

Ferramentas Computacionais em Redes Sem-Fio: Uma Abordagem na Avaliação de Desempenho de Canais Rádio-Móvel

A. M. Cavalcante, J. C. W. A. Costa, M. M. Coutinho e C. R. L. Francês

Resumo — Neste trabalho são apresentadas duas abordagens complementares de simulação para a modelagem e avaliação de desempenho de canais rádio-móvel. A primeira abordagem é baseada na avaliação do meio físico e seu modelo de propagação associado, fazendo uso de um simulador baseado nas técnicas de traçado de raios tridimensional (3D) denominado RT-Simulator. A segunda abordagem é baseada na avaliação de desempenho das camadas de enlace, rede e aplicação, fazendo uso de um simulador discreto de eventos (Network Simulator). A interdependência entre estas ferramentas de simulação na caracterização eficiente de canais rádio-móvel é mostrada através de um exemplo de aplicação, onde os resultados são discutidos.

Palavras Chave — Traçado de raios, modelo de propagação, avaliação de desempenho.

Abstract — This work presents two complementary approaches of simulation for mobile channels modelling and performance evaluation. The first approach is based on the evaluation of the physical layer and its propagation model associated, making use of a simulator based on the 3D ray-tracing techniques called RT-Simulator. The second approach is based on the performance evaluation of the link, network and application layers, making use of a discreet events simulator (Network Simulator). The interdependence among these simulation tools in the efficient mobile channel characterization is shown through a study case, where the results are discussed.

Index Terms— Ray-tracing, radio-propagation model, performance evaluation.

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],[2]. Em sistemas móveis celulares, por exemplo, 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 [3].

André Mendes Cavalcante, amc@ufpa.br, João. Crisóstomo Weyl A. Costa, jweyl@ufpa.br, Mauro Margalho Coutinho, margalho@ufpa.br, Carlos Renato Francês Lisboa, rfrances@ufpa.br, UFPA – Universidade Federal do Pará – Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação – DEEC, Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado – LEA, Laboratório de Computação Aplicada - LACA, Av. Augusto Corrêa nº 01 – CP: 8619, CEP: 66075 – 900 Belém/Pa, Brasil.

Este trabalho foi financiado pelo Convênio ERICSSON/AMCEL/UFPA.

Em modernos sistemas digitais sem-fio (e.g., WLANs, HDTV), os efeitos de degradação do canal imprimem um fator importante no desempenho dos mesmos, pois tais efeitos podem resultar em uma alta taxa de erro de bits (BER), tornando a correção de alguns ou de todos os quadros de dados quase impossível, resultando em uma completa perda do conteúdo de informação transmitida. Pode-se mostrar que em tais sistemas, os efeitos de degradação do canal por multipercurso são os indicadores mais críticos 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 [4].

Neste contexto, ferramentas de simulação se tornam as soluções mais viáveis para a avaliação de desempenho de redes sem-fio.

Ferramentas de simulação usadas na avaliação de desempenho de camadas superiores em redes sem-fio, geralmente carecem de modelos de propagação adequados para caracterizar o verdadeiro comportamento do sinal de rádio em ambientes móveis típicos. Normalmente, os modelos de propagação apresentados por tais simuladores são limitados, apresentando um modelo ideal (espaço-livre), um modelo intermediário (modelo de terra-plana) e um modelo geral (sombreamento). Apesar do modelo geral poder ser empregado em qualquer ambiente, existe a dificuldade em se definir (estimar) parâmetros de propagação que definem o mesmo. Esta limitação apresentada contribui para que os resultados gerados por tais simuladores possam apenas ser considerados relevantes quando o interesse estiver nos extremos do melhor caso e do pior caso. Entretanto, quando o interesse se concentra em avaliar o desempenho efetivo de uma rede sem-fio via simulação, é fundamental que se determine (estime) com uma boa precisão os parâmetros de propagação do ambiente. Isto pode ser feito via medidas de campo, o que é muitas vezes oneroso e dispendioso na questão temporal, ou via simulação da camada física por algum modelo eficiente. A idéia deste trabalho é mostrar que a determinação destes parâmetros pode ser realizada via simulação da camada física através de técnicas de traçado de raios, por esta ser do ponto de vista prático, a técnica que melhor combina precisão com eficiência computacional [3].

