

Medidas de banda estreita em 1800 MHz e as Distribuições de Desvanecimento $\kappa - \mu$ e $\eta - \mu$

Fábio César Martins, Hermano Barros Tercius e Michel Daoud Yacoub

Resumo—Este artigo apresenta os resultados de uma análise sobre as distribuições de desvanecimento mais conhecidas: Rayleigh, Rice, Nakagami-m e as novas distribuições: $\eta - \mu$ e $\kappa - \mu$. A análise foi feita sobre um conjunto de medidas, realizadas por um equipamento modular de aquisição de dados - EADMEC, em prédios do campus da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP e verificou-se que as distribuições de desvanecimento $\eta - \mu$ e $\kappa - \mu$ conseguem ajustar os dados onde as de Rayleigh, Rice e Nakagami-m não conseguem um bom ajuste.

Palavras-Chave—Medidas, aquisição de dados, desvanecimento, distribuições de desvanecimento, distribuição $\eta - \mu$, distribuição $\kappa - \mu$.

Abstract— This article presents the results of an analysis on the most known fading distributions: Rayleigh, Rice, Nakagami-m, and the $\eta - \mu$ e $\kappa - \mu$ new distributions. The analysis was made on a set of measures taken with a modular instrument for data collection - EADMEC, in buildings located on the campus of the State University of Campinas - UNICAMP and it was verified that the $\eta - \mu$ e $\kappa - \mu$ fading distributions can adjust the data where the Rayleigh, Rice and Nakagami-m do not perform good adjustments.

Keywords—Measurements, data acquisition, fading, fading distributions, distribution $\eta - \mu$, distribution $\kappa - \mu$.

I. INTRODUÇÃO

A envoltória de um sinal com desvanecimento de curto prazo em sistemas de comunicação sem fio é descrita por um grande número de distribuições de probabilidade. Dentre as mais conhecidas citam-se: Rayleigh, Rice, Hoyt (Nakagami-q), Nakagami-m e Weibull. É largamente conhecido que nenhuma dessas distribuições oferece ajustes adequados para todas as situações experimentadas em um ambiente real de propagação. Em particular, a de Rice é utilizada para os casos em que há linha de visada e a de Nakagami-m para os casos em que apenas componentes de multipercurso estão presentes. Uma das vantagens de se trabalhar com a distribuição Nakagami-m é que matematicamente ela é mais tratável que a de Rice e também pode fornecer uma boa aproximação para as situações de propagação com visada direta. Além disso o seu parâmetro m confere-lhe flexibilidade para ajustes possíveis. Por outro lado, muitas situações são encontradas em que nenhuma dessas distribuições se ajustam adequadamente a dados obtidos em campo [1], [2].

Recentemente, duas novas distribuições gerais de desvanecimento foram propostas na literatura [3]: a distribuição $\kappa - \mu$ e a distribuição $\eta - \mu$. A distribuição $\kappa - \mu$ inclui como casos

particulares a Rice, Nakagami-m, Rayleigh e Semi-Gaussiana Positiva. A distribuição $\eta - \mu$ inclui como casos particulares a Hoyt (Nakagami-q), Nakagami-m, Rayleigh e Semi-Gaussiana Positiva. Para validar estas novas distribuições foram realizadas medidas *in situ* (transmissor e receptor móvel localizados em prédios distintos) em 12 prédios do campus da UNICAMP. A análise dos dados demonstrou que estas novas distribuições conseguem fazer o ajuste dos dados onde as distribuições citadas não conseguem um bom ajuste.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a seção II apresenta a configuração do transmissor utilizado na campanha de medidas. A seção III descreve os principais módulos do equipamento de medida e a sua integração. A seção IV caracteriza os prédios onde as medidas foram realizadas e o seu processo de validação. A seção V mostra de forma sucinta as duas novas distribuições gerais de desvanecimento propostas, a distribuição $\kappa - \mu$ e a distribuição $\eta - \mu$. A seção VI apresenta os resultados. A seção VII traz as conclusões do trabalho.

