

# Statistical Analysis of the Influence of People Movement and Antenna Radiation Pattern on Small-Scale Fading

Wellerson V. de Oliveira, Millena M. de M. Campos, Álvaro A. M. de Medeiros, Vicente A. de Sousa Jr

**Abstract**—This paper presents a statistical analysis of small-scale fading on static propagation environment due to the movement of people between antennas. We also analyze the influence of the antenna radiation pattern (omnidirectional and directional microstrip antenna) on narrowband-channel statistics. We evaluate the adherence of measured data to classical distributions (Rayleigh, Rice, Nakagami, and Weibull) with three hypothesis tests: Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises, and Anderson-Darling. Measurements are performed with low-cost equipment and using software-defined radio apparatus. The effect of temporal variation of the signal due to the movement of people is appraised by using two second-order statistics: the level crossing rate and the average fade duration. Our results endorse the fact that the scatters' movement also contributes to Doppler effect, and emphasize the importance of hypothesis tests on distribution fitting to measured data.

**Index Terms**—fading; hypothesis tests; second-order statistics.

## I. INTRODUÇÃO

Nos próximos anos é esperado um aumento de dispositivos móveis devido à aplicações de Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT). Os sistemas projetados para esse tipo de aplicação operam com baixas taxas de transmissão, i.e., com sinais de largura de banda frequência estreita. Além disso, visando a redução do consumo energético e aumento da cobertura, tais sistemas utilizam portadoras abaixo de 1 GHz.

Para conceber e aprimorar técnicas que melhorem o desempenho do sistema de comunicação sem fio, é necessário o conhecimento do ambiente em que ocorrerá a comunicação. De forma geral, um sinal de radiofrequência (RF) é acometido por dois tipos de desvanecimentos: o desvanecimento de larga escala, composto da perda de percurso e do sombreamento; e o desvanecimento de pequena escala [1]. A perda de percurso é a atenuação que o sinal de RF sofre devido principalmente à distância entre as antenas transmissoras e receptoras e é normalmente modelada de maneira determinística. O sombreamento diz respeito às variações de potência em torno da potência média do sinal recebido. Esta é modelada por uma

variável aleatória lognormal, com média zero e variância que depende do ambiente de propagação.

Por fim, o desvanecimento de pequena escala corresponde às variações rápidas do sinal devido às múltiplas componentes do sinal, que percorrem caminhos diferentes (multipercurso) e chegam ao receptor com amplitudes e fases aleatórias. Esse fenômeno atua de forma diferente em sinais de banda-larga e banda-estreita. No primeiro, o multipercurso causa réplicas atenuadas e retardadas do sinal transmitido, implicando em dispersão no tempo e seletividade em frequência. Já para sinais de banda-estreita, principal objeto de análise deste trabalho, o multipercurso causa desvanecimento profundo (*deep fading*) no sinal recebido, que caracteriza um canal não-seletivo (plano) em frequência. É importante destacar que o desvanecimento de pequena escala também inclui o efeito Doppler, caracterizado dispersão na frequência e seletividade no tempo, caso exista mobilidade significativa entre os transceptores ou nos espalhadores do sinal em torno da antena receptora. Esse efeito é responsável por uma variação temporal no sinal recebido, causando o desvanecimento rápido, outra denominação da seletividade temporal [2].

O desvanecimento de pequena escala é um efeito aleatório, portanto são necessárias ferramentas estatísticas para sua modelagem. Em posse das distribuições dos dados medidos, o objetivo é encontrar, dentre algumas distribuições candidatas, qual se adequa melhor às amostras obtidas. Na literatura [3], [4], algumas distribuições são tradicionalmente utilizadas para modelar o desvanecimento de pequena escala, entre elas: distribuição Rayleigh, distribuição Rice, distribuição Nakagami ou Nakagami-m e distribuição Weibull.

Este trabalho propõe-se apresentar a caracterização de um canal de banda estreita com base em medições realizadas no setor de aulas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). São explorados dois momentos distintos: com baixo e com alto fluxo de pessoas, medindo-se durante a realização das aulas e nos intervalos, respectivamente.

Além disso, são analisadas as possíveis alterações na caracterização do canal utilizando duas antenas de recepção distintas: um monopolo omnidirecional, que pode contemplar no sinal recebido componentes de todas as direções, e outra de microfita direcional, em que a maior parte do sinal recebido é captado no lóbulo principal. O objetivo dessa investigação é comparar os efeitos causados pelo fluxo de pessoas entre a antena transmissora e as diferentes antenas receptoras.

Para a análise das distribuições, esse trabalho contribui apresentando três ferramentas para medida de ajustes de dados

Os autores Wellerson V. de Oliveira e Vicente A. de Sousa Jr. são da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN. E-mails: {wellerson, vicente.sousa}@ufrn.edu.br. A autora Millena M. de M. Campos é do Instituto de Ciência e Tecnologia Sidia, Manaus, AM, Brazil. E-mail: millena.campos@sidia.com. O autor Álvaro A. M. de Medeiros é da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brazil. E-mail: alvaro@engenharia.ufjf.br. Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

que são pouco utilizadas para caracterização de canal. O resultado do teste de aderência é comparado com o erro médio, que usualmente é utilizado (junto com suas variações) para definir a distribuição de probabilidade mais apropriada para medições de RF.

Mesmo se tratando de um trabalho voltado a medição em banda-estreita e com transmissor e receptor parados, é feita também uma análise das estatísticas de segunda ordem do canal na tentativa de caracterizar o efeito Doppler causado pelo movimento das pessoas no ambiente. Assim, é possível verificar como o fluxo de pessoas, isto é, o movimento dos espalhadores do sinal, causa desvanecimento rápido.