A seção II apresenta os inter-relacionamentos entre as camadas física e superiores no processo de avaliação de desempenho em redes sem-fio. A seção III apresenta as características da ferramenta de simulação de camada física baseada em traçado de raios (RT-Simulator) e alguns exemplos de aplicação e validação do modelo. A seção IV apresenta a ferramenta de simulação de camadas superiores (NS-*Network Simulator*). Nesta seção também, resultados de avaliação de desempenho são apresentados e discutidos fazendo uso de parâmetros de propagação do ambiente gerados pelo RT-SIMULATOR. Por fim, a seção V apresenta as conclusões do trabalho.

II. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM REDES SEM-FIO

O processo de avaliação de desempenho em redes de comunicação sem-fio pode ser dividido basicamente em três etapas, conforme mostrado na Fig.1:

- Descrição do Cenário
- Caracterização do Canal Rádio-Móvel
- Estimação de Métricas de Desempenho

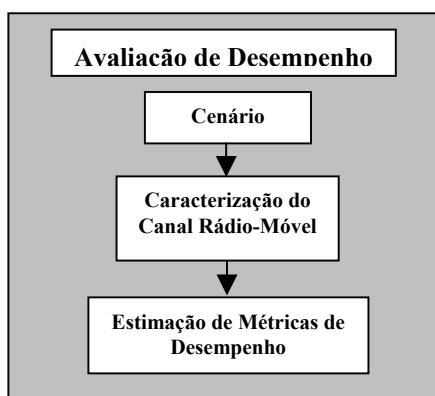


Fig. 1. Processo de Avaliação de Desempenho em Redes sem-fio.

A seguir serão descritas com mais detalhes as três etapas acima mencionadas, assim como as ferramentas computacionais disponíveis no grupo de pesquisa para realizar as mesmas.

A. Descrição do Cenário

Esta etapa consiste na descrição do cenário onde as simulações serão realizadas, i.e., consiste na definição do ambiente móvel de análise assim como os parâmetros técnicos utilizados pelos equipamentos (transmissores, receptores, antenas, etc...). Em simuladores como o NS (*Network Simulator*), faz-se necessário a definição da área onde os nós estão distribuídos (*flatgrid*), assim como a caracterização das aplicações de tráfego (ftp, http, cbr, etc) e do movimento inerente aos nós, especificando-se as coordenadas de destino e a velocidade média de deslocamento em metros por segundo. Também pode-se definir esquemas de roteamento hierárquico para viabilizar simulações do tipo *wired-cum-wireless*, onde parte da infraestrutura da rede é cabeada e parte é *wireless* e ambas interagem através de pontos de acesso.

B. Caracterização do Canal Rádio-Móvel

Esta etapa é uma das mais importantes no processo de avaliação de desempenho em redes de comunicação sem-fio (*wireless*). Para modernos sistemas digitais sem-fio, nessa etapa faz-se necessário determinar, além dos parâmetros referentes à perda de percurso e variabilidade do sinal causados por efeitos de desvanecimento, os parâmetros de dispersão temporal. Uma das técnicas mais promissoras e que vem mostrando grande eficiência na caracterização de canais rádio-móvel são as baseadas em traçado de raios. Neste contexto, foi desenvolvido um simulador denominado de RT-SIMULATOR capaz de realizar tais caracterizações. Este ambiente computacional servirá como ferramenta de auxílio e, em algumas situações, como dado de entrada para a etapa subsequente. Detalhes sobre as características do simulador RT-SIMULATOR serão descritos na seção III.

C. Estimação de Métricas de Desempenho

Esta etapa pode ser considerada como a principal dentre as do processo de avaliação de desempenho, pois nela, os parâmetros de desempenho de interesse poderão ser avaliados e com base nessa avaliação é que viabilidades técnicas e econômicas de uma certa tecnologia poderão ser colocadas a prova em diferentes cenários. Um aspecto importante nessa etapa é que na maioria das vezes, ela só pode ser realizada via simulação, sendo necessário, portanto, de simuladores de redes para tal. Neste contexto, propõe-se o uso do simulador NS (*Network Simulator*) para realizar tal etapa. Detalhes a respeito deste simulador serão descritos na seção IV.

