

Um Método para Síntese e Análise dos Principais Efeitos de Propagação em Canais de Rádio Móvel

Thiago Henrique de Paiva Rolim, Aline de Oliveira Vono,
Camila Paduan Duarte Novaes, Dayani Adionel Guimarães

Instituto Nacional de Telecomunicações

Resumo – Este artigo apresenta os resultados do projeto de uma ferramenta *software*, baseada em *LabView*[®], para síntese e análise de fenômenos de propagação em canais de rádio móvel. Os fenômenos perda por propagação, sombreamento e desvanecimento por múltipercursos são sintetizados e combinados em uma parte do *software* e em outra parte são separados. O objetivo é permitir que sinais coletados em campo possam ser desmembrados nos fenômenos citados para que possam ser estudados e caracterizados separadamente. Os resultados fazem parte do projeto de iniciação científica SURVEY que está sendo desenvolvido pelos autores no INATEL.

Abstract – This article presents the results of the project for synthesizing and analyzing, via software, propagation phenomena typically encountered in mobile radio environments. Path loss, shadowing and multi-path fading effects are synthesized and combined by one part of the software and are analyzed by another part. This project aims at making possible separate the contributions of the above effects from field acquired signals. This will permit the independent study and characterization of these effects separately from each other. The results presented here are part of the project SURVEY that is being undertaken by the authors at INATEL.

Palavras-chaves – Caracterização de canal de rádio móvel, comunicações móveis, propagação.

I. INTRODUÇÃO

A propagação em ambientes móveis terrestres está sujeita à degradação devida à combinação de três efeitos principais: perda no percurso em grande escala (*area mean variation*), sombreamento em grande escala (*local mean variation*) e desvanecimento por múltipercursos em pequena escala (*instantaneous variation*). A perda no percurso em grande escala é causada pela atenuação do sinal devido à distância entre transmissor e receptor e sua variação segue o inverso da n -ésima potência dessa distância, onde n é conhecido como expoente de perdas. O valor de n está situado entre 2 e 5, sendo o valor 4 um número comumente aceito para ambientes de comunicações móveis urbanas. O valor 2 refere-se à propagação em espaço livre e a variação do sinal recebido segue a conhecida fórmula de Friis [1]. Um valor maior do que 2 indica a influência de estruturas artificiais e do relevo. Ambientes urbanos densos sempre têm valores

de n da ordem de 4 ou 5. Ambientes suburbanos têm n abrangendo valores de 2 a 4.

O sombreamento é causado pelo contorno do terreno e outras obstruções entre o transmissor e o receptor, em termos da média local da potência recebida (*local mean power*). Isto corresponde a variações ao redor do valor da média em área (*area mean power*) e segue tipicamente uma função densidade de probabilidade log-normal [2], independente da distância entre transmissor e receptor [1].

Sinais recebidos por um terminal móvel em ambientes urbanos são provenientes de um número infinitamente grande de percursos de propagação. Isto é conhecido como propagação por múltipercursos. Os múltiplos percursos de propagação são causados por reflexão, difração e/ou espalhamento da onda de rádio em estruturas naturais (elevações no terreno, vegetação, etc.) e construções (prédios, postes, etc.).

O sinal composto na antena receptora sofre variações de fase e de amplitude devido aos múltiplos percursos que interferem entre si, construtiva ou destrutivamente, dependendo da posição do receptor. Essas variações são chamadas de desvanecimento por múltipercursos e ocorrem numa taxa que depende diretamente da velocidade de movimento do terminal móvel e/ou dos objetos ao redor deste. A Fig. 1 sintetiza e ilustra o fenômeno descrito.

A Fig. 2 mostra um registro típico do desvanecimento instantâneo de uma portadora não modulada recebida por um terminal móvel (sombreamento e perda no percurso são constantes no intervalo mostrado). Como pode ser visto, as flutuações da envoltória do sinal podem variar cerca de 30 dB em relação à média local. A profundidade das flutuações é função do tipo de desvanecimento. Quando existir um percurso de propagação predominante, ou linha de visada entre o transmissor e receptor, o desvanecimento se caracteriza como desvanecimento de Rice e as variações seguem a função densidade de probabilidade (FDP) de Rice. Quando o sinal chega à antena por todas as direções com praticamente a mesma potência média, tem-se o desvanecimento Rayleigh e, neste caso, as flutuações da envoltória seguem a FDP de Rayleigh. Em um sistema de comunicação móvel terrestre típico, o último tipo é predominante e representa o pior caso.

