

# Avaliação de Acurácia e Validação do Método Generalizado de Lee para Canal sem Fio Genérico

J. Marcos Leal B. Filho, Álvaro A. M. de Medeiros, Marcio E. C. Rodrigues, Vicente A. de Sousa Jr.

**Resumo**—Este trabalho apresenta a avaliação de acurácia e a validação do Método Generalizado de Lee (GLM) para diferentes canais sem fio banda estreita. O método utiliza média móvel e define parâmetros para separar os desvanecimentos de pequena e larga escala de um canal. Para a avaliação de acurácia e validação, foi implementado um simulador de canal com desvanecimentos conhecidos, configurados com diferentes parâmetros e curvas de distribuição (Nakagami-m, Weibull, Rice, Rayleigh) e calculado o *Root Mean Squared Error* (RMSE) em relação aos desvanecimentos obtidos utilizando o GLM. Os resultados e análises atestam o bom desempenho do GLM na caracterização de canais genéricos e mostram a relação entre as características do canal e o tamanho do intervalo de potência média local do sinal.

**Palavras-Chave**—Estimação de Potência Média Local, Desvanecimento, Banda Estreita, Canal sem Fio.

**Abstract**—This work presents the accuracy evaluation and validation of the Generalized Lee Method (GLM) for different narrow-band wireless channels. The method uses moving average and defines parameters to separate the small and large-scale fadings of a channel. To measure its accuracy and validate it, a channel simulator with known fading was implemented, configured with different parameters and distribution curves (Nakagami-m, Weibull, Rice, Rayleigh) and the Root Mean Squared Error (RMSE) was calculated in relation to the fades obtained using the GLM. The results and analyzes attest to the good performance of GLM in the characterization of generic channels and show the relationship between the channel characteristics and the size of the local average power interval of the signal.

**Keywords**—Local Average Power Estimation, Fading, Narrow-band, Wireless Channel.

## I. INTRODUÇÃO

Os recentes sistemas de comunicação de 5ª geração (5G) almejam atender a diferentes cenários de uso, exigindo requisitos desafiadores para garantir a qualidade de serviço. Como principal desafio a ser vencido, o canal sem fio é protagonista em tais sistemas, sendo necessário conhecer o seu comportamento para projetar adequadamente os dispositivos. Considerando a operação em frequências de micro-ondas e em ondas milimétricas, verifica-se a necessidade de caracterizar os desvanecimentos de larga escala (perda de percurso e sombreamento) e de pequena escala (devido ao

multipercorso e à movimentação relativa entre transceptores e espalhadores). Tal caracterização serve para concepção e teste de transceptores mais eficientes e otimização de sistemas já implantados.

A transmissão no canal pode ser realizada em banda estreita ou em banda larga, porém a última opção demanda *setups* com maior complexidade. Por esse motivo, é geralmente utilizado o canal banda estreita para se estimar os valores de potência média local. Para isso, é realizada a filtragem do sinal recebido, de modo a separar os desvanecimentos de pequena e larga escala. Contudo, para cada tipo de canal, é necessário determinar a frequência de corte do filtro que separa adequadamente os desvanecimentos. Essa informação é desconhecida, mas há estudos que propõem estimativas. Em [1] é proposto um método que utiliza a filtragem por média móvel e define uma faixa para o melhor tamanho da janela ( $2L$ ) de realização da média. Esse método é uma referência para diversos estudos, sendo indicado pela ITU-R para medições de potência média ao longo de uma rota [2]. Entretanto, ele foi desenvolvido especificamente para canais com distribuição Rayleigh.

Para atender à necessidade de caracterização de canais genéricos, com a distribuição de probabilidade a ser conhecida, em [3] é proposto o Método Generalizado de Lee, uma adaptação do método apresentado em [1]. O método propõe uma forma de encontrar o melhor tamanho da janela de média móvel para filtrar e separar adequadamente os desvanecimentos. Em sua proposição inicial, o método foi aplicado em medições de canal rural, na faixa de ondas médias. Portanto, faz-se necessário avaliar sua eficácia e acurácia para diferentes tipos de canais e atestar que o valor da janela de média móvel encontrado é adequado.

