



Simulação de Canais Rádio Móveis

*Alberto Gaspar Guimarães**

*Ernesto Leite Pinto***

RESUMO

Este trabalho descreve de forma objetiva os principais métodos de simulação disponíveis para o canal móvel. Procura-se realizar uma compilação de diversos artigos sobre o tema e incluir uma análise crítica das propostas. As técnicas são apresentadas e classificadas de acordo com o modelo utilizado para a caracterização do desvanecimento, sendo a referência principal o modelo GWSS-US para canais variantes no tempo.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização e modelagem do canal móvel recebem especial atenção no âmbito da pesquisa de sistemas de comunicações móveis. Isto se explica pelo fato de que as características de propagação deste meio de transmissão produzem grande parte dos problemas e limitações existentes nos sistemas móveis, tais como flutuação da envoltória do sinal e interferência entre símbolos. Portanto, uma análise dos mecanismos de propagação e o estabelecimento de modelos matemáticos do canal são importantes no sen-

tido de prover ferramentas para a estimação do desempenho destes sistemas e para a obtenção de alternativas de projeto.

No entanto, a complexidade dos canais móveis, em que se incluem componentes de difícil tratamento formal, com propriedades aleatoriamente variantes no tempo, dificultam muitas vezes o desenvolvimento de uma análise matemática adequada. Desta forma, a utilização de técnicas de simulação assume importância fundamental, sendo praticamente indispensável no projeto e dimensionamento de sistemas móveis. Mesmo quando é possível caracterizar matematicamente o problema, a simulação pode ter o importante papel de validar algumas hipóteses adotadas.

* Departamento de Engenharia Elétrica - IME

** Campo de Provas da Marambaia

A base fundamental para a simulação em questão é um modelo apropriado para o canal, caracterizado como um sistema linear variante no tempo, em que sua resposta impulsional, aqui denotada por $h(\tau, t)$, depende do instante de aplicação do impulso ($t - \tau$), e do instante de observação (t). Em geral, esta caracterização é desenvolvida em banda básica, sendo a resposta impulsional do canal representada por sua envoltória complexa.

As diferenças entre as diversas técnicas de simulação existentes residem em boa parte nos modelos adotados para a representação de $h(\tau, t)$.

O modelo GWSS-US (do Inglês: “Gaussian Wide Sense Stationary – Uncorrelated Scattering”) é indubitavelmente a referência mais importante na simulação de canais móveis, sendo amplamente utilizado em diversos trabalhos publicados. Neste modelo, admite-se que a resposta $h(\tau, t)$ do canal é dada por uma coleção de processos estocásticos na variável t , indexados pelos valores de atrasos τ . Considera-se que estes processos são estacionários em sentido amplo (WSS), gaussianos (G) e descorrelacionados entre si (US). A *função espalhamento* é a referência principal para a caracterização do tipo de desvanecimento produzido pelo canal. Esta função representa a densidade de potência da resposta do canal equivalente em banda básica em relação a duas variáveis (atraso e desvio de frequência por efeito Doppler). Em particular, utiliza-se ainda as densidades “marginais” nas variáveis de atraso e desvio de frequência para se caracterizar o desvanecimento. Estas densidades “marginais” são referenciadas como *perfil de potência por atraso* (do Inglês: *power delay profile*) e *perfil de potência Doppler* (do Inglês: *Doppler power spectrum*).

Todavia, sob determinadas condições, é razoável supor a existência de limites para a aplicação do modelo GWSS-US. Por exemplo, pode-se admitir que a resposta do canal é estacionária (hipótese WSS), desde que o móvel permaneça confinado a uma área geográfica limitada (onde seja possível admitir que as propriedades do ambiente de transmissão são mantidas aproximadamente constantes)¹. No que diz respeito à gaussianidade para as componentes em fase e quadratura da resposta do canal, para sinais com intervalo de símbolo extremamente pequeno (sinais CDMA, por exemplo), esta hipótese pode, eventualmente, não ser plausível².