Outra distribuição comumente citada na literatura, a FDP Nakagami- m , é a mais geral delas e abrange os casos Rayleigh e Rice. Traz a possibilidade de caracterizar um canal no qual as propriedades variam do desvanecimento Rayleigh para o Gaussiano puro

com a mudança do valor do parâmetro m . Maiores detalhes sobre FDPs para modelagem de propagação de ondas de rádio podem ser encontrados nas recomendações da ITU [3].

Este artigo encontra-se organizado da maneira que se segue. A seção II discute o processo de síntese dos principais efeitos de propagação no canal de rádio móvel: perda no percurso, sombreamento e desvanecimento por multipercursos. A seção III apresenta o processo de desmembramento (análise) dos efeitos sintetizados a partir de um sinal que representa a combinação de todos eles. A seção IV conclui o trabalho com propostas de futuras investigações.

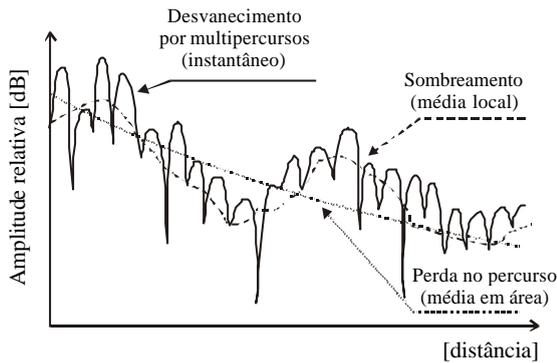


Figura 1 - Ilustração de três fenômenos que influenciam as variações do sinal recebido em um ambiente de comunicação móvel.

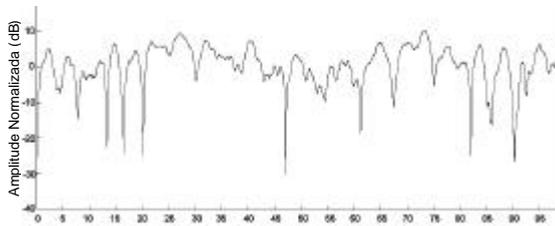


Figura 2 - Registro típico do desvanecimento por multipercursos.

II. SÍNTESE DO SINAL

Foi sintetizado, via *software*, um sinal que atravessa um canal de rádio móvel, levando em consideração os três fenômenos descritos na seção I e ilustrados na Fig. 1. O intuito foi comprovar o funcionamento do sistema de análise proposto na seção III. Para a implementação de ambos os sistemas foi utilizado o *LabView*[®], da National Instruments, uma linguagem de programação gráfica que utiliza blocos funcionais [5]. A obtenção do sinal sob os efeitos do canal de rádio móvel foi feita a partir da combinação adequada dos sinais que representam o desvanecimento por multipercursos instantâneo, a perda no percurso e o sombreamento. O processo de obtenção de cada um desses sinais é descrito a seguir.

II.1. SINAL COM FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE RAYLEIGH

As variações de amplitude de um sinal sob desvanecimento plano por multipercursos seguem a função densidade de probabilidade Rayleigh [1]. A síntese do sinal sujeito a este desvanecimento foi feita através da expressão onde R é o sinal cuja amplitude

$$R = \sqrt{G_I^2 + G_{II}^2} \quad (1)$$

possui FDP Rayleigh; G_I e G_{II} são variáveis aleatórias correspondentes a diferentes fontes de ruído gaussiano branco [6].

No *software LabView*[®] foi implementada a expressão anterior na forma de diagrama em blocos. Esses blocos foram dispostos como na Fig. 3.