III. RT-SIMULATOR

A seguir serão abordados alguns detalhes a respeito do simulador RT-SIMULATOR.

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 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). Estas limitações são superadas como o uso do outro formato suportado pelo simulador, o SCE, que representa 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.2.

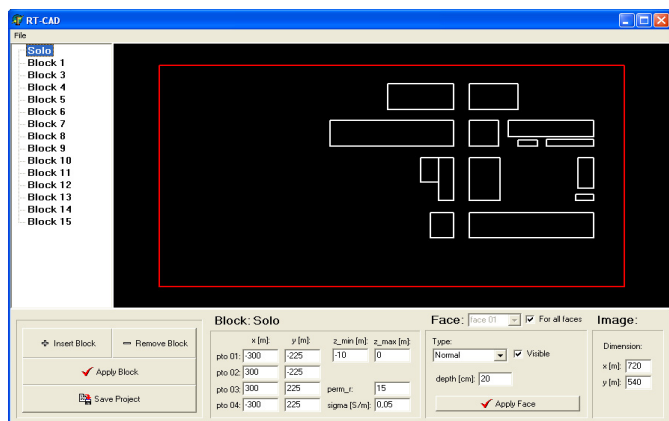


Fig. 2. Ambiente de Desenvolvimento do RT-CAD.

No formato de arquivo de cenário desenvolvido (*.SCE), as faces isoladas não são individualizadas morfologicamente, 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 tridimensional (rotação). Os diagramas de radiação podem ser definidos no simulador 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 [5] para gerar um diagrama 3D, e que fornece uma boa aproximação.

C. Tratamento Geométrico dos Raios

O RT-SIMULATOR adota a Teoria das Imagens (IT) [2],[3] juntamente com os algoritmos de busca por pontos de difração para calcular os percursos dos raios referentes aos mecanismos de reflexão e difração, respectivamente. No aspecto computacional, o simulador usa várias técnicas de computação gráfica para tornar as estruturas de dados empregadas mais otimizadas possível [3].

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 [3]. 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* [3] e os de difração são os coeficientes heurísticos descritos em [6].

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 [7]-[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 atua de forma igual (uniforme) ou, ao menos, de forma muito próxima à igualdade, sobre todas as frequências de um sinal através dele transmitido. 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 multipercurso, 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*: Este tipo de análise é ideal para avaliar sistemas 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 tipo de análise, o simulador gera gráficos da Perda de percurso [dB], da Potência recebida total [dBm] e da Potência recebida de cada mecanismo de acoplamento (raio direto, reflexão e difração simples e difração dupla) [dBm] em função do percurso realizado.

3) *Malha Recepção*: O simulador criará um diagrama de interferências sobre a malha.

G. Exemplo de Aplicação (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 multipercurso 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.

Para validar a ferramenta de simulação RT-SIMULATOR, 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. A comparação de predição calculada pelo modelo de traçado de raios (RT-SIMULATOR) e as medidas mostram uma boa concordância geral, conforme mostrado na Fig.3. Adicionalmente, foi realizada a caracterização da dispersão temporal do canal para o ponto central da sala. A Fig.4 mostra o perfil de retardos de potência (*Power Delay Profile*) para este ponto.

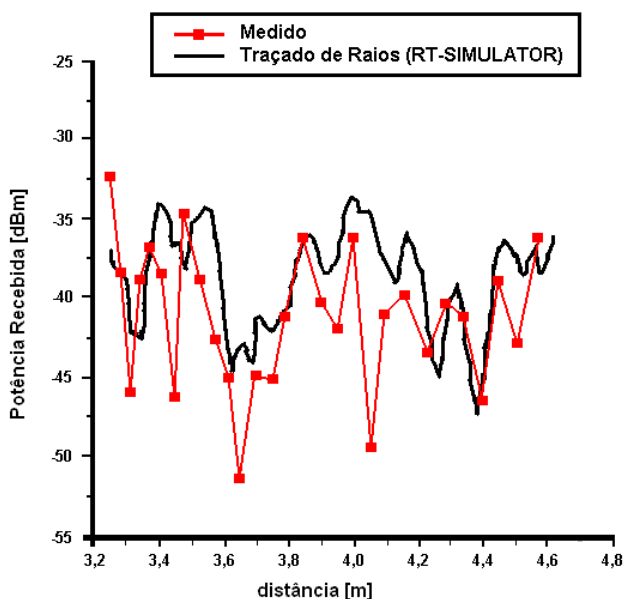


Fig 3. Rota de medição 2 (Traçado de raios x Medidas).