A inadequação do emprego deste modelo a determinadas situações motivou o desenvolvimento de novas alternativas para a caracterização de canais móveis, que deu origem a uma outra classe de modelos para emprego em simulação, denominados aqui de modelos “físicos”. Embora apresentem uma maior complexidade para a implementação, estes modelos se constituem em representações mais próximas dos mecanismos físicos existentes no canal. Por esta razão, pode-se dizer que a validade das hipóteses neles admitidas em geral não depende de propriedades específicas do sinal transmitido ou outras condições particulares de caracterização do cenário de transmissão. Sob este ponto de vista, sua utilização é menos restrita do que a do modelo GWSS-US.

Observa-se que estas classes de modelos (GWSS-US e “físicos”), apesar de terem sido originadas nas décadas de 60 e 70, servem até hoje de base para um grande número de métodos de simulação do canal móvel. A grande diversidade de trabalhos propostos deve-se, principalmente, à busca constante por métodos de simulação ao mesmo tempo menos com-

plexos do ponto de vista computacional e mais precisos no que se refere à reprodução das propriedades estatísticas previstas pelo modelo adotado.

A partir de uma visão conjunta, é possível classificar, de forma sistematizada, as várias metodologias de simulação, bem como destacar as principais vantagens e desvantagens associadas a cada uma delas. Este trabalho pretende fazer uma revisão de alguns trabalhos recentes relacionados à simulação do canal rádio-móvel.

2. CLASSIFICAÇÃO

A Figura 1 ilustra a classificação aqui estabelecida para as diversas vertentes consideradas, tendo como base o modelo adotado para a resposta do canal e a “quantidade” de elementos do sistema de transmissão envolvidos na modelagem.