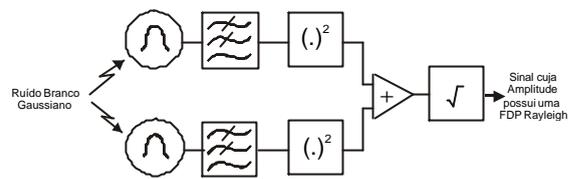


Figura 3 - Obtenção do Sinal cuja amplitude possui uma FDP Rayleigh

É interessante notar a presença de dois filtros de frequência passa-baixas idênticos. Esses filtros são do tipo Butterworth de 4.^a ordem, com frequência de corte de 60Hz¹. Têm a função de reduzir a intensidade das componentes de alta frequência dos sinais de ruído gaussiano branco (gerado com desvio padrão igual a 1). Reduz, assim, sua taxa de variação e, conseqüentemente, a taxa de variação do sinal cuja amplitude possui FDP Rayleigh. Esta é uma maneira de se gerar um sinal que possua FDP com a correlação temporal controlável pela frequência de corte dos filtros representados na Fig. 3.

O sinal cuja amplitude, normalizada em relação à sua média, possui FDP Rayleigh e seu histograma, em escala linear, obtidos a partir do *LabView*[®], são apresentados nas Figs. 4 e 5.

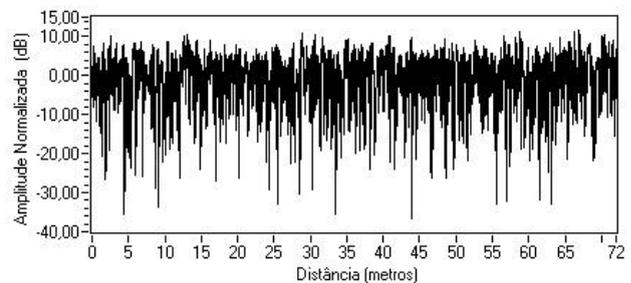


Figura 4 - Intervalo de 72 metros do sinal sintetizado com FDP Rayleigh.

¹ $F_c \equiv$ desvio Doppler máximo = $\frac{v}{\lambda} = \frac{(20\text{m/s})(900 \times 10^6 \text{Hz})}{3 \times 10^8 \text{m/s}}$

Verifica-se na Fig. 5 que o formato do histograma do sinal sintetizado corresponde ao formato da FDP Rayleigh. Para melhor visualização do aspecto do sinal com esta FDP, mostrado na Fig. 4, apresenta-se na Fig. 6 uma ampliação do início da excursão desse sinal. As variações de potência do sinal com desvanecimento por multipercursos seguem a distribuição chi-quadrada, com 2 graus de liberdade (Fig. 7) [7].

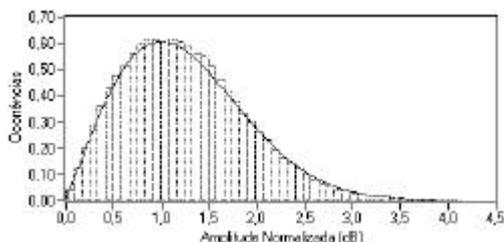


Figura 5 - Histograma normalizado do sinal Rayleigh sintetizado e função de Rayleigh.

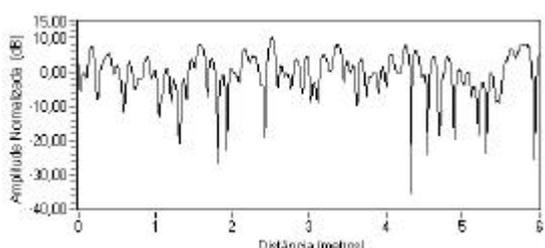


Figura 6 - Intervalo de 6 metros do sinal sintetizado com FDP Rayleigh.

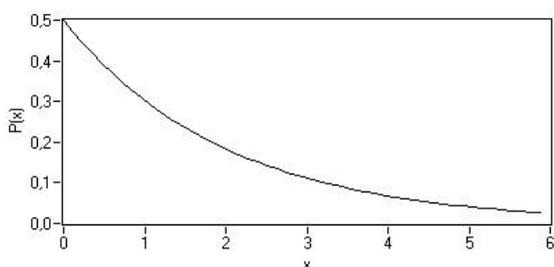


Figura 7 - Função representativa da distribuição Chi-Quadrada com 2 graus de liberdade.