Neste perfil percebe-se as várias componentes dominantes de multipercurso 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 4. Perfil de Retardos (*Power Delay Profile*) para o ponto central da sala.

Através dos resultados gerados pelo RT-SIMULATOR, é possível extrair informações do canal necessárias para a parametrização do modelo de propagação geral disponibilizado pelo simulador de redes NS (*Network Simulator*) e assim, formar o elo de ligação entre as duas ferramentas. Conforme já mencionado anteriormente, o NS apresenta dois modelos de propagação muito limitados (espaço-livre e terra-plana) e um modelo geral (sombreamento). Para o uso do modelo geral é necessário especificar dois parâmetros estatísticos do canal, o coeficiente β de atenuação e o desvio padrão σ do sinal. O coeficiente β representa a taxa de variação da potência com a distância (geralmente entre $2 < \beta < 5$), onde β igual a 2 representa um ambiente em espaço-livre, cuja a potência decai com o quadrado da distância e β igual a 5 representa um ambiente fortemente urbanizado, com a potência decaindo com a quinta potência com a distância. Ambientes *indoor* apresentam algumas vezes a propriedade de confinamento do sinal,

fazendo com que o parâmetro β seja relativamente próximo ao espaço livre e em algumas situações até menor. O desvio padrão σ do sinal representa a dispersão da potência recebida em relação a sua média. A determinação destes parâmetros pode ser facilmente obtida através de uma análise estatística da base de dados do gráfico da potência recebida com a distância do ambiente em análise (Fig.3) gerado pelo RT-SIMULATOR. Outra forma de se obter tais parâmetros é através de medidas de campo, o que muitas vezes é oneroso e demanda muito tempo. Como a eficiência das técnicas de traçado de raios na caracterização de canais rádio-móveis em diversos ambientes vem sendo comprovadamente mostrada nos últimos anos [1]-[4],[7], tais técnicas aparecem como uma solução bem atrativa para realizar a modelagem do canal (camada física).

IV. NS (NETWORK SIMULATOR)

A opção pelo uso de simulação no processo de avaliação de desempenho se dá principalmente em função de dois aspectos: o alto custo envolvendo a aquisição de equipamentos para um conjunto de aferições *in loco* e a disponibilidade de um simulador bastante conceituado no meio acadêmico, com suporte a redes móveis, o *Network Simulator* (NS). Desenvolvido a partir do projeto VINT (*Virtual InterNetwork Testbed*), o NS é um simulador discreto, orientado a eventos [10], com suporte a uma ampla variedade de pesquisas que abrangem, dentre outros, a pilha de protocolos TCP-IP, redes locais, redes de grande abrangência (WANs) e redes baseadas em satélite. O fato de todo o código fonte ser aberto e gratuito tem atraído diversos pesquisadores que, com suas contribuições, têm tornado o simulador mais robusto e confiável. Uma dessas contribuições, feita pelo grupo Monarch da Universidade de Carnegie Mellon [11], foi responsável pela incorporação do módulo de redes móveis ao NS. Uma ferramenta de apoio denominada NAM (*Network Animator*), mostrada na Fig.5, permite o acompanhamento da simulação através de uma interface gráfica. A avaliação dos resultados ocorre a partir de uma análise em um arquivo de trace gerado no decorrer do processo.