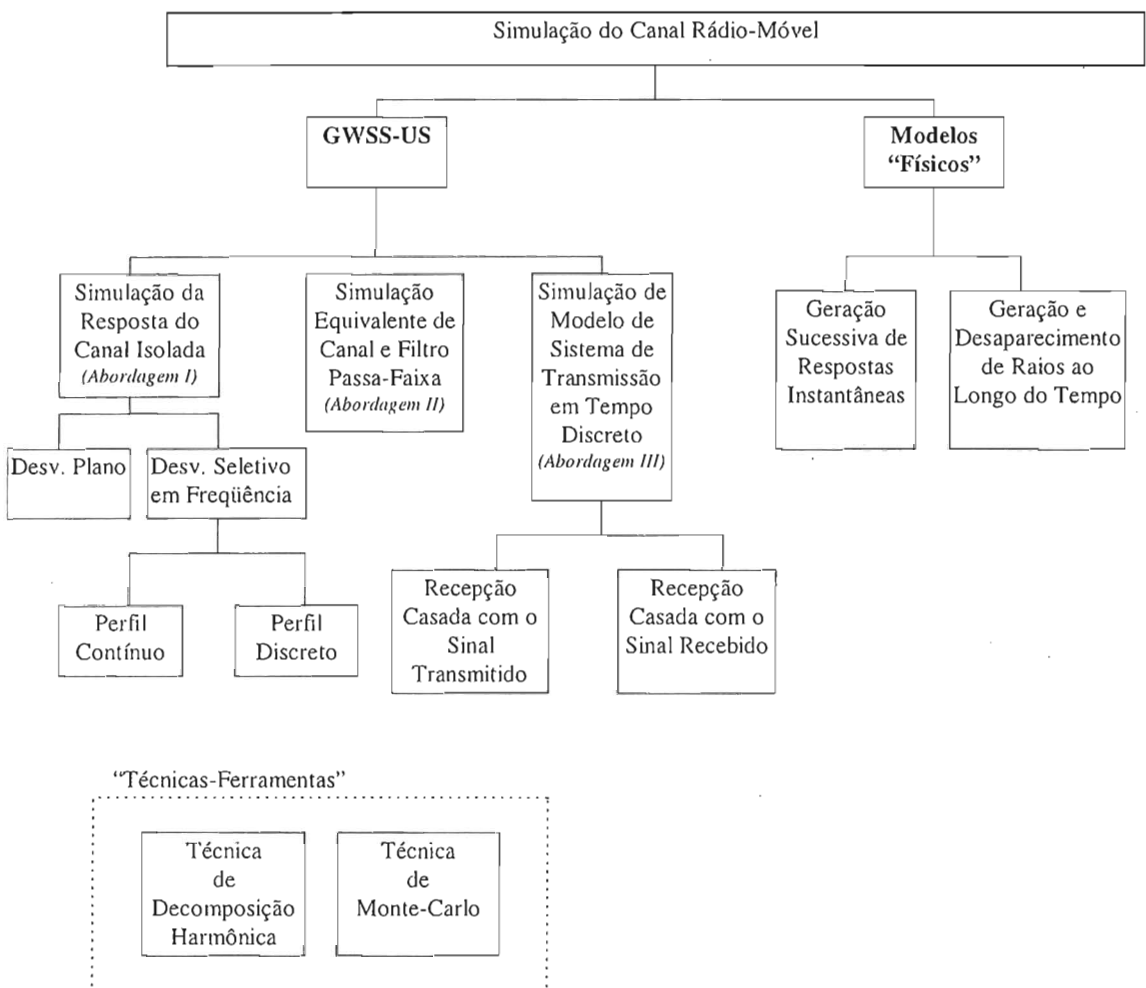


Figura 1 – Classificação dos Métodos Propostos para Simulação do Canal Móvel

A partir do modelo utilizado para caracterização do desvanecimento, pode-se distinguir duas grandes categorias de trabalhos sobre a simulação do canal móvel:

- Simulação baseada no modelo GWSS-US
- Simulação baseada em modelos “físicos”

2.1. Simulação baseada no modelo GWSS-US

Em geral, os métodos deste grupo utilizam como referência, para gerar o desvanecimento, os momentos estatísticos de 2ª ordem descritos pela função espalhamento do canal. Além disso, admitem que os processos associados à variação da resposta com o tempo são gaussianos. Por esta razão, na grande maioria das técnicas de simulação baseadas no modelo GWSS-US, faz-se necessária a implementação de um algoritmo que gere processos estocásticos gaussianos estacionários, de média nula e formatação espectral particular. As técnicas denominadas de *Decomposição Harmônica* e *Monte-Carlo* podem ser aplicadas com este objetivo, atuando como “ferramenta” básica nos diversos métodos.

A técnica de simulação de Monte-Carlo foi originalmente proposta em [3], sendo posteriormente estudada e utilizada em vários trabalhos acerca da simulação de sistemas de comunicações com canais GWSS-US^{4,5,6,7}. Baseia-se em um modelo estocástico que reflete diretamente a estrutura de múltiplos percursos do canal móvel. A geração da resposta do canal é dada pela superposição linear de N percursos elementares (N é denominado ordem do modelo), individualmente caracterizados pelo valor de atraso, deslocamento Doppler e amplitude complexa.

Por sua vez, a técnica de Decomposição Harmônica, proposta em [8], baseia-se na decomposição harmônica de processos estocásticos para gerar a resposta do canal variante no tempo.

Outra característica importante presente em alguns trabalhos que se baseiam no modelo GWSS-US diz respeito ao desenvolvimento de modelos para a simulação de “blocos compostos”, isto é, a geração da saída equivalente do canal GWSS-US combinada com um ou mais “blocos” de um sistema de transmissão. Com base no sistema de transmissão equivalente em banda básica mostrado na Figura 2, pode-se distinguir 3 abordagens para a simulação no modelo GWSS-US.