II. TRANSMISSOR

O transmissor foi constituído por um gerador e um amplificador de rádio frequência (RF). O gerador foi sintonizado em 1800 MHz e a potência de saída ajustada em 3.0 dBm. A saída do gerador alimenta a entrada do amplificador de RF, com ganho de 30 dB, proporcionando em sua saída, computada as perdas com cabos e conectores, uma potência de 32.2 dBm. Na saída do amplificador de potência foi acoplada, através da ligação de um cabo de 22m, uma antena monopolo omnidirecional, com ganho de 11 dBi, transmitindo uma potência efetivamente irradiada (EIRP) de 4.18 W. Foram consideradas as perdas nos conectores e cabos.

O conjunto transmissor-antena foi instalado na cobertura do prédio E da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da UNICAMP. O transmissor foi alocado no interior de uma sala localizada na cobertura conforme ilustrado na Figura 1.

III. EQUIPAMENTO DE MEDIDA

Um equipamento de aquisição de dados modular (i.e., EADMEC) foi especialmente projetado e construído para realizar as medições em banda estreita no interior de edificações. O EADMEC mede, na recepção, o nível de potência de uma portadora sintonizada em 1800 MHz. O espaçamento entre as amostras é determinado em função do comprimento de onda a fim de propiciar a reprodução com fidelidade dos desvanecimentos rápidos e lentos do sinal recebido. A Figura 2 mostra o diagrama de blocos do equipamento.

Fábio César Martins, Departamento de Computação, Universidade Estadual de Londrina - UEL, Londrina, Brasil, E-mail: fabio@uel.br, Hermano Barros Tercius e Michel Daoud Yacoub, Departamento de Comunicações, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP, Campinas, Brasil, E-mails: hermanob@decom.fee.unicamp.br, michel@decom.fee.unicamp.br.



Fig. 1. Vista da cobertura do prédio E da FEEC.



Fig. 3. Roda dentada e circuito amostrador.

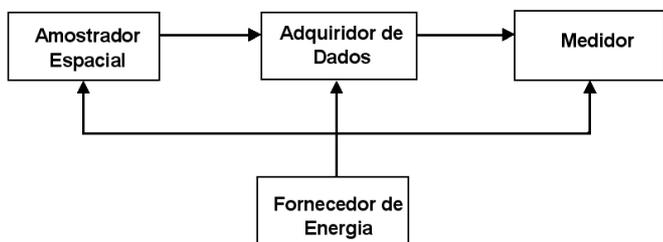


Fig. 2. Diagrama de blocos do EADMEC.

O amostrador espacial provê o controle espacial do equipamento, sendo composto por uma roda dentada e por um circuito amostrador. A roda dentada consiste de uma chapa de alumínio dentada (57 dentes) acoplada a uma quinta roda e ao circuito amostrador, conforme ilustra a Figura 3. O circuito amostrador tem a função de transformar a passagem dos dentes da roda em um trem de pulsos a ser aplicado à placa de aquisição que compõe o módulo adquiridor de dados. O adquiridor de dados é responsável pela aquisição e armazenamento das medidas, sendo composto por uma placa de aquisição de dados e pelo conjunto computador-software. O software de controle foi desenvolvido em LabVIEW[®] 6.1 e possui funções que auxiliam a execução e monitoramento das medidas, possibilitando a verificação do andamento do trabalho em tempo real. A Figura 4 apresenta a interface com o usuário do software. Na parte superior dessa interface, o usuário pode selecionar o arquivo onde as amostras serão armazenadas e acompanhar a evolução do seu tamanho durante os períodos de aquisição. Na parte intermediária, estão situados o controle, que dispara e interrompe a aquisição de dados, e uma janela de visualização dos sinais adquiridos nos canais analógicos utilizados (retraço, sinal de RF e codificador). Abaixo dessa janela, são exibidas a velocidade de deslocamento do EADMEC, o número de amostras válidas recolhidas até o momento e a distância percorrida.