II.2. SINAL COM FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE LOG-NORMAL

O sinal cujas variações seguem uma FDP log-normal (FDP gaussiana em escala logarítmica) representa o sombreamento [2]. O sinal log-normal, seu histograma (sintetizados pelo *software LabView*[®]) e o diagrama em blocos utilizado para sua geração são apresentados nas Figs. 8, 9 e 10, respectivamente.

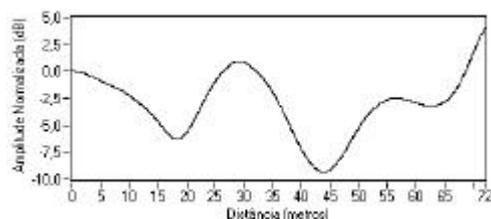


Figura 8 - Trecho de 75 metros do sinal com FDP Log-Normal

Na Fig. 11 mostra-se uma excursão maior do sinal cuja amplitude possui FDP log-normal, para melhor visualização. Pode ser observado na Fig. 10 que, para a obtenção do sinal log-normal, foi feita a potência de 10 do sinal gaussiano de modo que, ao se extrair o logaritmo dessa resultante, obtém-se um sinal com amplitude de FDP gaussiana. Também é representada a presença de um filtro passa-baixas do tipo Butterworth de 4.^a ordem para diminuir a taxa de variação do sinal gerado, através da rejeição de altas frequências. A frequência de corte do filtro foi ajustada empiricamente de modo que a velocidade da variação do sombreamento seja muito menor que a velocidade de variação do desvanecimento por multipercursos, situação que ocorre tipicamente na prática.

É importante lembrar que os filtros utilizados nos diagramas das Figs. 3 e 10 mantêm na saída a distribuição do sinal de entrada, pois sabe-se que se um sinal com distribuição gaussiana atravessa um sistema linear (no caso, o filtro), a distribuição do sinal de saída do sistema continua sendo gaussiana.

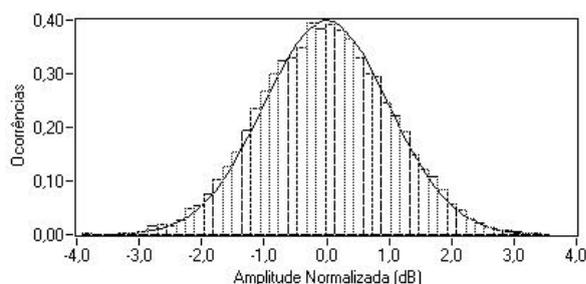


Figura 9 - Histograma normalizado do sinal Log-normal sintetizado e Função Log-normal.

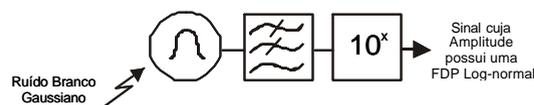


Figura 10 - Diagrama em blocos do circuito gerador do sinal Log-Normal

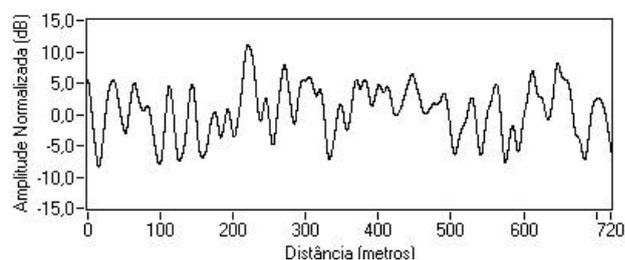


Figura 11 - Trecho de 720 metros do sinal com FDP Log-Normal.

II.3. SINAL QUE REPRESENTA A PERDA NO PERCURSO

O efeito da perda no percurso é percebido em um sinal que tem sua intensidade decrescente com a distância. Esse efeito representa a atenuação do sinal pelo canal de rádio móvel devido à distância entre transmissor e receptor. Quando analisado com o eixo

das distâncias na escala logarítmica, seu aspecto é o de uma rampa linear e quando este eixo está em escala linear, visualiza-se um sinal exponencialmente decrescente, como mostrado nas Figs. 12 e 13, respectivamente.