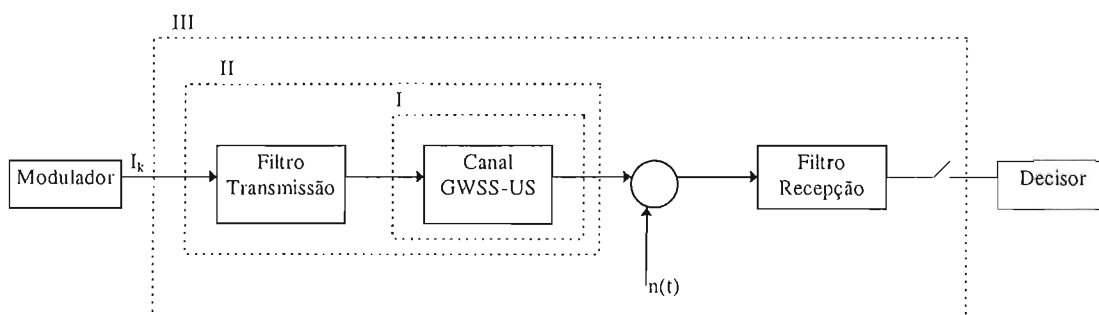


Figura 2 – Modelo Básico para o Sistema de Transmissão

2.1.1 Simulação da Resposta do Canal Isolada (Abordagem I)

Neste caso é gerada somente a resposta impulsional do canal. O método utilizado depende ainda do canal ser seletivo ou não em frequência, e caso seja, do perfil de multipercursos ser contínuo ou discreto.

A simulação de um canal com desvanecimento não seletivo em frequência compreende, sob o modelo GWSS-US, a geração de um processo aleatório gaussiano, complexo, de média nula e espectro dado pelo perfil de espalhamento Doppler. As técnicas “ferramentas” (Monte-Carlo e Decomposição Harmônica) têm exatamente esta finalidade e podem ser diretamente aplicadas para esta simulação.

A simulação de um canal seletivo em frequência representa a situação mais geral de desvanecimento, na qual o canal apresenta variação de sua resposta ao longo do tempo, bem como “espalha” a energia do sinal transmitido em escala comparável ao intervalo de símbolo do sinal. A simulação pode ser realizada considerando o canal com valores de atraso distribuídos continuamente ou com valores fixos (discretos), de quantidade finita.

A simulação do canal com perfil discreto é normalmente a opção adotada pois a complexidade computacional exigida é bem menor. O modelo utilizado é dado pela expressão abaixo

$$h(\tau, t) = \sum_{i=1}^K \alpha_i(t) \delta(\tau - \tau_i) \quad (1)$$

onde $\alpha_i(t)$ e τ_i são, respectivamente, a amplitude complexa e o valor de atraso associados ao i -ésimo percurso, e K é o número de percursos proporcionados pelo canal. Com o modelo estabelecido na expressão (1), percebe-se que a representação natural para o canal móvel é um filtro transversal, com coeficientes variantes no tempo e espaçamentos fixos (invariantes no tempo).

Devido à sua eficiência e relativa simplicidade, este modelo tem sido amplamente utilizado em simulações para a avaliação de desempenho de sistemas de transmissão digital. Um exemplo típico é o modelo estabelecido nas especificações do padrão Norte-Americano IS-54 para telefonia celular, em que se admite um perfil de atrasos composto por dois “raios”.

2.1.2 – Simulação Equivalente de Canal e Filtro Passa-Faixa (Abordagem II)

