas abordagens para se realizar o traçado de raios através do canal de rádio: uma baseada na Teoria das Imagens (IT – *Image Theory*) [1],[2] e outra na técnica SBR (*Shooting-and-Bouncing Ray*) [6], também conhecida como Força Bruta. Embora a IT seja limitada a cenários (ambientes) relativamente simples, ela é mais rigorosa do que a SBR no sentido da determinação das trajetórias dos raios, pois é capaz de determinar exatamente todas as componentes de multipercurso, inclusive os raios difratados, sem redundância [1]. Embora a IT seja uma técnica intrinsecamente destinada a determinação de percursos de raios refletidos, os raios difratados podem ser incorporados a IT por meio de algoritmos de busca por pontos de difração [2]. O RT-SIMULATOR adota a Teoria das Imagens (IT) juntamente com os algoritmos de busca por pontos de difração para calcular os percursos dos raios referentes aos mecanismos de reflexão e difração, respectivamente.

Na busca por pontos de reflexão baseada na IT, o transmissor (Tx) é refletido através dos vários obstáculos para se encontrar todos os caminhos ópticos até o receptor (Rx). Ou seja, a IT calcula as imagens de Tx geradas pelas diversas faces que compõem os obstáculos. Em seguida, cada uma dessas diversas imagens é utilizada como novas fontes, repetindo o processo anterior. O processo é sucessivamente aplicado até um determinado número de iterações, dependente do número máximo de reflexões estipulado [1]. As imagens sucessivas a Tx são então ordenadas em um esquema hierárquico denominado de árvore de imagens, que é na verdade, uma árvore de possíveis percursos entre o Tx e o Rx. Para cada provável percurso testes adicionais devem ser feitos para confirmar a existência ou não de um determinado percurso. O RT-SIMULATOR usa várias técnicas para tornar a árvore de imagens mais otimizada possível.

Os algoritmos de busca por pontos de difração são determinados diretamente das equações vetoriais que regem o mecanismo (difração simples e dupla). A dificuldade maior consiste na determinação de pontos de difração dupla, onde algum método numérico deve ser implementado para resolver a equação vetorial de duas variáveis. O RT-SIMULATOR adota como solução o método de Newton [2].

D. Tratamento Eletromagnético

A análise eletromagnética é realizada usando a Teoria Uniforme da Difração (UTD). O uso da UTD se justifica por ela ser do ponto de vista prático, a técnica que melhor combina precisão com eficiência computacional [2]. No simulador são incluídos mecanismos de primeira ordem (raio

direto, reflexão simples e difração simples), mecanismos de acoplamento de segunda ordem (reflexão dupla e difração dupla) e mecanismos de múltiplas ordens (reflexão múltipla). O campo total em um ponto de observação é obtido pela soma coerente dos campos de todos os mecanismos de acoplamento considerados.

Os coeficientes de reflexão adotados são os coeficientes de Fresnel [2] e os de difração são os coeficientes heurísticos descritos em [7].

E. Parâmetros de Dispersão Temporal do Canal

Para efeito de comparação de diferentes canais rádio-móvel e desenvolver um guia geral para projeto de sistemas *wireless*, alguns parâmetros são utilizados na caracterização destes, sendo úteis para que se quantifique o canal para estimativa de desempenho. Dentre os parâmetros mais utilizados têm-se:

1) *Perfil de Retardos de Potência (Power Delay Profile)*: O gráfico que mostra cada componente significativa de multipercurso, sua potência e o instante de tempo de chegada é denominado perfil de retardos de potência (*power delay profile*). A partir do perfil de retardos, pode-se extrair alguns parâmetros importantes para a caracterização da dispersão temporal do canal, tais como [8],[9]:

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

2) *Banda de Coerência (Coherence Bandwidth)*: A banda de coerência é uma medida estatística da faixa de frequências na qual um canal atual de forma igual (uniforme) ou, ao menos, de forma muito próxima à igualdade, sobre todas as frequências de um sinal através dele transmitido. A forma de definição da banda de coerência não é única, mas é comumente relacionada a parâmetros de dispersão temporal do sinal. Se for definida como a banda na qual a função de correlação entre as frequências está acima de 90% (0,9), a banda de coerência é dada, aproximadamente, por [8]:

$$B_c = \frac{1}{50\sigma_\tau} \quad (1)$$

onde σ_τ = espalhamento temporal rms [s].