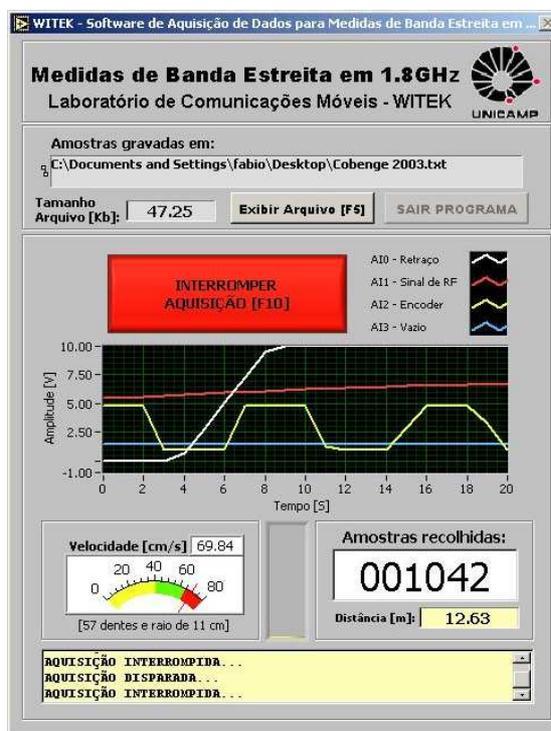


Fig. 4. Interface do software com o usuário.

O medidor de sinal tem a função de medir o nível de potência do sinal, sendo composto por quatro componentes: antena, amplificador, atenuador variável e analisador de espectro. O fornecedor de energia tem por objetivo permitir a mobilidade irrestrita do equipamento e torná-lo auto-suficiente com relação ao suprimento de energia, propiciando desta forma, uma autonomia adequada para a realização das medidas em campo. É composto por duas baterias automotivas comuns de 12 volts e capacidade igual a 63 ampéres-hora para alimentar os componentes que funcionam em corrente contínua (DC) e um inversor que fornece energia para os componentes que operam com corrente alternada (AC). A Figura 5 mostra o EADMEC, apresentando a integração dos quatro módulos

descritos.



Fig. 5. Vista frontal do EADMEC.

IV. DESCRIÇÃO DOS PRÉDIOS

As medidas foram realizadas em doze prédios localizados no campus da UNICAMP. Alguns destes prédios situam-se a poucos metros do transmissor, como, por exemplo, o prédio da Pós-Graduação da FEEC, Figura 6, e outros a algumas centenas de metros, como o prédio de salas de aula da Faculdade de Engenharia Civil (FEC), Figura 7. Os prédios apresentam alturas que variam de um a três andares e características construtivas e arquitetônicas semelhantes.

No total foram realizadas medidas em 29 andares, em salas e corredores, e gerados 183 arquivos de dados. Para cada arquivo foram coletadas, no mínimo, 10.000 amostras e especificamente no ginásio de esportes, Figura 8, foram



Fig. 6. Prédio da Pós-Graduação da FEEC.

gerados 10 arquivos de 100.000 amostras cada, totalizando 1 milhão de amostras.



Fig. 7. Prédio de salas de aula da FEC.

A cada arquivo gerado, ou seja, medidas efetuadas em uma sala ou corredor, realizava-se um processamento no arquivo (cálculo da média do sinal recebido, visualização do desvanecimento lento e rápido) para validar ou não as medidas efetuadas. No caso de não validação o processo era realizado novamente e assim de forma sucessiva até a validação das medidas. No final do experimento, os 183 arquivos validados



Fig. 8. Vista lateral do ginásio de esportes da FEEC.

geraram uma base de dados de 307 MB.

V. DISTRIBUIÇÕES GERAIS DE DESVANECIMENTO

A. Distribuição $\kappa - \mu$

A distribuição $\kappa - \mu$ é uma distribuição geral de desvanecimento, pois inclui as distribuições de desvanecimento mais conhecidas: Rice e Nakagami-m, conforme demonstrado em [3]. As distribuições de Rice e Nakagami-m, por sua vez, incluem a distribuição de Rayleigh. A distribuição de Nakagami-m também inclui a distribuição Semi-Gaussiana Positiva. Desta forma, todas as distribuições citadas podem ser obtidas a

partir da distribuição $\kappa - \mu$. A distribuição Log-normal também pode ser bem aproximada pela distribuição $\kappa - \mu$.