Este artigo está dividido como a seguir. Na Seção II são apresentados os trabalhos relacionados, evidenciando as contribuições deste trabalho. Os materiais e métodos usados na investigação são mostrados na Seção III. A apresentação e discussão dos resultados de medição estão expostos na Seção IV. Finalmente, a Seção V traz as considerações finais do trabalho.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

A maioria dos trabalhos referentes à caracterização de canal utiliza alguma variação do cálculo de erro para a tarefa de definir a melhor distribuição de probabilidades para os dados medidos. Como exemplos, os autores de [3], [5] utilizam o erro percentual médio, e em [4], utilizam o desvio médio absoluto percentual. Apesar de apontarem um resultado, esse tipo de cálculo não apresenta as propriedades importantes de um teste de hipótese estatística (como o nível de significância, por exemplo).

Como base de estudo para caracterização dos efeitos Doppler, foram utilizados trabalhos relacionados às estatísticas de segunda ordem, especificamente a Taxa de Cruzamento de Nível (TCN) e a Duração Média do Desvanecimento (DMD). Muitos trabalhos tem buscado deduzir expressões fechadas partindo das distribuições de probabilidades. Em [1], [6]–[8] são deduzidas expressões fechadas da TCN e da DMD para as distribuições Rayleigh, Rice, Nakagami e Weibull, respectivamente. Em [9] é apresentada uma forma de calcular a TCN e a DMD a partir dos dados coletados, sem a necessidade de fórmulas fechadas.

Em relação ao esquema de medição utilizado, em [10] realizou-se medições com antenas estacionárias. O trabalho entretanto, abordou um ambiente completamente *indoor*. O presente trabalho apresenta medições obtidas no setor de aulas da UFRN que, apesar de ser coberto, é um ambiente misto *outdoor/indoor*.

Finalmente, considerando a caracterização de canal com diferentes tipos de antenas, a maioria dos trabalhos abordam portadoras de alta frequência, e.g., ondas milimétricas [11], ondas sub-THz [12], ou caracterização em banda-larga [13]. Segundo o conhecimento dos autores, há uma escassez de literatura de análises para diferentes tipos de antenas na caracterização do desvanecimento de pequena escala.

Assim, a contribuição deste trabalho se materializa nos seguintes aspectos:

- São utilizados três testes estatísticos para verificar a aderência das amostras com as distribuições tradicionais.

É feita também uma comparação entre os resultados desses testes e o erro médio, evidenciando a melhor qualidade dos testes estatísticos;

- A caracterização do desvanecimento rápido devido ao movimento dos espalhadores é apresentada. A motivação é analisar o efeito Doppler resultante de espalhadores em movimento e com ambiente misto *indoor/outdoor*, muito comum em um ambiente com fluxo de pessoas (similar a um ambiente universitário);
- Investigação da influência do tipo de antena nas estatísticas do desvanecimento de pequena escala.

## III. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção é dividida em cinco partes, apresentando os seguintes conteúdos: (A) projeto e montagem do *setup* de medições incluindo a metodologia utilizada para as coletas de dados; (B) métodos estatísticos utilizados para processar os dados (filtragem de janela móvel para separar o desvanecimento de pequena escala do sinal recebido) e estimação dos parâmetros das distribuições (Rayleigh, Rice, Nakagami e Weibull); (C) testes de aderências utilizados no trabalho; (D) estatísticas de segunda ordem que caracterizam o Doppler; e (E) as ferramentas de *software* utilizadas.

### A. Setup e Metodologia de Medição

O *setup* de medições deste trabalho é uma cadeia de comunicação em Rádio Definido por Software (RDS), composto por um transmissor e dois receptores com diferentes antenas. Foi utilizada a *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) N210 da Ettus Research, que funciona como uma plataforma genérica para processamento de sinais de rádio [14].

Além dos componentes básicos do RDS, a USRP possui interface de comunicação *Ethernet* com um computador, que, além de configurar o SDR, é encarregado de realizar tarefas de processamento de sinais em *software*. Para desenvolvimento, foi utilizado o *software* GNU Radio, pois tem código aberto e oferece um conjunto de blocos funcionais (moduladores, codificadores, entre outros), existindo a possibilidade de desenvolver novos blocos ou alterar os existentes de acordo com a necessidade do usuário [15].

O diagrama do sistema de transmissão está apresentado na Figura ???. O sistema de transmissão implementado GNU Radio (Figura 2) tem uma portadora centrada em 790 MHz<sup>1</sup>. O sinal é emitido por uma antena omnidirecional acoplada. Para o devido funcionamento omnidirecional e na frequência desejada, a antena telescópica RH799, mostrada na Figura 3(a), foi adaptada, adicionando-se um plano terra e ajustando sua dimensão para 21,5 cm.

O sistema de radiofrequência e a coleta de dados são idênticas para os dois receptores, diferenciando apenas as antenas. Os dados são aferidos pela USRP. A antena omnidirecional de modelo MA 760 (Figura 3(b)) é do fabricante Rohde & Schwarz. O diagrama de *Voltage Standing*

<sup>1</sup>A frequência de 790 MHz é pertencente à faixa liberada pela ANATEL no terceiro trimestre de 2018 [16]. Esta faixa era ocupada pelos canais de TV, e agora está alocada para os sistemas 4G, banda larga móvel, no Brasil.



Fig. 1. Sistema de transmissão.

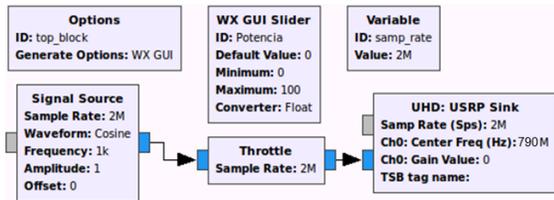
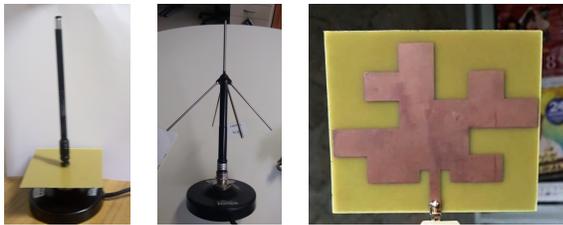


Fig. 2. Blocos do transmissor no GNU Radio.

Wave Ratio (VSWR), função que descreve a potência refletida da antena, está apresentado na Figura ??.