Se a definição é menos rígida, de forma que a banda de coerência seja definida para a faixa de frequências com correlação superior a 50% (0,5) apenas, a definição fica [8]:

$$B_c = \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (2)$$

Não existe um relacionamento exato entre a banda de coerência e o espalhamento temporal rms, sendo as relações (1) e (2) estimativas empíricas. Como foram obtidas empiricamente, muitas vezes tais relações não são observadas na prática, sendo citadas no texto apenas para ilustrar, de forma qualitativa, a variação na banda de coerência conforme

a correlação estipulada. Em geral, técnicas de análise espectral e simulações são necessárias para determinar o impacto que a variação temporal do multipercursos exerce sobre o canal rádio [8].

Um conceito muito ligado à banda de coerência é o de seletividade. A seletividade nada mais é que o tratamento diferenciado que o canal impõe a faixas de frequências distintas, por não ter o comportamento plano em todas as frequências de interesse. Quando a faixa do sinal a ser transmitido é menor que a banda de coerência do canal, o sistema é denominado *faixa estreita*. O sinal será pouco afetado pela seletividade do multipercursos, não sendo necessário o uso de equalizadores para mitigar este problema. Por outro lado, se a faixa do sinal é maior que a banda de coerência do canal, o sistema é chamado *faixa larga*. Portanto, o sinal será muito afetado pela seletividade do canal [8], limitando assim, em sistemas digitais, a taxa máxima de dados que podem ser transmitidos nesse canal, sendo necessário então, o uso de equalizadores apropriados.

F. Modos de Recepção

O simulador apresenta três modos de análise:

1) *Ponto de Recepção*: Neste modo de recepção, o usuário deverá localizar o receptor em um único ponto. O simulador executará a simulação apenas para este ponto. Este tipo de análise é ideal para avaliar sistema ponto-a-ponto. Os parâmetros determinados pelo simulador para este tipo de recepção são: Potência recebida [dBm], Espalhamento Temporal RMS (*Delay Spread rms*) [ns] e Banda de Coerência [MHz], além de gerar graficamente os raios entre o Tx e Rx.

2) *Percurso de Recepção*: Neste modo, o usuário deverá fornecer o ponto inicial e final de um percurso. O simulador criará uma linha reta ligando estes dois pontos e executará a simulação apenas nos pontos sobre este percurso (nº de pontos sobre o percurso dependerá da resolução adotada). Neste tipo de análise, o simulador gera os seguintes gráficos em função do percurso realizado: Perda de percurso [dB], Potência recebida total [dBm] e Potência recebida de cada mecanismo de acoplamento (raio direto, reflexão e difração simples e difração dupla) [dBm].

3) *Malha Recepção*: Neste modo de recepção, o usuário criará uma malha de recepção em alguma área do cenário. O simulador executará a simulação em todos os pontos sobre esta malha (o nº de pontos na malha dependerá da resolução adotada) criando um diagrama de interferências sobre a mesma. A função de cores deste diagrama e sua relação com a intensidade de campo em dBm é mostrada em uma legenda apropriada. Para melhor visualização dos resultados gerados pelo simulador, são permitidos a rotação e *zoom* do cenário. Um exemplo gerado pelo simulador para este tipo de análise é mostrado na Fig.3, onde a antena Tx (quadrado vermelho na Fig.3) é posicionada no centro da rua enfileirada por seis prédios.

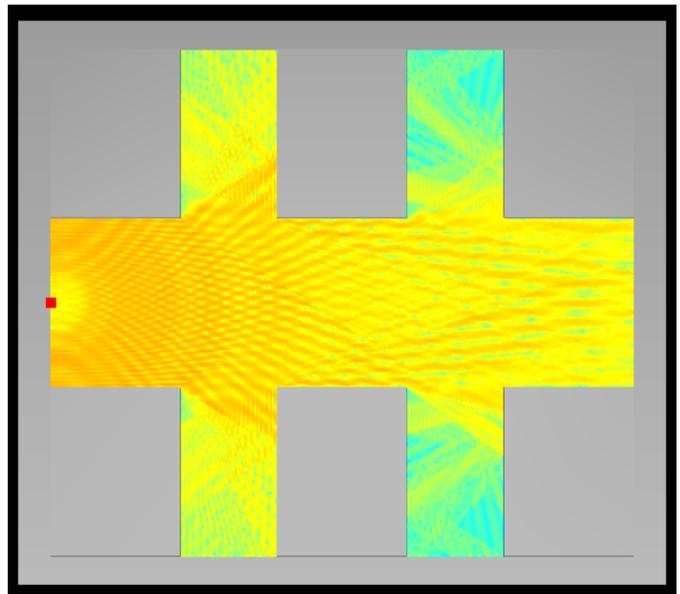


Fig.3. Exemplo de Malha de Recepção gerado pelo RT-SIMULATOR.