Vários modelos discretos para sistemas lineares variantes no tempo foram desenvolvidos por Kailath⁹ baseado no teorema da amostragem, e posteriormente estudados por Bello¹⁰ para a caracterização de canais variantes no tempo. Dentre os modelos desenvolvidos, destaca-se, em trabalhos que tratam da caracterização de canais móveis, o que admite a limitação em faixa para a resposta do canal, ou que o sinal de entrada (ou de saída) tem sua faixa limitada por um filtro, como mostra a Figura 3, ou se tem:

$$\hat{h}(\tau, t) = h(\tau, t) * g(\tau) \quad (2)$$

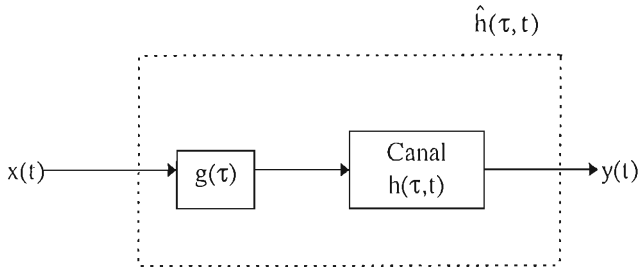


Figura 3 – Canal GWSS-US Combinado com Filtro Passa-baixas (Abordagem II).

sendo $\hat{h}(\tau, t)$ a resposta impulsional do canal $h(\tau, t)$ combinado com um filtro $g(\tau)$ passa-baixas, com função de transferência $G(f) = 1$, para $|f| \leq W/2$, e $G(f) = 0$, para $|f| > W/2$. Admitindo-se que o espalhamento Doppler é desprezível em relação a W , pode-se aplicar o teorema da amostragem para a representação de $\hat{h}(\tau, t)$, obtendo-se:

$$\hat{h}(\tau, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{h}_n(t) \delta\left(\tau - \frac{n}{W}\right) \tag{3}$$

onde os coeficientes $h_n(t)$ são definidos da forma

$$\hat{h}_n(t) = \frac{1}{W} \hat{h}\left(\frac{n}{W}; t\right). \tag{4}$$

A expressão (3) indica que o canal variante no tempo seletivo em frequência, com perfil contínuo, pode ser representado por um filtro transversal com *espaçamentos iguais* ($1/W$) e coeficientes variantes no tempo.

2.1.3–Simulação de Modelo de Sistema de Tx. em Tempo Discreto (Abordagem III)

Nesta abordagem, a simulação se baseia em modelos equivalentes que englobam quase todos os componentes de um sistema de transmissão. O canal GWSS-US é considerado como parte integrante deste sistema, e suas propriedades estatísticas exploradas para o desenvolvimento do algoritmo de simulação. Considera-se como entrada os símbolos gerados pelo modulador, e gera-se a saída equivalente do sistema envolvendo os filtros de transmissão e recepção, ruído, amostrador; e a resposta do canal GWSS-US, conforme mostrado na Figura 2. Dois enfoques são considerados: receptor casado com o sinal recebido e receptor casado com o pulso transmitido.

A configuração na qual se utiliza um filtro casado com o sinal recebido foi inicialmente analisada por FORNEY [11], e corresponde à estrutura parcial de um estimador ótimo (no sentido de máxima verossimilhança) para uma sequência digital na presença de IES, ruído branco gaussiano aditivo e *canal conhecido*. O modelo equivalente que serve de base para a simulação constitui-se em um filtro FIR com coeficientes variantes no tempo e espaçamentos múltiplos do intervalo de símbolo (T)^{4,7}

Deve ser observado que, a rigor, um algoritmo de simulação baseado neste modelo não poderia abordar uma transmissão em *canal aleatório*, a menos que seja utilizado para estabelecer um limitante de desempenho, supondo um caso ideal em que o receptor é perfeitamente casado ao sinal recebido.

Para as técnicas de simulação que consideram um filtro de recepção fixo, com taxa de amostragem igual à de símbolo, é possível demonstrar^{4,6} que o modelo equivalente para o sistema de transmissão apresentado na Figura 2 pode ser dado por um filtro FIR com coeficientes variantes no tempo e espaçamentos múltiplos do intervalo de símbolo, tal como para a configuração com filtro casado ao sinal recebido. No entanto, esta proposta se mostra mais flexível que a anterior, uma vez que é possível utilizá-la para um sistema que tenha na recepção um filtro de qualquer natureza. Além disso, observa-se que este modelo pode ser utilizado para a simulação de sistemas de transmissão com taxa de amostragem múltipla da de símbolo.