(a) Antena transmissora. (b) Antena receptora omnidirecional. (c) Antena receptora de microfita.

Fig. 3. Antenas utilizadas no setup de medição.

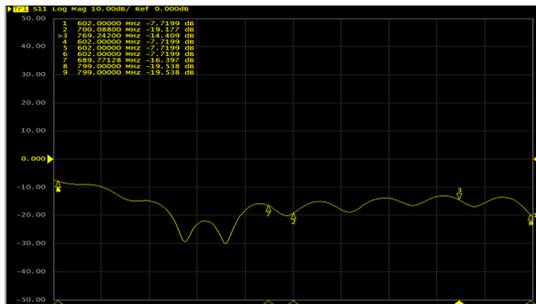


Fig. 4. Diagrama de VSWR da antena omnidirecional.

A segunda antena receptora, de microfita (Figura 3(c)), tem diagrama de radiação característico direcional, o diagrama obtido no projeto da antena é mostrado na Figura ??.

Esta foi projetada com base em [17], e fabricada com fibra de vidro e cobre. O diagrama de VSWR está mostrado na Figura ??.

O resultado foi uma antena *dual band*, podendo operar nas faixas de 787-795 MHz e 935-950 MHz.

As medições foram realizadas no Setor 4 de aulas da UFRN. O transmissor foi posicionado no corredor perpendicular ao principal, com maior fluxo de pessoas (como indicado na Figura 7(a)). Já os receptores foram posicionados no corredor principal, separados entre si de forma a atender o limite mínimo para campo distante (distância de Fraunhofer) e aproximadamente à 15 m de distância do transmissor (Figura 7(b)). Todas as antenas estavam a 1,6 m de altura.

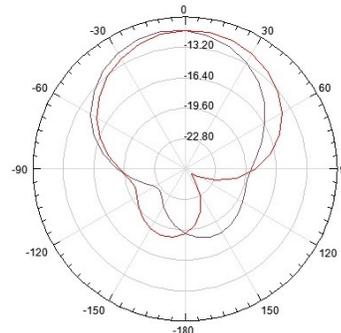


Fig. 5. Diagrama de radiação da antena de microfita.

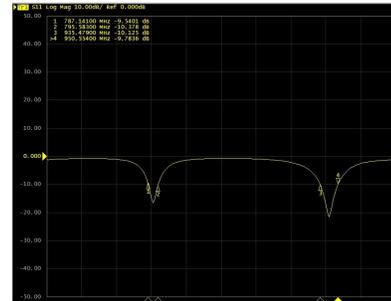


Fig. 6. Diagrama de VSWR da antena de microfita.

Objetivando explorar os diferentes cenários proporcionados pelo fluxo de pessoas, realizou-se medições em 2 dias nos três turnos, com um total de dez medições, cinco no cenário de alto fluxo de pessoas (intervalo entre aulas) e cinco no cenário de baixo fluxo (durante as aulas). Para cada medição foram tomadas em média 2400 amostras simultaneamente com as duas antenas. Esse número de amostras é compatível com resultados apresentados na literatura (e.g., em [18]), que mostram pequeno intervalo de confiança para 2000 amostras a um nível de significância de  $\alpha = 5\%$  na acurácia de estimação da distribuição de probabilidade das amostras.

**B. Processamento das Amostras e Estimação de Parâmetros**

Para tratamento do sinal recebido, o procedimento utilizado segue o mesmo descrito em [3]. Para as medições em banda estreita, o desvanecimento pode ser considerado plano (não-seletivo em frequência). Assim, o sinal recebido  $r(t)$  podem ser modelado por [19]:

$$r(t) = a(t)s(t) + n(t), \tag{1}$$

em que  $s(t)$  é o sinal transmitido,  $n(t)$  representa o ruído térmico e o desvanecimento é modelado por  $a(t)$ . O sinal transmitido é um sinal de portadora única com potência constante e o receptor é configurado para um limiar de recepção suficientemente acima do piso de ruído. Além disso, como o transmissor e o receptor estão parados, não há variação na perda de percurso determinística. Assim, é possível considerar apenas os efeitos do desvanecimento no sinal recebido. Considerando que as amostras recebidas  $\mathbf{r}_k = [r(t_1), r(t_2), \dots, r(t_k)]$ ,



Fig. 7. Locais de medição.

são independentes e identicamente distribuídas [19], temos que esta sequência pode ser modelada por uma distribuição de probabilidade, cujos parâmetros objetivamos estimar.

A sequência recebida  $\mathbf{r}_k$  representa portanto o desvanecimento aleatório na envoltória do sinal recebido e pode ser decomposto em dois componentes: um componente de larga escala  $l_k$  causado pela variação de obstáculos entre transmissor e receptor e um componente de pequena escala  $p_k$  causado pelo multipercurso gerado pelos espalhadores do ambiente. Para medições em escala logarítmica, o desvanecimento pode então descrito como

$$a_k = l_k + p_k, \quad (2)$$

Para estimar  $l_k$ , utilizamos o algoritmo de janela móvel. Esse algoritmo suaviza o sinal de entrada, eliminando as variações mais bruscas, isto é,

$$\hat{l}_k = \frac{1}{2L+1} \sum_{n=k-L}^{k+L} a_n. \quad (3)$$

sendo  $\hat{l}_k$  a estimativa de  $l_k$  obtido pelo algoritmo de janela móvel, podemos calcular a estimativa da componente de pequena escala  $p_k$  por meio de

$$\hat{p}_k = r_k - \hat{l}_k, \quad (4)$$

em que  $r_k$  é a amostra dos sinal recebido.

Para que o processo descrito funcione corretamente, é necessário definir qual é o tamanho da janela utilizada no filtro de janela móvel. Na literatura, encontram-se estudos que mostram qual deve ser o tamanho da janela em função do comprimento de onda do sinal, como em [3]. Entretanto, esse tamanho de janela leva em conta que cada amostra é tomada de uma distância  $d$  da anterior. Neste trabalho, as amostras são tomadas no mesmo lugar, e o desvanecimento a ser tratado é de caráter temporal.