III. RESULTADOS

Nesta seção serão mostrados dois exemplos de aplicação dos resultados numéricos providos pelo RT-SIMULATOR destinados a caracterização de canais rádio-móvel. Um exemplo em um ambiente urbano típico (*outdoor*) e outro em um ambiente *indoor* simples:

A. Exemplo de Aplicação 1: Ambiente Outdoor

A Fig.4 mostra um cenário de ruas em Manhattan (cidade de Nova Iorque) onde medidas de campo foram realizadas por Rustako et al. [10],[11] e reportada em [12].

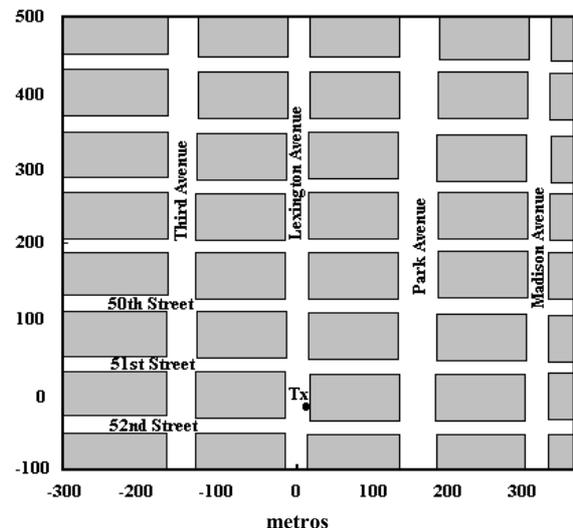


Fig.4. Plano de vista de um cenário de ruas em Manhattan.

A Fig.5 mostra a comparação entre as medidas feitas por Rustako et al. realizadas ao longo da Avenida Lexington (Lexington Avenue na Fig.4) e o modelo UTD provido pelo RT-SIMULATOR.

Os parâmetros usados na simulação foram:

- Frequência = 900 MHz;
- Constante dielétrica relativa = 15;
- Condutividade = 7 S/m;
- Altura da estação móvel = 6 pés = 1,8288 m;
- Altura da estação base = 60 pés = 9,144 m

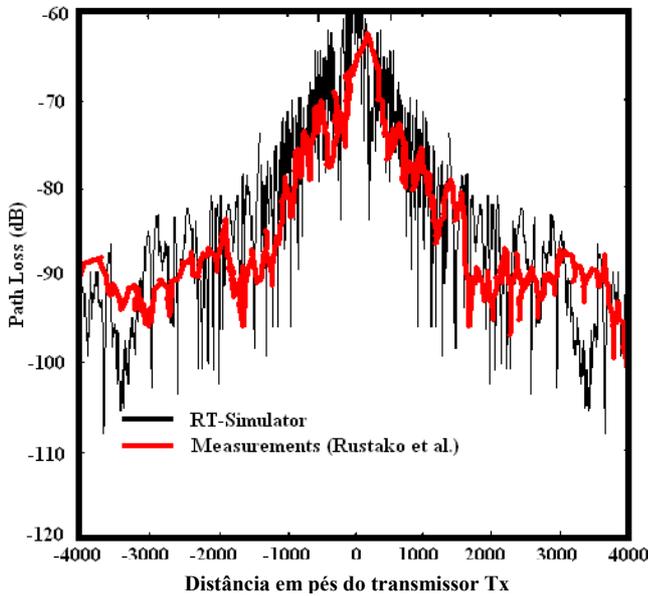


Fig 5. Perda de Percurso (Path Loss) ao longo da Avenida Lexington (Lexington Avenue) em Manhattan.

A comparação mostra uma concordância geral boa do modelo provido pelo simulador com as medidas.