2.2. Simulação baseada em modelos físicos

Esta abordagem é empregada principalmente para sistemas faixa-larga (sistemas CDMA, por exemplo), em que o intervalo de símbolo do sinal transmitido é significativamente menor que o espalhamento de atrasos do canal, de modo que a resolução de atrasos no receptor se torna bastante elevada, e diversas versões atrasadas do sinal passam a ser individualmente discriminadas. Nestes casos o modelo GWSS-US não seria adequado, uma vez que ele atribui a resposta do canal (associada a um valor de atraso fixo) à combinação de diversas versões atrasadas do sinal, com valores de atrasos muito próximos entre si, a ponto de não serem discriminados no receptor.

Instantaneamente, a resposta do canal em banda básica neste modelo é dada pela seguinte expressão

$$h_t(\tau) = \sum_{k=1}^K A_k \delta(\tau - \tau_k) e^{j\theta_k} \quad (5)$$

onde τ_k , A_k e ϕ_k representam, respectivamente, o valor de atraso, a amplitude complexa e o desvio de fase associados ao k -ésimo percurso; e K é o número de percursos proporcionados pelo canal no instante t^* . O meio de propagação é portanto descrito pelo conjunto de variáveis aleatórias $\{a_1, \theta_1, \tau_1, a_2, \tau_2, \dots\}_{t_1}$, $\{a_1, \theta_1, \tau_1, a_2, \tau_2, \dots\}_{t_2}$, ..., cujo comportamento estatístico deve ser estudado para a caracterização do desvanecimento.

A expressão acima não deve ser confundida com (1), que define a resposta de um canal GWSS-US com perfil discreto de valores de atraso. Naquele caso, os valores de atraso eram considerados invariantes no tempo, e determinados a partir de um comportamento *médio* do canal dado pelo perfil de potência por atraso. Além disso, em (1), o modelo estatístico

* na expressão (5), para simplificar a notação, a dependência destes parâmetros com t não é explicitada

das amplitudes (Rayleigh) admite a composição de diversas versões atrasadas do sinal, com valores de atraso próximos entre si.

Pode-se destacar na literatura duas técnicas de simulação que se baseiam neste modelo: a técnica desenvolvida por HASHEMI em [12] e IWAI et alli em [2].

A base da simulação desenvolvida por HASHEMI consiste em gerar sucessivas respostas instantâneas do canal, com propriedades estatísticas muito próximas às verificadas no extenso trabalho de medidas realizado por TURIN et al. em [13]. O modelo simulado pode ser associado a um experimento hipotético, no qual um móvel adquire amostras da resposta do canal ao longo de vários pontos de um percurso, como mostra a Figura 4(a). Para cada ponto, representa-se a resposta impulsional do canal instantaneamente (equação (5)), tal como o mostrado na Figura 4(b). A resposta do canal ao longo do tempo fica, portanto, caracterizada pelo “conjunto” de respostas instantâneas mostrado na Figura 4(c)