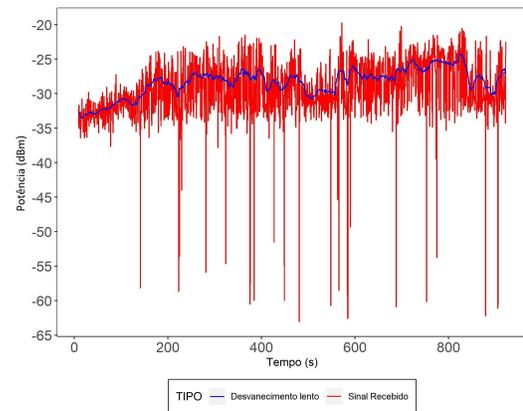
Para calcular o tamanho da janela propõe-se o uso de um método iterativo que, para cada valor de janela, calcula a soma das diferenças entre amostras de cada desvanecimento (de larga e pequena escala) e faz a razão entre essas duas métricas, gerando um parâmetro  $M$ . Sendo  $\hat{x}$  as amostras de

desvanecimento lento geradas pelo filtro implementado por (3) e  $\hat{p}$  como definido em (4), o parâmetro  $M$  é definido como

$$M = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} |\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}|}{\sum_{i=0}^{N-1} |\hat{x}_i - \hat{x}_{i+1}|}. \quad (5)$$

Esse procedimento busca eliminar a necessidade de utilizar apenas a visualização do sinal como critério, tendo um parâmetro para mensurar a diferença entre o desvanecimento lento e rápido. A definição por meio da visualização pode ser bastante afetada pela escala do gráfico, quantidade de amostras, entre outros problemas.

Baseado nessa metodologia, adotou-se  $M = 40$ . A Figura 8 mostra os gráficos do sinal recebido (vermelho) e do desvanecimento de larga escala filtrado.

Fig. 8. Filtragem do sinal recebido em dBm para  $M = 40$ .

Após separadas as amostras de desvanecimento de pequena escala, pode-se utilizá-las para estimar os parâmetros de cada distribuição a ser testada. Em [20], são estudados alguns métodos para estimação de parâmetros baseados em amostras para distribuições contínuas, entre eles: o método de Máxima Verossimilhança (MLE, do inglês *Maximum Likelihood Estimation*) e o método dos Momentos. Em [20] é mostrado que o MLE é uma boa opção para estimar os parâmetros das distribuições que serão utilizadas nesse trabalho. Em [21] são apresentadas algumas propriedades do método MLE, como por exemplo a de sempre fornecer estimadores não-enviesados. Por fim, o método MLE pode ser facilmente estendido para distribuições com mais de um parâmetro e utiliza apenas as próprias amostras e a função de distribuição a ser testada. Por essas razões, esse é o método utilizado na estimação de parâmetros deste trabalho. O objetivo do método é maximizar a função de verossimilhança que é definida por

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^N f(x_i|\theta), \quad (6)$$

sendo  $f$  a função densidade de probabilidade da distribuição e  $\theta$  o parâmetro a ser estimado. Para encontrar o melhor estimador de  $\theta$ , deve-se derivar a função de verossimilhança em relação à  $\theta$  e depois igualar a zero. Derivar a função de máxima verossimilhança na forma de (6), entretanto, é uma

tarefa custosa, pois seria necessária a aplicação de sucessivas regras da cadeia. Uma maneira de contornar esse problema é aplicar o logaritmo neperiano aos dois lados de (6). Usando a propriedade do logaritmo, o produtório se torna um somatório e a derivada se torna mais simples de calcular. Caso a distribuição a ser testada tenha mais de um parâmetro, o procedimento é similar, trocando apenas a derivada da função de verossimilhança em relação a  $\theta$  por sua derivada parcial. Como o MLE utiliza as amostras recolhidas para estimar os parâmetros das distribuições, quanto maior o número de amostras disponíveis para o cálculo da estimativa, melhor é a estimativa.

C. Testes Estatísticos

Testar se um conjunto de amostras  $x_1, x_2, \dots, x_n$  vem de uma população com determinada distribuição é um problema comum em inferência estatística. Esse problema pode ser tratado como um teste de hipóteses em que a hipótese nula  $H_0$  é a de que os dados vêm de uma determinada distribuição. Os testes utilizados nesse trabalho são: O teste de Kolmogorov-Smirnov, o teste de Cramér-von Mises e o teste de Anderson-Darling. Esses testes foram escolhidos pois apresentaram bons resultados na maioria das situações estudadas em [22].

O teste de Kolmogorov-Smirnov (usualmente abreviado por  $D$ ) [23] foi proposto em 1933 por Kolmogorov e complementado por Smirnov em 1939. É calculado a partir da comparação entre a função de distribuição acumulada (FDA) da distribuição a ser testada  $F(x)$  e da função de distribuição empírica (FDE)  $F_n(x)$  de  $n$  amostras a partir das amostras coletadas. A fórmula geral para o teste  $D$  é dada por [24]

$$D = \sup |F_n(x) - F(x)|. \tag{7}$$

Já sua formulação computacional é dada por [22]

$$D = \max(D^+, D^-), \tag{8}$$

sendo

$$D^+ = \max\left(\frac{1}{n} - F_i\right), i = 1, \dots, n; \tag{9}$$

$$D^- = \max\left(F_i - \frac{i-1}{n}\right), i = 1, \dots, n. \tag{10}$$

Dessa forma, o teste  $D$  retorna a maior distância em módulo entre a FDE dos dados e a FDA da distribuição testada.