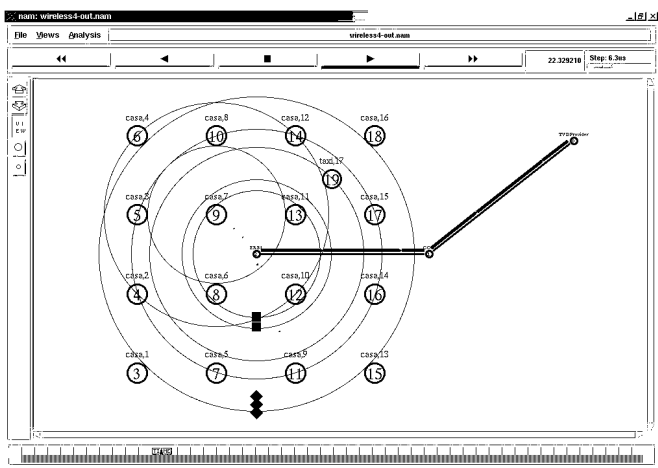


Fig 5. Cenário gerado pelo Network Animator.

O simulador NS fornece suporte ao cálculo de medidas de desempenho como vazão, atraso fim-a-fim, *jitter* e probabilidade de bloqueio que, geradas a partir de um modelo eficiente de camada física (modelo de propagação), podem favorecer a uma avaliação de desempenho com maior confiabilidade e de grande valia na fase de projeto da rede. Neste trabalho, a proposta é a utilizar o NS atuando em conjunto com o simulador de camada física RT-SIMULATOR, que é baseado nas técnicas de traçado de raios. Esta funcionalidade pode ser realizada utilizando-se parâmetros determinados a partir de dados de saída do RT-SIMULATOR como entrada na parametrização do modelo de propagação geral disponibilizado no NS, conforme já descrito na seção anterior. Sob esse prisma os dois simuladores se completam fornecendo muitas informações úteis aos projetistas de redes sem fio, tanto na infra-estrutura da rede quanto nas possíveis aplicações suportadas por ela. Abaixo, descrever-se-á um experimento exemplificando essa complementaridade.

Para realizar este experimento, utilizou-se o mesmo cenário descrito no exemplo de aplicação da Seção III usado pelo RT-SIMULATOR. É importante ressaltar que, esta atuação em conjunto entre as ferramentas de simulação só é efetiva quando são realizadas sob o mesmo ambiente (cenário), ou no mínimo com as mesmas características. Isto é necessário para que os parâmetros fornecidos através do RT-SIMULATOR correspondam realmente às características do ambiente (cenário) colocado sob simulação no NS. No cenário adotado neste experimento, os parâmetros de interesse utilizados no modelo geral de propagação do NS e determinados a partir da base de dados de potência recebida com a distância fornecidos pelo RT-SIMULATOR (Fig.3), estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetro Obtidos na simulação do RT

Parâmetro	Valor
β	2.5
Desvio Padrão σ	5.3741
Frequência	900 MHz

O cenário no NS é caracterizado por uma área, chamada *flatgrid* no NS, onde todas as movimentações dos nós são realizadas (Fig 6). Inicialmente o posicionamento dos nós ocorre nas seguintes coordenadas: Nó transmissor ou node_(0) (X=0,57; Y=3,63), nó receptor ou node_(1) (X=3,64; Y=3,64). Após 3 unidades de simulação o nó receptor desloca-se para as coordenadas (X=3,64; Y=1.0) a uma velocidade média de 0,5 metros por segundo. Decorridas 13 unidades de simulação o nó receptor movimenta-se novamente para as coordenadas (X=5,99; Y=1.0) com a mesma velocidade de 0,5 metros por segundo.

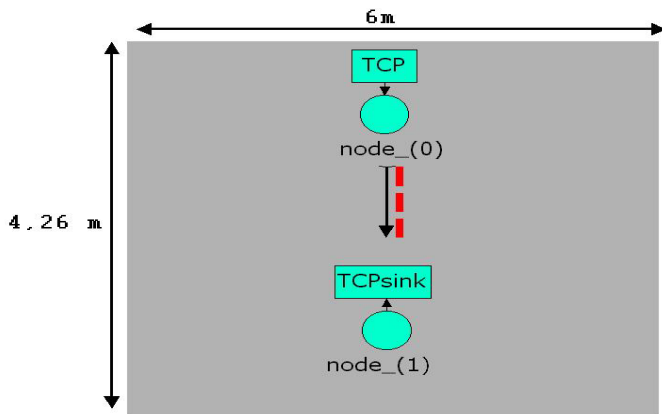


Fig 6. Cenário do experimento no NS.