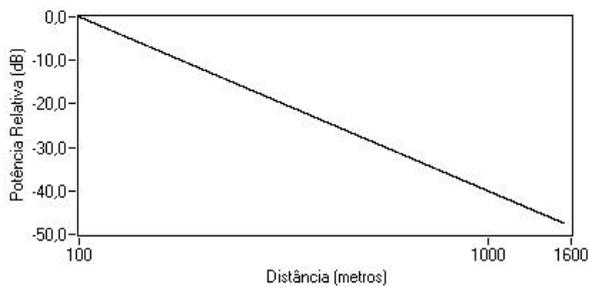


Figura 12 - Sinal na forma de rampa linear (eixo horizontal em escala logarítmica).

A obtenção do sinal sob efeito da atenuação no percurso foi realizada a partir da seguinte equação [8]

$$P_r(d) = P(d_0) - 10 \log \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \quad (2)$$

onde $P_r(d)$ é a potência do sinal, em dBm, à distância d , $P(d_0)$ é a potência do sinal, em dBm, na posição d_0 , n é o expoente da perdas no percurso (considerado 4, tratando-se de um ambiente urbano denso), d é a distância a partir do transmissor e d_0 é a distância de referência.

A fórmula anterior é válida para trajetos que distam de no mínimo 100 metros do transmissor. Por isto, os dois gráficos anteriores tiveram esse valor como início do trajeto. Essa distância mínima deve ser maior que a distância de Fraunhofer [1]. Para este caso, foi considerado um trajeto de 1440 metros, uma frequência de 900 MHz e, conseqüentemente, um comprimento de onda de 0,333m. De [1], a distância de Fraunhofer é

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3)$$

onde D é a maior dimensão física da antena e $d_0 > d_f$.

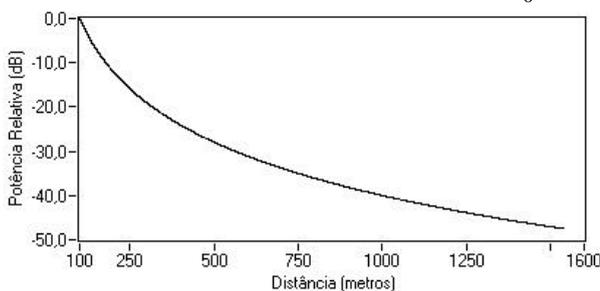


Figura 13 - Sinal na forma de rampa exponencial (eixo horizontal em escala linear).

Considerando uma antena com dimensão de, no máximo, 4 metros, pode-se admitir d_0 igual a 100 metros e a equação acima será satisfeita. No LabView® foi utilizado um bloco capaz de sintetizar um sinal com variação dada em (2). A Fig. 14 mostra este bloco.

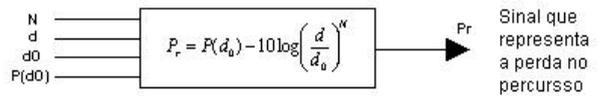


Figura 14 - Diagrama em blocos do sinal de perda no percurso.

Após a síntese destes três sinais, efetua-se a soma dos sinais de sombreamento e perda no percurso, em escala logarítmica [8]. O sinal de desvanecimento por multipercursos tem efeito multiplicativo [9]. Toma-se o logaritmo deste sinal, a fim de somá-lo com o sinal de sombreamento e perda no percurso, já em escala logarítmica. Assim, tem-se o sinal composto pelos três efeitos mostrado na Fig. 15.

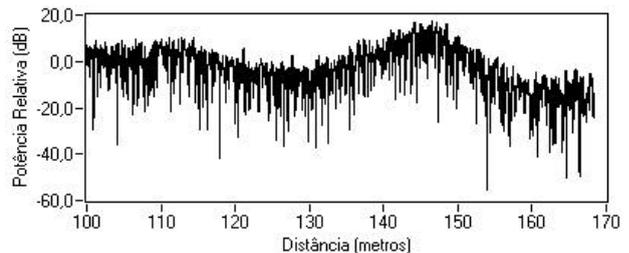


Figura 15 - Aspecto de um sinal recebido em um canal de rádio móvel.

O sinal representa um trajeto de 72 metros percorrido pelo receptor, onde é possível visualizar claramente o sinal com desvanecimento por multipercursos e o sombreamento. É quase imperceptível a perda no percurso, por esta ser pequena no trecho considerado e estar mascarada pelo efeito do sombreamento. O gráfico da Fig. 16 mostra um trajeto maior, onde se observa com maior clareza essa perda.