O teste de Crámer-von Mises (usualmente abreviado por  $W^2$ ), utiliza a abordagem do erro médio quadrático entre a FDA da distribuição a ser testada e a FDE das amostras. Como descrito em [25], o teste foi inicialmente proposto por Cramér em 1928 e sofreu adaptações feitas por von-Mises e Smirnov em 1931 e 1937, respectivamente. O teste  $W^2$  é calculado por [24]

$$W^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} (F_n(x) - F(x))^2 dx. \tag{11}$$

Já a formulação computacional para o teste  $W^2$  é dada por [22]

$$W^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left(F_i - \frac{i-1}{n}\right)^2. \tag{12}$$

Em 1952, Anderson e Darling [26] propuseram uma modificação no teste de Cramér-von Mises, que ficou conhecida como teste de Anderson-Darling (usualmente abreviado por  $A^2$ ). Essa alteração consiste em acrescentar uma função  $\psi(x)$  para ponderar o valor do teste dependendo da região da FDA. Essa função é dada por [27]

$$\psi(x) = \frac{1}{F(x)(1 - F(x))}. \tag{13}$$

Sabendo que a FDA de uma distribuição é uma função sempre crescente e que existe apenas no intervalo de 0 a 1, a função de ponderação  $\psi(x)$  dá mais peso ao início e ao final da FDA. Assim, o teste  $A^2$  é dado por

$$A^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} (F_n(x) - F(x))^2 \psi(x) dx, \tag{14}$$

sendo a função  $\psi(x)$  dada por (13). A formulação computacional para o teste  $A^2$  é dada por [22]

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) \ln(F_i(1 - F_{n+1-i})). \tag{15}$$

Comparações entre os três testes através de simulações pode ser encontradas em [28], [29]. Essas comparações estão fora do escopo deste trabalho, mas podem ser consultadas para um melhor entendimento a respeito dos testes.

Como mencionado anteriormente, uma métrica bastante utilizada em trabalhos de medição é o erro médio e suas variações. Este erro pode ser calculado entre amostras de dois vetores de dados: o primeiro de amostras da função distribuição de probabilidade teórica a ser testada (com os parâmetros ajustados via MLE), e o segundo, das amostras medidas. Ambos vetores são ordenados e o erro é representado como [3]

$$\epsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{x_i}, \tag{16}$$

sendo  $n$  o número de amostras,  $x_i$  a  $i$ -ésima amostra obtida pela distribuição sendo testada, e  $y_i$  o valor do  $i$ -ésimo valor dos dados medidos. Vale lembrar que, o erro médio não é um teste de hipótese estatístico e está sendo citado apenas para fins de comparação.

D. Estatísticas de Segunda Ordem

Como mostrado até aqui, baseado em medições de campo, a função de distribuição acumulada (FDA) ou a função de distribuição de probabilidades (FDP) são utilizadas para caracterizar o comportamento estatístico da variável aleatória que melhor se adéqua ao desvanecimento de pequena escala de um canal. Contudo, a FDA e a FDP estão relacionadas às estatísticas de primeira ordem do sinal, pois sua variação temporal não é modelada [1].

Isso limita a modelagem o desvanecimento de pequena escala aos efeitos de multipercursos que não incluem o efeito Doppler (estritamente dependente do tempo). Uma alternativa de modelar tal efeito é o uso de estatísticas de segunda ordem do sinal, especificamente a Taxa de Cruzamento de Nível (TCN) e a Duração Média do Desvanecimento (DMD). Essas duas estatísticas levam em consideração a variação temporal

da envoltória do sinal, fornecendo informação vinculada à velocidade relativa entre os transceptores e/ou à velocidade dos objetos espalhadores do sinal entre eles [2].

Dado um nível de envoltória  $R$ , a TCN é definida como o número de vezes por segundo que a envoltória do sinal cruza esse nível no sentido positivo e/ou negativo. Já a DMD é o tempo médio que o sinal fica abaixo desse nível.

Em muitos trabalhos de medição que envolvem Doppler, calcula-se a TCN e a DMD em condições controladas de canal e quando existe velocidade relativa entre os transceptores. Neste trabalho, o objetivo é caracterizar o desvanecimento seletivo no tempo, mantendo-se os transceptores estáticos e captando as variações temporais do sinal devido ao movimento de pessoas transitando no ambiente. Essa variação também gera um desvio Doppler no sinal recebido [2].

Assim, surge a necessidade de se obter uma maneira de calcular a TCN e a DMD sem a dependência do desvio de frequência, que, por sua vez, é dependente da velocidade. A estratégia utilizada nesse trabalho segue os seguintes passos: (i) aplicar as fórmulas fechadas deduzidas em [1], [6]–[8] para chegar ao valor da TCN e da DMD teóricas normalizadas pelo desvio de frequência; (ii) utilizando um algoritmo como o mostrado em [9], calcular as duas estatísticas de maneira empírica usando as amostras do sinal medido; (iii) finalmente, dividindo a TCN empírica pela TCN teórica, que está normalizada pela frequência Doppler  $f_m$ , podemos chegar a uma estimativa da frequência Doppler  $\hat{f}_m$ . Assim temos que

$$\hat{f}_m = \frac{TCN_{emp}}{TCN_{teo\_norm}}, \quad (17)$$

sendo a  $TCN_{teo\_norm}$  dada por

$$TCN_{teo\_norm} = \frac{TCN_{teo}}{f_m}. \quad (18)$$

De forma análoga, é possível calcular a estimativa do desvio de frequência máximo usando a DMD. É importante deixar claro que essa estimativa é calculada para um determinado nível  $R$  de potência. Assim, para cada nível calculado haverá um valor para  $\hat{f}_m$ .

### E. Ferramentas de Software

Para o tratamento de dados, optou-se pela utilização do *software* R. Ele é um ambiente integrado para cálculos estatísticos e visualização de dados derivados do *software* S. Como ambiente de desenvolvimento integrado para o R, foi utilizado o RStudio [30], pois agrega várias funcionalidades que tornam o uso do R mais simples. Assim como o R, o RStudio também é um software livre e gratuito. Para o algoritmo de processamento dos dados medidos foram utilizados alguns pacotes do R: *datatable* [31] (manipulação e limpeza dos dados), *moments* [32] (normalização dos dados), *VGAM* [33] (obtenção das estatísticas das distribuições Rayleigh, Rice e Nakagami), *fitdistrplus* [24] (testes de aderência e estimação de parâmetros) e o *ggplot2* [34] (construção de gráficos).