Para testar o desempenho da rede transmitiu-se um fluxo CBR (Constant Bit Rate), que caracteriza vídeo, a uma taxa de 550 Kbps, partindo do nó `node_(0)` em direção ao nó `node_(1)`. As transmissões foram realizadas com base no protocolo de transporte UDP (*User Datagram Protocol*) e iniciadas a partir do instante 1.0 de simulação. Conforme mostrado na Fig.7, observa-se que, mesmo com o deslocamento ao longo do experimento, a vazão média permaneceu constante.

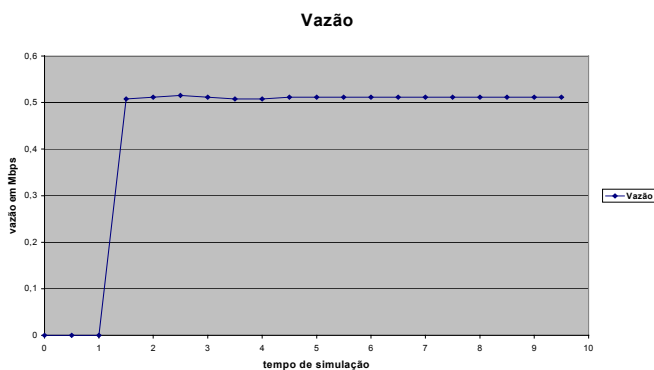


Fig 7. Gráfico de vazão fim-a-fim.

A Fig.8 mostra outra medida de desempenho, o atraso fim-a-fim. Apesar de apresentar uma variação, esta ocorre em um intervalo tão pequeno (0,0025 segundos) que não chega a comprometer a qualidade de transmissão do vídeo.

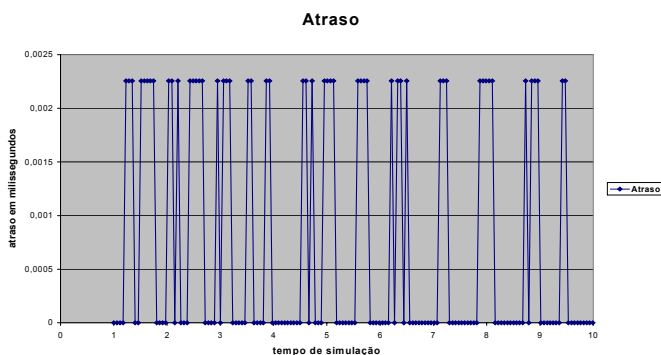


Fig 8. Gráfico do atraso fim-a-fim

Diversas outras medidas de desempenho, como *jitter* e probabilidade de bloqueio, podem ser extraídas permitindo uma análise bastante consistente a partir das simulações.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou duas abordagens complementares de simulação para a modelagem e avaliação de desempenho em canais rádio-móvel. Através dessas abordagens, mostrou-se como a caracterização eficiente da camada física através do uso de técnicas de traçado de raios pode ser usada como dado de entrada em simulações de avaliação de desempenho em camadas mais altas, favorecendo a avaliações mais efetivas e realistas. Para demonstrar este inter-relacionamento entre as ferramentas de simulações, um exemplo de aplicação em um ambiente *indoor* foi considerado. Os resultados gerados mostram que é possível realizar avaliações de desempenho mais efetivas em redes sem-fio através da atuação em conjunto de ferramentas de simulação específicas de camada física com ferramentas específicas de camadas superiores. Tal abordagem torna-se portanto, uma atraente solução para auxílio no projeto e implantação de redes sem-fio.

REFERÊNCIAS

- [1] Richter, J., Al-Nuaimi, M.O. and Ivrisimtzis, L.P., "Optimisation of radio coverage in urban microcells using a UTD based ray-tracing model," *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings*, vol. 151, Issue. 3, 187 – 192, June 2004.
- [2] 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.
- [3] M. F. Cátedra and J. P. Arriaga, "Cell Planning for Wireless Communications," *Artech House - Mobile Communications Series*, 1999.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [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 Pallarés, 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] Fall, K.; Varadhan, K.; "The NS Manual"; *Network Simulator 2.1b9a*, VINT Project; 2002. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [11] *Monarch Project, Mobile Networking Architectures*, <http://www.monarch.cs.cmu.edu/>