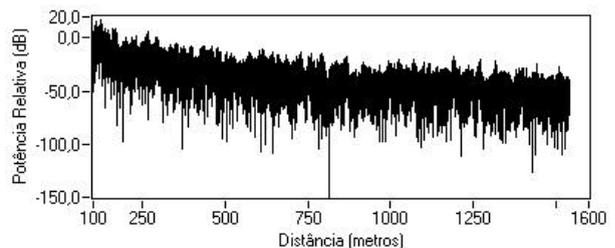


Figura 16 - Aspecto de um sinal recebido em um canal de rádio móvel.

III. ANÁLISE DO SINAL

Essa seção descreve a parte do software que permite separar cada uma das três componentes de degradação de sinal citadas. A extração é feita passo a passo, sendo cada um dos sinais obtido através de filtros de média movente (*moving average filters*) [10]. Na Fig. 17(A) é mostrado o resultado de um processo de média movente, onde foi subtraído o sinal com desvanecimento por multipercursos, em escala logarítmica, a fim de obter-se a média local do sinal, incluindo a perda no percurso. A figura 18 ilustra o processo para um trajeto de 1440 metros, onde fica

mais clara a visualização do sinal composto pelo efeito de perda no percurso e pelo sombreamento.

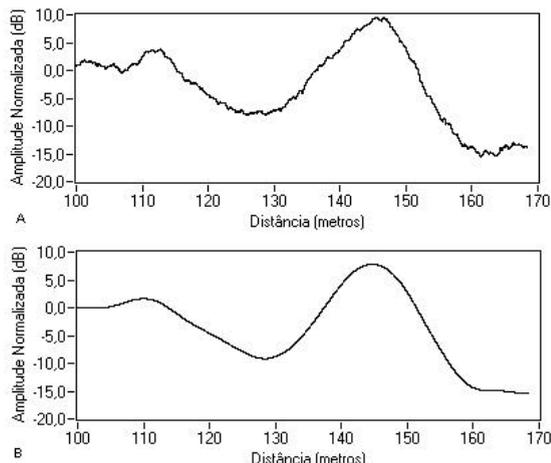


Figura 17 - (A) Resultado do processo de média movente tendo-se retirado a componente Rayleigh do sinal composto e (B) soma dos sinais sintetizados de sombreamento e perda no percurso, em dB.

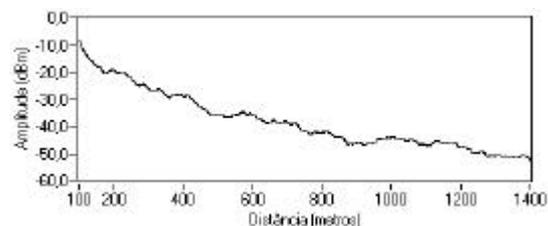


Figura 18 - Mesma representação da Figura 17 (A), porém com visualização em um trecho maior.

Como pode-se perceber na Fig. 17, o sinal resultante do processo de retirada do sinal Rayleigh do sinal composto total tem grande semelhança com o sinal sintetizado composto pelos efeitos de perda no percurso e sombreamento apenas.

Na Fig. 19 tem-se o resultado do processo de média movente para obtenção da média em área, em escala logarítmica (perda no percurso). O processo foi realizado no sinal composto pelo sombreamento e perda no percurso, ambos em escala logarítmica. Observa-se que há grande similaridade entre a curva de perdas no percurso sintetizada e aquela obtida pelo processo de análise.

O processo de filtragem por média movente, além de efetuar a eliminação das altas frequências, tem como amostras de saída uma média aritmética das amostras de entrada dentro de sua janela de atuação (número de amostras consideradas). A *i*-ésima amostra de saída do filtro pode ser obtida a partir da expressão [10]

$$y[i] = \frac{1}{N + M + 1} \sum_{k=-N}^M x[i+k] \quad (4)$$

onde *i* é o índice das amostras de saída do filtro de média movente, *y*[*i*] é o valor da *i*-ésima amostra de saída, *N* é o número de pontos do sinal de entrada considerados no cálculo da média antes do ponto *i* e *M* é o número de pontos do sinal de entrada considerados no cálculo da média após o ponto *i* na janela movente.