## IV. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O calendário das medições realizadas é mostrado na Tabela I. Cada medição durou em torno de 20 minutos, e foi realizada com os dois receptores simultaneamente.

TABELA I  
CALENDÁRIO DE MEDIÇÕES.

Turno	Horário	Dia 1	Dia 2	Fluxo
Manhã	1º Intervalo	-	X	Alto
Manhã	2ª Aula	-	-	Baixo
Manhã	2º Intervalo	-	-	Alto
Manhã	3ª Aula	-	X	Baixo
Tarde	1º Intervalo	-	-	Alto
Tarde	2ª Aula	X	X	Baixo
Tarde	2º Intervalo	X	X	Alto
Tarde	3ª Aula	X	X	Baixo
Noite	1º Intervalo	X	X	Alto

A Figura 9 apresenta as funções distribuição acumuladas (FDAs) para a envoltória normalizada  $\rho$  (linha pontilhada) obtidas nas campanhas de medição utilizando as antenas omnidirecional e de microfita com baixo e alto fluxo de pessoas, bem como as FDAs teóricas que melhor se aproximam da FDA empírica para as distribuições de Rayleigh (azul), Rice (vermelho), Nakagami (roxo), Weibull (verde).

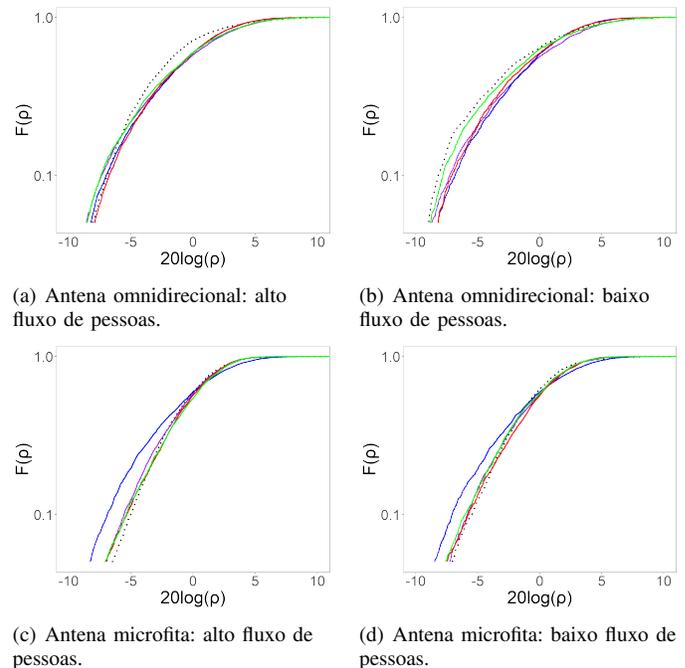


Fig. 9. FDAs da envoltória normalizada para as amostras medidas (linha pontilhada) e para as distribuições de Rayleigh (azul), Rice (vermelho), Nakagami (roxo), Weibull (verde).

Comparando as Figuras 9(a) e 9(b), observamos uma menor inclinação da FDA e, portanto, uma maior variabilidade do sinal recebido em uma situação com fluxo alto de pessoas em relação à condição de menor fluxo. Já com relação às Figuras 9(c) e 9(d), é também possível ver que o sinal referente à situação com maior fluxo de pessoas apresenta uma variabilidade maior. Porém essa diferença é bem menos acentuada, devido à recepção com antena de microfita direcional.

A Tabela II mostra os resultados dos testes de aderência com nível de significância de 5%. Cada parte da Tabela II mostra o resultado dos três testes  $D$  (Kolmogorov-Smirnov),  $W^2$  (Crámer-von Mises) e  $A^2$  (Anderson-Darling) para as quatro distribuições clássicas testadas. Os valores em negrito representam as situações em que a hipótese nula não é rejeitada.

TABELA II  
RESULTADOS DOS TESTES DE HIPÓTESES.

Distribuição	Parâmetro	$D$	$W^2$	$A^2$	Erro médio
<b>Antena omnidirecional com alto fluxo de pessoas</b>					
Nakagami	3.762	3.493	3.493	20.31	0.032
Weibull	3.726	5.222	10.01	62.30	0.067
Rayleigh	-	16.46	83.80	434.1	0.478
Rice	6.130	4.359	5.877	35.02	0.044
<b>Antena omnidirecional com baixo fluxo de pessoas</b>					
Nakagami	6.459	2.674	1.698	11.30	0.022
Weibull	4.734	4.677	8.489	35.45	0.068
Rayleigh	-	17.03	92.25	455.0	0.505
Rice	11.52	3.105	2.655	17.37	0.026
<b>Antena microfita com alto fluxo de pessoas</b>					
Nakagami	5.545	1.626	0.572	3.271	0.010
Weibull	5.113	2.088	1.486	8.933	0.020
Rayleigh	-	14.96	75.50	378.8	0.450
Rice	10.329	<b>0.959</b>	<b>0.288</b>	<b>1.620</b>	0.009
<b>Antena microfita com baixo fluxo de pessoas</b>					
Nakagami	9.503	1.389	0.493	3.568	0.008
Weibull	6.671	2.132	1.799	11.97	0.018
Rayleigh	-	18.70	115.4	563.1	0.061
Rice	18.35	<b>1.095</b>	<b>0.212</b>	<b>1.632</b>	0.007

Apesar da Figura 9 apresentar curvas teóricas muito próximas das FDAs empíricas, apenas a distribuição Rice para o caso da antena de microfita (resultados em negrito na Tabela II) passou no teste de hipóteses em um nível de significância de 5%. A distribuição Rice é adequada para modelagem de um ambiente com linha de visada, que é o caso do ambiente analisado. Outro fator que pode ter dado um peso maior à linha de visada é a diretividade da antena de microfita. Isso significa que ela recebe menos energia de componentes de multipercursos que chegam de direções muito diferentes da linha de visada. O parâmetro  $k$  da distribuição Rice representa a razão de potências da linha de visada direta e das componentes de multipercursos. Ainda nos resultados para antena de microfita, com a diminuição do fluxo de pessoas que passam pelo ambiente, a linha de visada se tornou mais relevante, representado pelo fator  $k = 18.35$ , que tem quase o dobro do valor referente à situação com alto fluxo de pessoas ( $k = 10.329$ ).