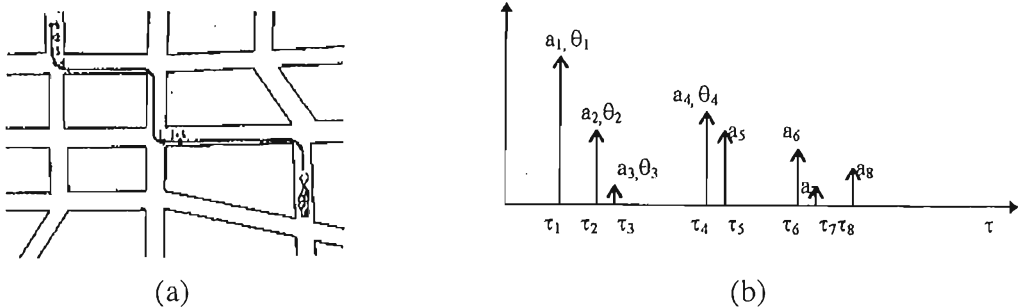
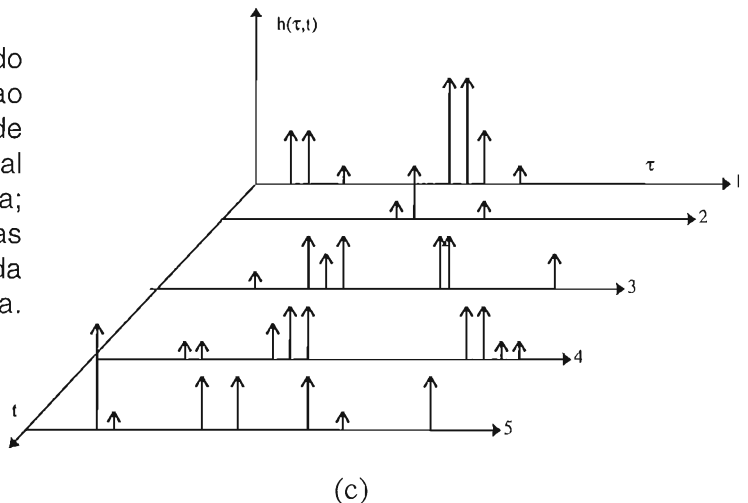


Figura 4 – (a) Móvel adquirindo amostras da resposta do canal ao longo do tempo; (b) Exemplo de resposta instantânea do canal obtido em um ponto da trajetória; (c) Seqüência de respostas instantâneas obtidas ao longo da trajetória.



A preocupação maior, nesta técnica, é atribuir um modelo estatístico adequado à distribuição dos valores de atrasos, à correlação entre parâmetros de respostas instantâneas adjacentes e à correlação entre parâmetros de uma mesma resposta instantânea.

A técnica de IWAI, por sua vez, considera que o surgimento de raios ao longo do tempo é governado por um processo de Poisson, com taxa $N/\Delta T$, onde N e ΔT representam,

respectivamente, o número médio de raios contidos em uma resposta instantânea e o tempo médio de sobrevivência de cada raio. Assim sendo, a separação temporal entre o surgimento de dois raios consecutivos é determinada por uma variável aleatória, t_g , com fdp exponencial dada por

$$p(t_g) = \frac{N}{\Delta T} \exp\left(-\frac{Nt_g}{\Delta T}\right). \quad (6)$$

Além disso, neste modelo, atribui-se um período de sobrevivência para cada raio, determinado por uma variável aleatória, t_d , com fdp exponencial e valor esperado ΔT , ou seja

$$p(t_d) = \frac{1}{\Delta T} \exp\left(-\frac{t_d}{\Delta T}\right). \quad (7)$$

Modelando-se a geração e duração dos raios desta forma, pode-se provar que em um determinado instante de tempo, o número de raios existentes em uma resposta instantânea (variável K na expressão (5)) é uma variável aleatória com distribuição de Poisson.

3. CONCLUSÕES

Este trabalho desenvolveu uma análise conjunta dos métodos de simulação disponíveis para o canal móvel, produzindo, como resultado, uma classificação das diversas propostas. Procurou-se destacar as principais vantagens e desvantagens associadas a cada uma das alternativas, bem como o tipo de aplicação à qual se destina.

A Figura 1 ilustra a classificação estabelecida aqui para os métodos de simulação. Destaca-se, nesta figura, a existência de duas principais classes de modelos, GWSS-US e “modelos físicos”, os quais diferem entre si pelas hipóteses admitidas para a caracterização da resposta do canal. Identificou-se três diferentes tipos de abordagem sob o modelo GWSS-US. A abordagem I representa os métodos que procuram simular a resposta do canal propriamente dita, enquanto que as abordagens II e III caracterizam-se por implementar técnicas semi-analíticas, que incluem *simulação e análise* para a geração do canal inserido em um sistema de transmissão.