Para um sinal de desvanecimento com envoltória r e envoltória normalizada $\rho = r/\hat{r}$, $\hat{r} = \sqrt{E(r^2)}$ é o valor *rms* de r , a função densidade de probabilidade é dada por:

$$p(\rho) = \frac{2\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(\mu\kappa)} \rho^\mu \exp(-\mu(1+\kappa)\rho^2) I_{\mu-1}(2\mu\sqrt{\kappa(1+\kappa)\rho}) \quad (1)$$

onde $\kappa \geq 0$ é a razão entre a potência total das componentes dominantes e a potência total das ondas espalhadas, $\mu = \frac{E^2(r^2)}{\text{Var}(r^2)} \times \frac{1+2\kappa}{(1+\kappa)^2}$ (ou de forma equivalente, $\mu = \frac{1}{\text{Var}(\rho^2)} \times \frac{1+2\kappa}{(1+\kappa)^2}$), e $I_\nu(\cdot)$ é a função de Bessel modificada de primeira espécie e ordem arbitrária ν (ν é real).

Para um sinal de desvanecimento com potência $w = r^2/2$ e potência normalizada $\omega = w/\bar{w}$, onde $\bar{w} = E(w)$, a função densidade de probabilidade é dada por: .

$$p(\omega) = \frac{\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(\mu\kappa)} \omega^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(-\mu(1+\kappa)\omega) I_{\mu-1}(2\mu\sqrt{\kappa(1+\kappa)\omega}) \quad (2)$$

Os estimadores dos parâmetros κ e μ podem ser calculados por:

$$\kappa = \frac{2(1-b) + \sqrt{1-b}}{4b-3} \quad e$$

$$\mu = \frac{1+2\kappa}{(1+\kappa)^2(E[\rho^4]-1)}$$

onde $b = \frac{E[\rho^6]-3E[\rho^4]+2}{2(E[\rho^4]-1)^2}$. A distribuição de Rice pode ser obtida a partir da distribuição $\kappa - \mu$ fazendo-se $\mu = 1$ em (1). Neste caso, o parâmetro κ coincide com o parâmetro k de Rice. A partir da distribuição de Rice, fazendo-se $\kappa = k = 0$ (ou seja, $\mu = 1$ e $\kappa \rightarrow 0$ na distribuição $\kappa - \mu$) a distribuição de Rayleigh pode ser obtida de forma exata. Do mesmo modo, a partir da distribuição de Rice para $\kappa = k = m - 1 + \sqrt{m(m-1)}$ (ou seja, $\mu = 1$ e $\kappa = k = m - 1 + \sqrt{m(m-1)}$ na distribuição $\kappa - \mu$), onde m é o parâmetro de Nakagami, a distribuição Nakagami-m pode ser obtida de forma aproximada.

A distribuição de Nakagami-m pode ser obtida a partir da distribuição $\kappa - \mu$ fazendo-se $\mu = 1$ e $\kappa \rightarrow 0$ em (1). Neste caso, o parâmetro μ coincide com o parâmetro m de Nakagami. Para $\mu = m = 1$ na distribuição de Nakagami (ou seja, $\mu = 1$ e $\kappa \rightarrow 0$ na distribuição $\kappa - \mu$) a distribuição de Rayleigh pode ser obtida de forma exata. Do mesmo modo, fazendo-se $\mu = m = 0.5$ na distribuição de Nakagami (o que equivale a fazer $\mu = 0.5$ e $\kappa \rightarrow 0$ na distribuição $\kappa - \mu$) a distribuição Semi-Gaussiana Positiva pode ser obtida de forma exata.

A distribuição Log-normal, dada como uma função de m em (13) de [4], também pode ser aproximada pela distribuição $\kappa - \mu$ para $e^{-1} \leq \rho \leq e$, e para $\kappa \rightarrow 0$ e $\mu = m$.

B. Distribuição $\eta - \mu$

A distribuição $\eta - \mu$ é um a distribuição geral de desvanecimento que inclui as distribuições de Hoyt, Nakagami-m, Rayleigh e a Semi-Gaussiana Positiva como casos especiais, conforme demonstrado em [3].

Para um sinal de desvanecimento com envoltória r e envoltória normalizada $\rho = r/\hat{r}$, sendo $\hat{r} = \sqrt{E(r^2)}$ o valor *rms* de r , a função densidade de probabilidade $\eta - \mu$ é dada por:

$$p(\rho) = \frac{4\sqrt{\pi}\mu^{\mu+\frac{1}{2}}h^\mu}{\Gamma(\mu)H^{\mu-\frac{1}{2}}} \omega^{\mu-\frac{1}{2}} \exp(-2\mu h\omega) I_{\mu-\frac{1}{2}}(2\mu H\omega) \quad (3)$$