A Tabela II também mostra os resultados utilizando a antena omnidirecional. O primeiro resultado importante desse cenário é que todas as distribuições tradicionais foram rejeitadas pelos testes. Nesse ponto, cabe uma análise da razão de utilização dos testes de hipóteses. Caso a única métrica utilizada para testar as distribuições fosse o erro médio, fatalmente se chegaria no resultado que a distribuição Nakagami melhor se adequaria aos dados coletados. Tal informação não está incorreta, porém ela está incompleta, pois o erro médio não fornece um indicativo do quanto se pode confiar no resultado.

Finalmente, foram calculadas as estatísticas de segunda ordem (teóricas e empíricas). Ambas TCN e DMD resultaram em estimativas de  $\hat{f}_m$  similares, como mostrado na Figura 10.

Diante dos resultados dos testes de hipótese, a estimativa de  $\hat{f}_m$  é realizada somente para antena de microfita, usando a distribuição de Rice para calcular o TCN teórico normalizado.

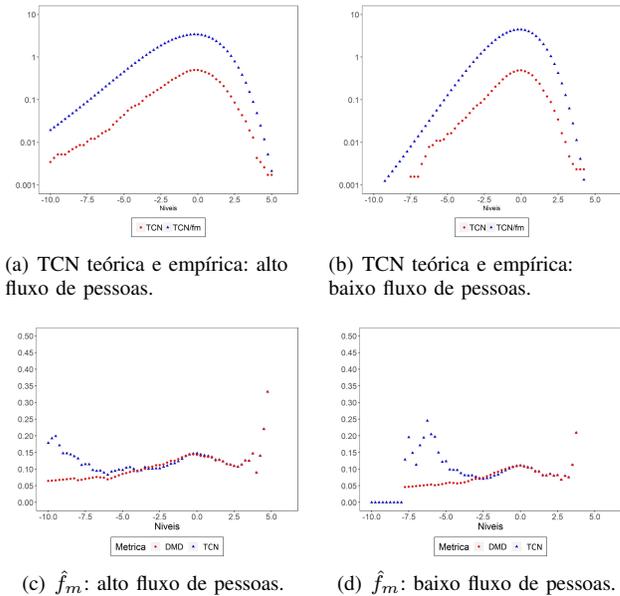


Fig. 10. TCN teórico (cruzamentos/s) e empírico, e  $\hat{f}_m$  (Hz) para antena de microfita.

Na Figura 10(a), observa-se que o gráfico da TCN é mais esparsos que o gráfico da 10(b). Isso reforça a conclusão que as amostras colhidas no ambiente com baixo fluxo de pessoas apresentam uma menor variabilidade em relação ao ambiente com alto fluxo. É possível notar que pouco abaixo do nível de  $-7.5$  dB já não há mais cruzamentos.

Por fim, as Figuras 10(c) e 10(d) apresentam os valores de  $\hat{f}_m$  calculados a partir das curvas de TCN e DMD. Esse resultado corrobora com a hipótese de que o efeito Doppler pode ser percebido mesmo com os transceptores estáticos. É possível ver na Figura 10(c), que para níveis acima de  $R = -2$  dB, o valor de  $\hat{f}_m$  é suavemente maior para ambientes com alto fluxo de pessoas, em relação ao ambiente com baixo fluxo.

V. CONCLUSÕES

Esta trabalho traz resultados quanto a realização de testes de aderência em ambientes de propagação com alto e baixo fluxo de pessoas. Duas antenas receptoras diferentes foram usadas para as medições, sendo uma antena omnidirecional, e uma antena de microfita com diagrama de radiação mais diretivo. Três testes de hipóteses foram utilizados: o de Kolmogorov-Smirnov, o de Cramer-von Mises e o de Anderson-Darling. O erro percentual médio dos testes foi analisado. Foi mostrado que, mesmo que uma distribuição possua o menor erro em relação as outras, ela pode não servir para caracterizar as amostras coletadas. Essa conclusão só foi possível graças à rejeição dos testes de aderência.

A análise com a antena de microfita mostrou-se coerente com o apresentado na literatura, sendo a distribuição Rice a única que não foi rejeitada pelos testes. Além disso, o parâmetro  $k$ , que representa a razão entre a potência da