Nas implementações realizadas os valores de *M* e *N* foram considerados iguais (com valor igual à metade da janela utilizada). Por esse motivo, o sinal resultante “perde” *M* = *N* pontos no início e no fim do processo de média movente. Para comprovar a eficácia do filtro de média movente e para dar suporte à determinação do tamanho adequado da janela em cada processo de filtragem, em cada estágio de saída desse filtro foi medido o erro médio quadrático entre os sinais sintetizado e analisado. Esse valor deve estar o mais próximo possível de zero. A equação do Erro Médio Quadrático entre dois vetores (dois conjuntos de amostras) é

$$EMQ(\mathbf{V}, \mathbf{K}) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (v_i - k_i)^2 \quad (5)$$

onde **V** e **K** são os vetores do sinal sintetizado e analisado, respectivamente, e *N* é o número de elementos em **V** e **K** [9]. No primeiro processo de média movente foi utilizado *M* = *N* = 400 amostras e no segundo *M* = *N* = 1500 amostras.

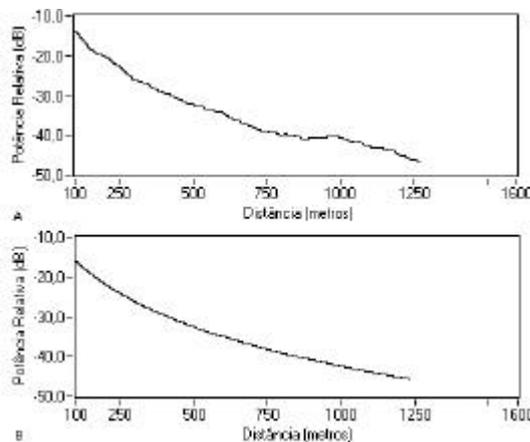


Figura 19 - (A) Resultado do processo de média movente para retirada da componente Log-normal e (B) sinal na forma de rampa exponencial sintetizada.

Para a recuperação do sinal com FDP Rayleigh (Fig. 20) correspondente ao desvanecimento por multipercursos, em escala logarítmica, o sinal composto total (Figs. 15 e 16) é subtraído do sinal de saída do primeiro processo de média movente (Figs. 17 e 18). A Fig. 20 mostra a grande similaridade dos sinais Rayleigh sintetizado e separado do sinal composto total.

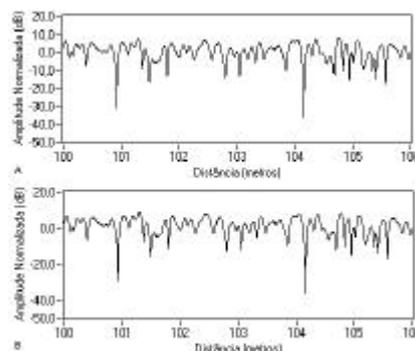


Figura 20 - Trecho de sinal cuja amplitude tem FDP Rayleigh (A) obtido na análise e (B) sintetizado.

IV. CONCLUSÃO

Foram apresentados neste artigo os resultados de uma ferramenta *software*, desenvolvida em *LabView*[®], para a síntese e análise de fenômenos de propagação em canal de rádio móvel. Convém realçar que a parte de análise é mais importante, pois permite estudar um canal de rádio móvel real. A parte de síntese serviu para provar a eficácia da parte de análise. O objetivo do trabalho é obter uma ferramenta, simples, fácil de usar e versátil para aplicações na análise de sinais coletados em campo. Outra razão para o desenvolvimento desse sistema é o uso no ensino de conceitos de comunicações móveis.

Como continuidade dos trabalhos de iniciação científica dos autores, pretende-se fazer com que os sinais sintetizados possam ser gerados como saída de uma placa de aquisição e geração de sinais. Os sinais de saída serão utilizados para modular em amplitude uma portadora senoidal de tal sorte que os principais efeitos de propagação em um canal de rádio móvel possam ser simulados em laboratório. Pretende-se ainda implementar um detector de envoltória adequado para que um sinal coletado em campo, ou aquele simulado em laboratório, possa servir como entrada de uma placa de aquisição de dados, permitindo a completa análise das principais degradações causadas na propagação em canais de rádio móvel.