onde $h = \frac{2+\eta^{-1}+\eta}{4}$, $H = \frac{\eta^{-1}-\eta}{4}$, $\mu = \frac{E^2(r^2)}{\text{Var}(r^2)} \times \frac{1+\eta^2}{(1+\eta)^2}$ (ou de forma equivalente, $\mu = \frac{1}{\text{Var}(\rho^2)} \times \frac{1+\eta^2}{(1+\eta)^2}$, $\Gamma(\cdot)$ é a função Gamma, $I_\nu(\cdot)$ é a função de Bessel modificada de primeira espécie e ordem arbitrária ν (ν é real), $\mu \geq 0$ e $0 \leq \eta \leq 1$.

Para um sinal de desvanecimento com potência $w = r^2/2$ e potência normalizada $\omega = w/\bar{w}$, onde $\bar{w} = E(w)$, a função densidade de probabilidade $\eta - \mu$ é dada por:

$$p(\omega) = \frac{2\sqrt{\pi}\mu^{\mu+\frac{1}{2}}h^\mu}{\Gamma(\mu)H^{\mu-\frac{1}{2}}} \omega^{\mu-\frac{1}{2}} \exp(-2\mu h\omega) I_{\mu-\frac{1}{2}}(2\mu H\omega) \quad (4)$$

Os estimadores dos parâmetros η e μ podem ser calculados por:

$$\eta = \frac{1 - \sqrt{-1 - 2\mu + 2\mu E[\rho^4]}}{1 + \sqrt{-1 - 2\mu + 2\mu E[\rho^4]}} \quad e$$

$$\mu_1 = \frac{-3 + 3E[\rho^4] \pm \sqrt{1 - 6E[\rho^4] + 9E[\rho^4]^2 - 4E[\rho^6]}}{4 - 6E[\rho^4] + 2E[\rho^6]}$$

A distribuição de Hoyt pode ser obtida a partir da Distribuição $\eta - \mu$ de forma exata fazendo-se $\mu = 0.5$. A partir da distribuição de Hoyt a Semi-Gaussiana Positiva pode ser obtida fazendo-se $\eta \rightarrow 0$. Da mesma forma, a partir da distribuição de Hoyt a distribuição de Rayleigh pode ser obtida de forma exata fazendo-se $\eta = 1$.

A distribuição de Nakagami-m pode ser obtida de forma exata a partir da distribuição $\eta - \mu$ para $\mu = m$ e $\eta \rightarrow 0$, ou do mesmo modo, para $\mu = m/2$ e $\eta \rightarrow 1$.

A distribuição Semi-Gaussiana Positiva é obtida fazendo-se $\mu = 0.5$ e $\eta \rightarrow 0$, ou de forma equivalente, fazendo-se $\mu = 0.25$ e $\eta \rightarrow 1$.

A distribuição de Rayleigh pode ser obtida fazendo-se $\mu = 1$ e $\eta \rightarrow 0$, ou de forma equivalente, fazendo-se $\mu = 0.5$ e $\eta \rightarrow 1$.

A distribuição de Rice pode ser obtida de forma aproximada fazendo-se $\mu = (1+k)^2/(1+2k)$ e $\eta \rightarrow 0$, ou de forma equivalente, fazendo-se $2\mu = (1+k)^2/(1+2k)$.

A distribuição Log-normal, dada como uma função de m em (13) de [4], também pode ser aproximada pela distribuição $\eta - \mu$ para $e^{-1} \leq \rho \leq e$, e para $\mu = m$ e $\eta \rightarrow 0$, e para $\mu = m/2$ e $\eta \rightarrow 1$.

Para um dado valor do parâmetro m de Nakagami, as curvas da distribuição $\kappa - \mu$ estão *sempre* acima da curva

de Nakagami- m enquanto as curvas da distribuição $\eta - \mu$ encontram-se *sempre* abaixo desta, como pode-se observar pela Figura 9, onde $m = 1.25$. Observa-se também que as duas curvas coincidem entre si na própria curva de Nakagami- m . Esta característica é interessante e prática, pois para um dado conjunto de dados o parâmetro m é calculado e os dados plotados no plano de desvanecimento. Se os dados estiverem acima da curva de Nakagami- m a melhor distribuição para ajustá-los é a distribuição $\kappa - \mu$, caso contrário a melhor distribuição é a distribuição $\eta - \mu$.