B. Exemplo de Aplicação 2: Ambiente Indoor

Em ambientes *indoor*, o sinal de rádio experimenta efeitos bem diferentes dos geralmente apresentados em ambientes *outdoor*, sendo em geral, resultante de várias componentes de multipercursos dominantes. Nesses ambientes e em modernos sistemas digitais *wireless* (eg. WLANs 802.11g), o interesse se concentra não só na predição da cobertura rádio-elétrica, mas também na avaliação de desempenho quanto ao tráfego de dados (*throughput*, BER, perda de pacotes, etc). No aspecto da vazão de dados (*throughput*), as características de dispersão temporal do canal imprimem o fator limitante. Neste contexto, será usado um exemplo simples para se mostrar a aplicabilidade do RT-SIMULATOR na caracterização de canais neste tipo de cenário.

1) *Campanhas de Medição*: Medidas de potência recebida em 900 MHz em uma sala vazia do Laboratório de Engenharia Elétrica e de Computação da UFPA (Universidade Federal do Pará) foi realizada. O esquema de medição e o *layout* da sala estão mostrados na Fig.6.

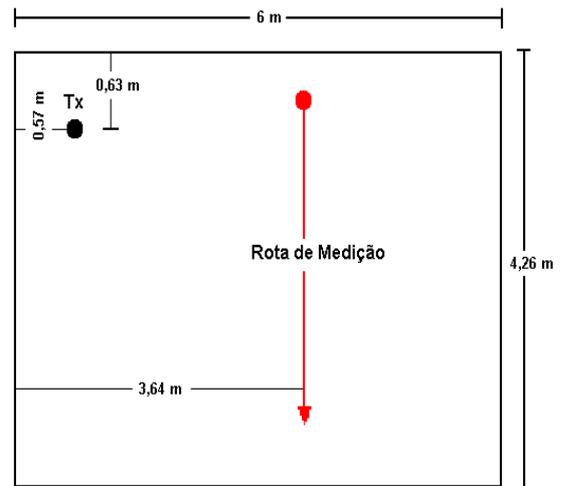


Fig 6. *Layout* da sala e esquema de medidas (rotas de medição).

Os parâmetros utilizados na simulação estão mostrados na Tabela 1:

Tabela 1– Parâmetros de Simulação

Parâmetros de Simulação	
Potência de Transmissão [dBm]	15
Máxima ordem de reflexão	7
Frequência [MHz]	900
Permissividade relativa:	7
Condutividade [S/m]:	0,02
Espessura das paredes [cm]:	20
Altura da sala [m]	3
Antena Tx:	Monopolo [Ganho = 0.99 dB]
Antena Rx:	Dipolo de meia-onda

A comparação entre a predição calculada pelo modelo de traçado de raios (RT-SIMULATOR) e as medidas é mostrada na Fig.7, apresentando uma boa concordância geral. Adicionalmente a caracterização da dispersão temporal do canal é mostrada para o ponto central da sala (Fig.6), indicando que o modelo proposto também pode ser aplicado em ambientes *indoor* simples com as mesmas características do apresentado, ou seja, com o transmissor (Tx) na mesma sala onde está o receptor (Rx).

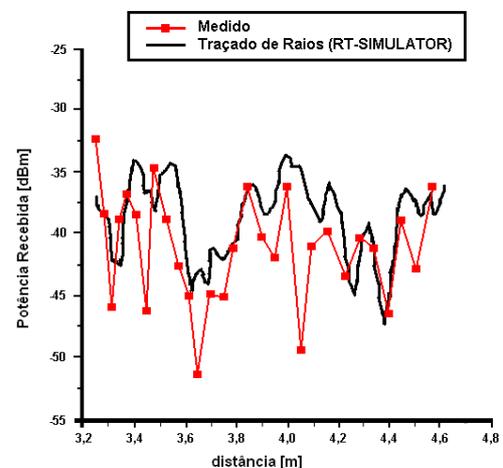


Fig 7. Rota de medição 2 (Traçado de raios x Medidas).

A Fig.8 mostra o perfil de retardos (*Power Delay Profile*) para um ponto de recepção localizado no centro da sala. Neste perfil percebe-se as várias componentes dominantes de multipercursos que contribuem para a potência recebida total assim como a característica de dispersão temporal do canal. Os parâmetros de interesse calculados pelo simulador são:

- Potência Recebida = -27,355 dBm
- Espalhamento Temporal $RMS = 5,403$ ns
- Banda de Coerência = 37,016 MHz

Considerando-se como referência as larguras de banda adotadas pelos principais sistemas móveis que operam nesta faixa de frequência (GSM = 200KHz, CDMA = 1,25MHz e TDMA = 30KHz), este canal pode ser considerado pouco dispersivo, sendo os sinais pouco afetados pela seletividade do canal. Por outro ponto de vista, este canal pode ser considerado faixa-larga, pois a banda de coerência do canal é muito maior que larguras de banda dos sinais provenientes dos sistemas adotadas como referência para análise, não necessitando assim, de nenhuma técnica adicional (como o uso de equalizadores) para mitigar os efeitos de seletividade do canal.