REFERÊNCIAS

- [1] T. S. Rappaport - *Wireless Communications – Principles and Practice*. New Jersey, IEEE Press/ Prentice-Hall, 1996.
- [2] W. C. Jakes and D. C. Cox (editors), *Microwave Mobile Communications*. 2nd Ed., New Jersey, IEEE Press, 1994.
- [3] Rec. ITU-R PN.1057 – *Probability Distributions Relevant to Radiowave Propagation Modelling*. 1994.
- [4] T. H. de P. Rolim, C. P. D. Novaes, A. de O. Vono, and D. A. Guimarães - SURVEY: A System for Propagation Analysis in Mobile Communication Environments. *International Conference on Engineering and Technology Education (Intertech 2002)*. Santos - SP, Março de 2002.
- [5] National Instruments - *LabView User Manual*. National Instruments Corporation, 2000.
- [6] O. C. Branquinho - *Simulador de efeito de multipercorso em canal de rádio móvel*. Tese de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Agosto de 1991.
- [7] J. G. Proakis - *Digital Communications*. 3rd Ed. New York, McGraw-Hill, 1995.
- [8] D. A. Guimarães - *Sistemas de Comunicações Móveis*. Santa Rita do Sapucaí, Instituto Nacional de Telecomunicações, 2000.
- [9] M. D. Yacoub - *Foundations of Mobile Radio Engineering*. Boca Raton, CRC Press, 1993.
- [10] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, S. H. Nawab - *Signals & Systems*. 2nd Ed., New Jersey, Prentice-Hall, 1997.

SOBRE OS AUTORES

Thiago Henrique de Paiva Rolim nasceu em Fortaleza, CE, em 07 de julho de 1982. Formou-se técnico em eletrônica pela Escola Técnica de Eletrônica Francisco Moreira da Costa de Santa Rita do Sapucaí em 2000. Atualmente está cursando o V Período do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Nacional de Telecomunicações e participa de trabalhos de iniciação científica na área de comunicações em sistemas móveis.

Aline de Oliveira Vono nasceu em Santa Rita do Sapucaí, MG, em 11 de setembro de 1979 e diplomou-se como técnica em eletrônica pela Escola Técnica de Eletrônica Francisco Moreira da Costa de Santa Rita do Sapucaí em 1998. Atualmente está cursando o VII Período de Engenharia Elétrica do Instituto Nacional de Telecomunicações de Santa Rita do Sapucaí e desenvolve atividade de iniciação científica na área de Comunicações em Sistemas Móveis.

Camila Paduan Duarte Novaes nasceu em Piracicaba, SP, em 06 de maio de 1980. Formou-se como técnica em Eletrônica pela Escola Técnica de Eletrônica Francisco Moreira da Costa, de Santa Rita do Sapucaí e está cursando o VIII Período de Engenharia Elétrica do Instituto Nacional de Telecomunicações. Faz parte do grupo de iniciação científica que atua no desenvolvimento de projetos associados ao Survey, sob a supervisão do Prof. Dayani A. Guimarães.

Dayani Adionel Guimarães nasceu em Carrancas, MG, em março de 1969. Em 1987, 1994, 1998 obteve os títulos de Técnico em Eletrônica, Engenheiro Eletricista, Especialista em Administração com ênfase em Gerência de RH e Mestre em Engenharia Elétrica, pela ETEFMC, INATEL, FAI e UNICAMP, respectivamente. Em atividades profissionais anteriores desenvolveu sensores e equipamentos para instrumentação industrial e controle e também foi Supervisor de Produção e Supervisor de Engenharia de Produtos na SENSE Sensores e Instrumentos, de 1988 a 1993. Desde de janeiro de 1995 é Professor do INATEL, onde é responsável pela estrutura que dá suporte às atividades de ensino prático dos Departamentos de Telecomunicações e Eletrônica & Eletrotécnica. Encontra-se em fase de elaboração de tese de Doutorado na UNICAMP. Suas pesquisas incluem aspectos gerais das comunicações móveis, especificamente sistemas CDMA Multiportadoras e esquemas de codificação para canais com desvanecimento.

E-mail: dayani@inatel.br