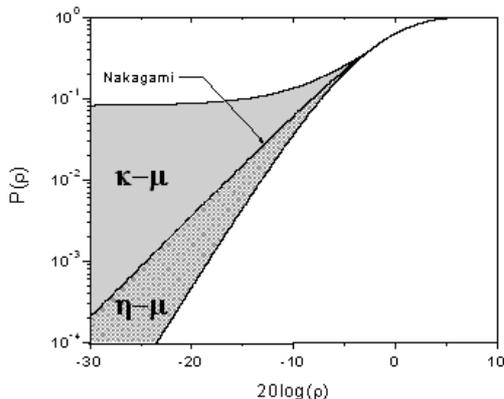


Fig. 9. Nakagami- m como fronteira entre $\eta - \mu$ e $\kappa - \mu$.

VI. ANÁLISE DOS RESULTADOS

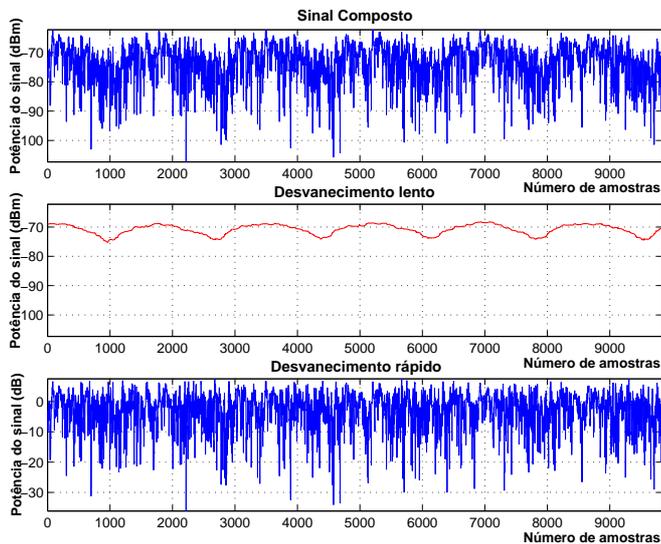


Fig. 10. Desvanecimento lento e rápido - sala de aula da Pós-Graduação - FEEC.

No primeiro caso analisa-se um arquivo com medidas realizadas em uma sala de aula localizada no andar térreo do prédio da Pós-Graduação da FEEC, Figura 6. A Figura 10 ilustra o sinal composto representado pela potência do sinal versus o número de amostras do arquivo, o desvanecimento lento,

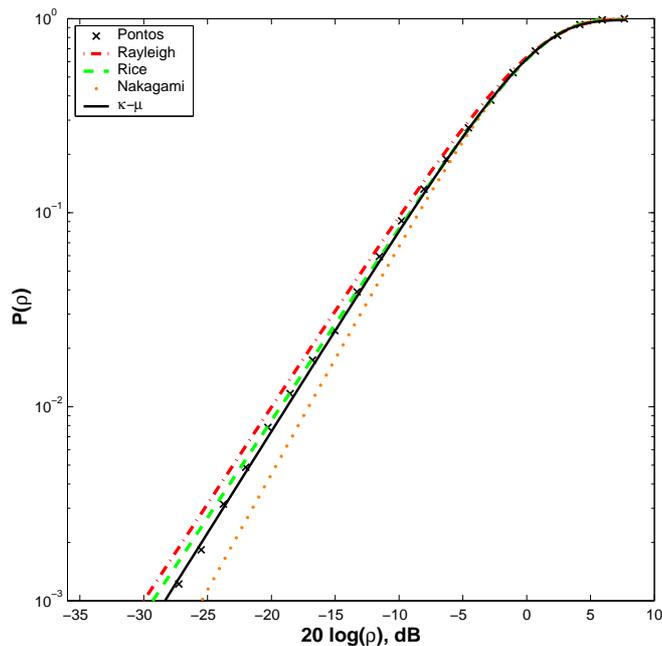


Fig. 11. Ajuste dos dados pela distribuição $\kappa - \mu$.

estimado pelo método da janela móvel, e o desvanecimento rápido, obtido pela subtração do desvanecimento lento do sinal composto. Pode-se observar que nenhuma das distribuições faz um bom ajuste dos dados, sendo a distribuição de Rice a que apresenta o melhor ajuste. A distribuição $\kappa - \mu$ é utilizada para ajustar os dados com $\kappa = 0.55$ e $\mu = 1.048$. Pela análise da Figura 11 observa-se que a distribuição $\kappa - \mu$ faz um ajuste melhor dos dados do que a distribuição de Rice.