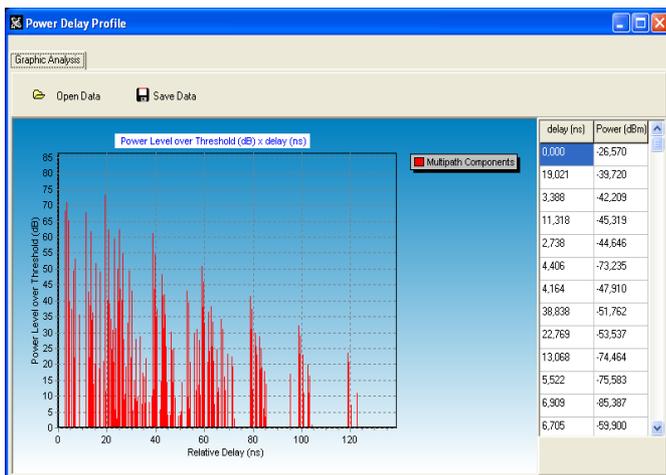


Fig 8. Perfil de Retardos (*Power Delay Profile*) para o ponto central da sala.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um simulador de traçado de raios 3D aplicado na caracterização de canais rádio-móvel. As características do simulador apresentadas mostram sua aplicabilidade na caracterização de canais em modernos sistemas *wireless*. Dois exemplos de aplicação foram considerados, um em um ambiente urbano típico (*outdoor*) e outro em um ambiente *indoor* simples. Os resultados gerados pelo simulador foram confrontados com medidas de campo realizadas nos referidos ambientes, apresentando boas concordâncias gerais. Simulações de dispersão temporal do canal também foram realizadas e os resultados foram discutidos.

- [1] D. N. Schettino e F. J. S. Moreira, "Um Algoritmo Eficiente para o Traçado de Raios na Predição de Cobertura Radioelétrica em Ambientes Urbanos", X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, Recife, PE, Brasil, Agosto 2002, pp. 196-200.
- [2] M. F. Cátedra and J. P. Arriaga, "Cell Planning for Wireless Communications," Artech House - Mobile Communications Series, 1999.
- [3] Harry R. Anderson, "A Ray-Tracing Propagation Model for Digital Broadcast Systems in Urban Areas," *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 39, no. 3, Set. 1993.
- [4] F. Gil, A. R. Claro, J. M. Ferreira, C. Pardelinha and L. M. Correia, "A 3D Interpolation method for base-station-antenna radiation patterns", *IEEE Trans. Antennas Propagation Magazine*, vol. 43, No. 2, April 2001.
- [5] Constantine A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics," John Wiley & Sons, 1989.
- [6] G. Wölfe, R. Hoppe, T. Rautiainen, "Verifying path loss and delay spread predictions of a 3D ray tracing propagation model in urban environment", *Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th*, vol.4, 24-28 Sept. 2002.
- [7] R. J. Luebbers, "A heuristic UTD slope diffraction coefficient for rough lossy wedges", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 37, no. 2, pp. 206-211, Fev. 1989.
- [8] Antônio Nunes Belém, "Caracterização Bidimensional de Canais Rádio Através de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Eletrônica, UFMG, Setembro de 2001.
- [9] F. J. Ponce, F. Martí Pallarès, L. Juan-Llácer, and N. Cardona, "Educational Software Tool Based on a Geographical Information System (GIS) for Radio Wave Propagation Analysis," *IEEE Trans. on Education*, vol. 44, no.42, pp. 355-364, Nov. 2001.
- [10] A. J. Rustako, Jr., N. Amitay, G. J. Owens, and R. S. Roman, "Radio propagation measurements at microwave frequencies for microcellular mobile and personal communications," in *Conf. Rec. Int. Conf. Communicat.*, Boston, MA, June 11-14, 1989, pp.482-486.
- [11] _____, "Radio propagation at microwave frequencies for line-of-sight microcellular mobile and personal communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, pp. 203-210, Feb. 1991.
- [12] S. Y. Tan and H. S. Tan, "A microcellular communications propagation model based on the uniform theory of diffraction and multiple images," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 44, no. 10, pp 1317-1326, Oct. 1996.