Alguns trabalhos complementam a análise realizada aqui, e estabelecem comparações entre as diversas técnicas e modelos por meio de simulação e/ou desenvolvimentos matemáticos. Em [14] e [15] realiza-se uma avaliação de desempenho de algumas técnicas apresentadas neste artigo, com base em critérios relacionados a “precisão” e esforço computacional. Em [15] desenvolve-se ainda uma análise para o modelo “físico” de chegada dos raios (modelo de Poisson), a fim de demonstrar a convergência entre este modelo e o modelo GWSS-US. Com base nesta demonstração é possível concluir que a gaussianidade da resposta do canal depende, basicamente, da taxa de chegada das cópias atrasadas e do intervalo de símbolo do sinal transmitido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PARSONS, J. D., *The Mobile Radio Propagation Channel*, Pentech Press, 1992.
2. IWAI, H. e KARASAWA Y., “Wideband Propagation Model for the Analysis of the Effect of the Multipath Fading on the Near – Far Problem in CDMA Mobile Radio Systems”, *IEEE Trans. Comm.*, Vol. E 76-B, pp-103-112, Fev. 1992.
3. SCHULZE, H., “Stochastic Models and Digital Simulation of Mobile Channels” (em Alemão), U.R.S.I. / ITG Conf. In Kleinheubach 988, Germany (FR), Proc. Kleinheubach Berichte by the German PTT, Darmstadt, vol. 32, pp 473 - 483, 1989.
4. HÖHER P., “A Statistical Discrete Time Model for the WSSUS Multipath Channel”, *IEEE Trans. Vehic. Techn.*, Vol. VT – 41, pp 461-8, Nov 1992.
5. MÜLLER A., “Simulation of Multipath Fading Channels Using the Monte Carlo Method”, Conferência IEEE 1994.
6. YIP K-W. e NG T-S., “Efficient Simulation of Digital Transmission over WSSUS Channels”, *IEEE Trans. Comm.*, Vol 43, pp 2907-2913, Dez 1995.
7. YIP K-W. e NG T-S., “Karhunen-Loève Expansion of the WSSUS Channel Output and Its Application to Efficient Simulation”, *J. Sel. Areas Comm.*, Vol. 15, Maio 1994.
8. CRESPO, P. M. e JIMÉNEZ J., “Computer Simulation of Radio Channels Using a Harmonic Decomposition Technique”, *IEEE Trans. On Vehicular Techn.*, Vol. 44, Nº 3, pp 414-419, Agosto 1995.
9. KAILATH T., *Channel Characterization: Time Variant Dispersive Channels*, New York, Mc Graw Hill, 1961.
10. BELLO, P. A., “Characterization of Randomly Time-Variant Linear Channels”, *IEEE Trans. on Comm. Sys.*, Vol. CS - 11, pp 360 - 393, Dez. 1963 .
11. FORNEY, G. D., “Maximum - likelihood sequence estimation of digital sequences in the presence of intersymbol interference”, *IEEE Trans. on Inform. Theory*, Vol. IT-18, pp 363-378, Maio 1972.
12. HASHEMI, H., “Simulation of the Urban Radio Propagation” *IEEE Trans. on Vehic. Techn.*, Vol VT-28, pp 213-225, 1989.
13. TURIN G. L., CLAPP F. D., JOHNSTON T.L., FINE S.B. e LAVRY D., “A Statistical Model of Urban Multipath Propagation”, *IEEE Trans. on Vehic. Techn.*, VT-21, pp 1-9, Fev 1972 .
14. GUIMARÃES et alli, “Comparação de Métodos de Simulação de Canais com Desvanecimento Rápido - Parte I: Avaliação Numérica”, Anais do XV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Recife, Pe, Set 1997.
15. GUIMARÃES A. G. “Modelagem e Simulação de Canais Móveis”, Tese de Mestrado, Jan 1998.