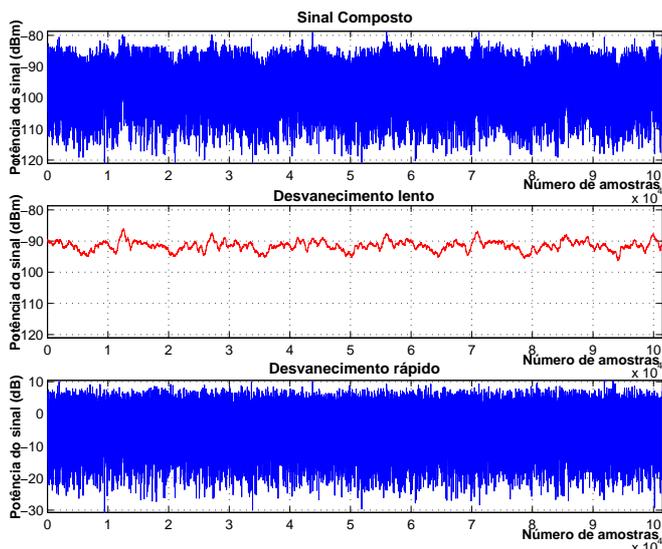


Fig. 12. Desvanecimento lento e rápido - quadra do ginásio da FEF.

No segundo caso analisa-se um arquivo com medidas realizadas na quadra do ginásio de esportes da FEF, ilustrado na Figura 8. A Figura 12 ilustra o sinal composto, o desvanecimento lento e o desvanecimento rápido. Observa-se que

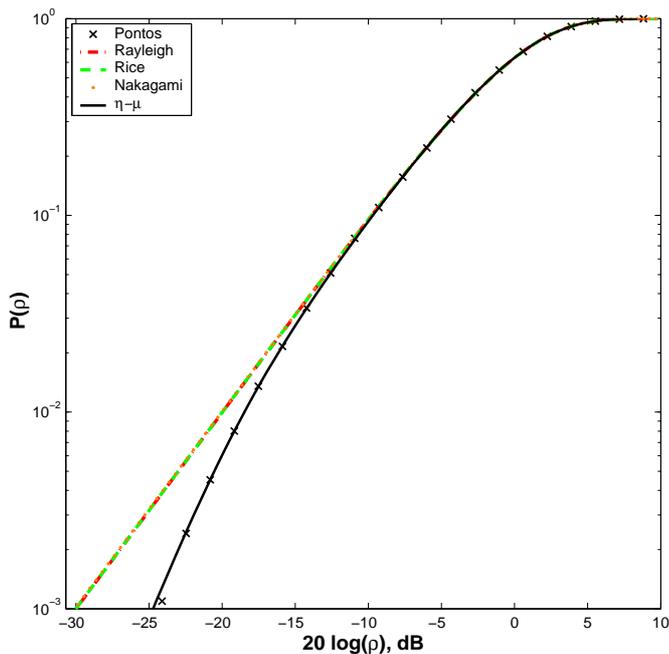


Fig. 13. Ajuste dos dados pela distribuição $\eta - \mu$.

nenhuma das distribuições consegue ajustar os dados. A distribuição $\eta - \mu$ é utilizada para ajustá-los com $\eta = 0.005$ e $\mu = 0.990$. Pela análise da Figura 13 vê-se que a distribuição $\eta - \mu$ ajusta muito bem os dados.