linha-de-visada direta e a potência dos multipercursos, foi maior no ambiente com baixo fluxo de pessoas.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2000.
- [2] T. S. Rappaport, *Comunicações sem Fio: Princípios e Prática*, 2nd ed. Pearson Education do Brasil, 2009.
- [3] H. B. Tercius, "Distribuições generalizadas de desvanecimento de curto prazo: Medições de campo e validação," Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- [4] J. C. de Mello Pinheiro, "Caracterização de canais sem fio em ambientes generalizados de desvanecimento," Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- [5] U. S. Dias, "Distribuição de fase e estatísticas correlacionadas em ambientes sem fio: Teoria e validação experimental," Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- [6] M. Pätzold and F. Lee, "Level-crossing rate and average duration of fades of deterministic simulation models for rice fading channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, 7 1999.
- [7] M. D. Yacoub, J. E. V. Bautista, and L. G. de Rezende Guedes, "On higher order statistics of the nakagami-m distribution," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 3, pp. 791–794, 1999.
- [8] F. Chetan, J. Anjana, and S. Charhate, "Higher order statistics for discrete weibull fading channel-an alternate formulation," *IEEE ICIS*, 2014.
- [9] F. D. Alotaibi and A. A. Ali, "Level crossing rate and average fade duration calculation schemes based on tetra recent measurement," *International Conference on Communication, Computer & Power*, 2007.
- [10] M. de Oliveira e Mattos, Álvaro M. de Medeiros, T. A. Scher, M. M. de M. Campos, W. V. de Oliveira, and V. A. de Sousa Jr., "Efeito da presença de pessoas em canais sem fios para aplicações em internet das coisas," *MOMAG*, 2018.
- [11] E. M. Vitucci, F. Yu, L. Possenti, M. Zoli, F. Fuschini, M. Barbiroli, V. Degli-Esposti, K. Guan, and T. Kürner, "A Study on Dual-Directional mm-Wave Indoor Channel Characteristics," in *2019 13th EuCAP*, 2019.
- [12] Y. Sun, P. Hafezi, A. Nix, and M. Beach, "Indoor channel characterisation measurements with directional antennas for future high frequency ATM wireless access systems," in *PIMRC '97*, 1997.
- [13] P. Pajusco, N. Malhouroux-Gaffet, and G. El Zein, "Comprehensive Characterization of the Double Directional UWB Residential Indoor Channel," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015.
- [14] "Ettus Research. USRP N210. 2018," <https://www.ettus.com/product/details/UN210-KIT>, acesso em 20 de junho de 2020.
- [15] "GNU Radio - The Free & Open Source Radio Ecosystem," <https://www.gnuradio.org/>, acesso em 20 de junho de 2020.
- [16] A. N. de Telecomunicações. Governo Federal do Brasil (Org.), *Faixa dos 700 MHz está liberada em todas capitais*, 2018, acesso em 20 de junho 2020. [Online]. Available: <http://www.anatel.gov.br/institucional/ultimas-noticiass/2032-faixa-dos-700-mhz-esta-liberada-em-todas-capitai>
- [17] E. vitch Carneiro de Oliveira, "Antenas de Microfita com Patch Quase-Fractal para Aplicações em Redes WPAN/WLAN," Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação, UFRN, Natal, 2008.
- [18] Y. B. W. N. M. Razali, "Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests." *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, vol. 2, pp. 21–33, 2011.
- [19] W. Turin, R. Jana, C. Martin, and J. Winters, "Modeling wireless channel fading," in *IEEE VTC Fall 2001.*, vol. 3, 2001, pp. 1740–1744 vol.3.
- [20] H. Crámer, *Mathematical Methods of Statistics*. S. P. Jayasinghe, 1946.
- [21] J. L. F. Batista, "Verossimilhança e máxima verossimilhança," 2009.
- [22] M. A. Stephens, "Use of the kolmogorov-smirnov, cramer-von mises and related statistics without extensive tables," *Journal of the Royal Statistical Society*, vol. 32, no. 1, pp. 115–122, 1970.
- [23] A. N. Shiriyayév, *Selected Works of A. N. Kolmogorov*. Nauka, 1986.
- [24] M. L. Delignette-Muller and C. Dutang, "fitdistrplus: An R package for fitting distributions," *Journal of Statistical Software*, 2015.
- [25] D. A. Darling, "The kolmogorov-smirnov, cramer-von mises tests," *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 28, no. 4, pp. 823–838, 1957.
- [26] T. W. Anderson and D. A. Darling, "Asymptotic theory of certain goodness of fit criteria bades on stochastic processe," *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 23, pp. 193–212, 1952.
- [27] F. Laio, "Cramer-von mises and anderson-darling goodness of fit tests for extreme value distributions with unknown parameters," *Water Resources Research*, vol. 40, 2004.
- [28] V. B. Leott, A. R. Birck, and J. Riboldi, "Comparação dos testes de aderência à normalidade kolmogorov-smirnov, anderson-darling, cramer-von mises e shapiro-wilk por simulação," *11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agrônômica*, 2005.
- [29] J. M. F. Antunes, "Distribuições estatísticas, testes de ajuste e métodos para estimação de parâmetros na Área da fiabilidade," Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2015.
- [30] "RStudio: Integrated development environment for R (Version 0.96.122)," <http://www.rstudio.org/>.
- [31] M. Dowle and A. Srinivasan, *data.table: Extension of 'data.frame'*, 2018, R package version 1.11.8. [Online]. Available: <https://CRAN.R-project.org/package=data.table>
- [32] L. Komsta and F. Novomestky, *moments: Moments, cumulants, skewness, kurtosis and related tests*, 2015, r package version 0.14. [Online]. Available: <https://CRAN.R-project.org/package=moments>
- [33] T. W. Yee, J. Stoklosa, and R. M. Huggins, "The VGAM package for capture-recapture data using the conditional likelihood," *Journal of Statistical Software*, 2015.
- [34] H. Wickham, *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York, 2016. [Online]. Available: <http://ggplot2.org>



**Wellerson V. de Oliveira** received the degree in electrical engineering from the UFRN, Brazil, 2018. He is member of Research Group in Rapid Prototyping Solutions for Communication (GppCom). Currently, he is a analytics and RPA team leader at Nordeste Supermarkets and is pursuing the M.S. degree in Computational Intelligence at IMD/UFRN.



**Millena M. de M. Campos** received the degree in electrical engineering from the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN), Brazil, in 2018. She is currently pursuing the M.S. degree in electrical and computer engineering at UFRN and is a member of Research Group in Rapid Prototyping Solutions for Communication (GppCom).



**Alvaro A. M. de Medeiros**, received the degree in electrical engineering from the Federal University of Rio Grande do Norte, Brazil, in 2000, and the M.Sc. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the University of Campinas, Brazil, in 2002 and 2007, respectively. From 2007 to 2010, he was a Research Specialist at Nokia Institute of Technology, Brazil, and Research and Development Center, Brazil. He is currently an Associate Professor at Federal University of Juiz de Fora, Brazil.



**Vicente A. de Sousa Jr.** received his BSc, MSc and PhD degrees in Electrical Engineer from Federal University of Ceará (UFC) in 2001, 2002 and 2009, respectively. Between 2001 and 2006, he developed solutions to UMTS/WLAN interworking for UFC and Ericsson of Brazil. Between 2006 and 2010, Sousa contributed to WIMAX standardization and Nokia's product as a researcher at Nokia Institute of Development (INdT). Sousa is now a lecturer at UFRN, Natal, Brazil.