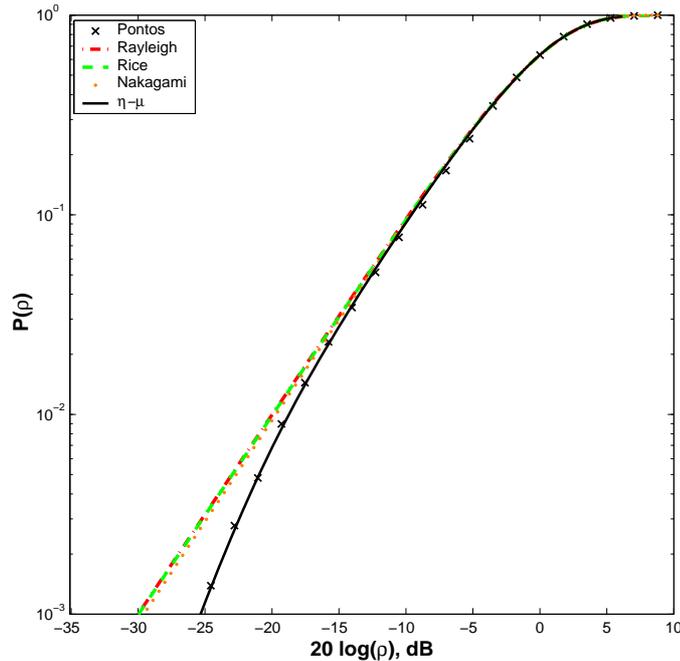


Fig. 15. Ajuste dos dados pela distribuição $\eta - \mu$.

dizer que todas as situações testadas puderam ser ajustadas ou pela distribuição $\kappa - \mu$ ou pela distribuição $\eta - \mu$.

VII. CONCLUSÕES

Uma campanha de medidas com o intuito de validar duas novas distribuições de probabilidade propostas na literatura foi realizada no campus da UNICAMP. As distribuições, nomeadas distribuição $\kappa - \mu$ e distribuição $\eta - \mu$, foram exaustivamente testadas, com um número significativo de dados coletados em 1.8 GHz. Verificou-se que em todas as situações testadas foi possível ajustar uma ou outra distribuição às medidas.

REFERÊNCIAS

- [1] J. D. Parsons, The Mobile Radio Channel, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Chichester, 1, 2000.
- [2] S. Stein, "Fading Channel Issues in System Engineering," IEEE J. Selected Areas in Commun., vol. 5, no. 2, pp. 68-89, Feb. 1987.
- [3] M. D. Yacoub, "General Fading Distributions," Revista Brasileira de Telecomunicações, v.17, p. 1-13, Junho 2002.
- [4] M. Nakagami, "The m-distribution - A general formula of intensity distribution of rapid fading," in Statistical Methods in Radio Wave Propagation, W. C. Hoffman, Ed. Elmsford, NY: Pergamon, 1960.

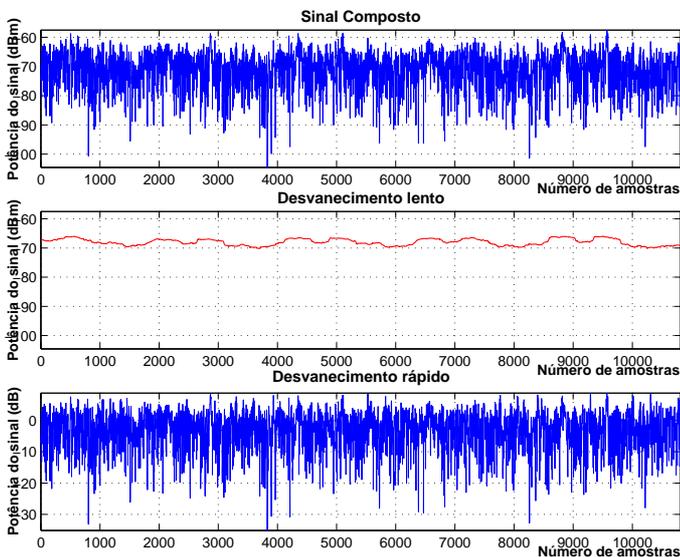


Fig. 14. Desvanecimento lento e rápido - sala de aula da Graduação - FEEC.

No terceiro caso analisa-se um arquivo com medidas realizadas em uma sala de aula localizada no andar térreo do bloco F da FEEC. A Figura 14 ilustra o sinal composto, o desvanecimento lento e o desvanecimento rápido. Pode-se observar novamente que nenhuma das distribuições consegue ajustar os dados. A distribuição $\eta - \mu$ é utilizada para ajustá-los com $\eta = 0.003$ e $\mu = 0.994$. Pela análise da Figura 15 vê-se que a distribuição $\eta - \mu$ ajusta muito bem os dados. Pode-se