Os autores de [4] propõem a validação do GLM em canais urbanos, por comparação com o método de filtragem utilizado em [5], sendo ambos os métodos aplicados a um mesmo conjunto de medições de canais reais. Contudo, o método de filtragem utilizado não possibilita a análise de acurácia e é considerado apenas um tipo de canal.

Uma vez que os desvanecimentos de pequena e larga escala dos canais reais são desconhecidos, qualquer método que utiliza dados empíricos para separar os desvanecimentos terá resultados com erro indeterminado, o que inviabiliza a avaliação de acurácia do GLM ou de qualquer outro método. Por esse motivo, propõe-se neste artigo a avaliação do GLM com uma metodologia controlada, utilizando um gerador de canal com desvanecimentos conhecidos. Assim, é possível aplicar o GLM e avaliar sua acurácia, comparando seus resultados com os desvanecimentos do modelo. Além disso,

J. Marcos Leal B. Filho, Marcio E. C. Rodrigues e Vicente A. de Sousa Jr são da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, E-mails: jose.filho.048@ufrn.edu.br, marcio.rodrigues@ufrn.br, vicente.sousa@ufrn.br. Álvaro A. M. de Medeiros é da Universidade Federal de Juiz de Fora e pesquisador da Munster Technological University, Cork, Irlanda. E-mail: alvaro@engenharia.ufjf.br. Esse estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

propõe-se a validação de seu desempenho para diferentes canais de propagação.

Este trabalho está organizado como a seguir. A Seção II apresenta os estudos relacionados ao tema. A Seção III descreve o Método de Lee, bem como o GLM, e apresenta como são realizadas a avaliação de acurácia e a validação para diferentes canais. A Seção IV apresenta os resultados e discussões e, por fim, a Seção V traz as conclusões do trabalho e perspectivas de pesquisas futuras.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Diversos estudos propõem cálculos analíticos para a estimativa de  $2L$ . Entre eles, destacam-se [6] e [7], que desenvolveram uma expressão analítica para canais genéricos, utilizando a *Generalized K Distribution*. Essa distribuição é constituída pela união das distribuições Nakagami-m e Gamma, que descrevem aproximadamente os desvanecimentos de pequena escala e de sombreamento, respectivamente. Em [8], são desenvolvidos 4 métodos estatísticos para processamento dos dados de medições do canal e estimativa da potência média local, sendo realizadas simulações e análises comparativas entre os métodos.

Verifica-se também na literatura a utilização do Modelo Autorregressivo (AR) e do Filtro de Kalman (FK), para a separação dos desvanecimentos do canal. Os autores de [9] apresentam um modelo híbrido, com janela móvel e FK, capaz de realizar a estimativa de média local em tempo real.

Apesar da possibilidade de se utilizar o FK com AR e os modelos analíticos em tempo real, estes métodos dependem de modelos matemáticos que nem sempre refletem a realidade do canal, já o GLM baseia-se apenas nos dados empíricos para realizar a filtragem dos desvanecimentos. Contudo, até o momento, não foram encontrados na literatura trabalhos que tenham avaliado a acurácia do GLM ou validado o método para diferentes tipos de canais.

## III. MÉTODOS E MODELAGEM DO SISTEMA

### A. Método de Lee

Lee propôs uma forma de estimar o desvanecimento de larga escala de um canal, ou seja, de estimar sua potência média local [1]. Para isso, definiu como obter 3 parâmetros necessários: o melhor tamanho de intervalo ( $2L$ ), utilizado para realizar a média das amostras do canal; a quantidade mínima necessária de amostras dentro de um intervalo de média ( $N$ ); e o valor da distância entre as amostras ( $d$ ). A seguir, um resumo sobre como Lee obtém o valor de  $2L$ .

O sinal com desvanecimento  $s(t)$ , recebido por uma unidade móvel, pode ser expresso como:

$$s(t) = r(t) \cdot e^{j\omega(t)}, \quad (1)$$

em que  $r(t)$  e  $\omega(t)$  são a envoltória e a fase do sinal, respectivamente. A parcela  $r(t)$  pode ser expressa no domínio espacial da seguinte forma:

$$r(y) = m(y)r_o(y), \quad (2)$$

em que  $m(y)$  e  $r_o(y)$  representam os desvanecimentos de larga e pequena escala, respectivamente.

Para encontrar a média estimada  $\hat{m}(x)$ , num intervalo  $2L$  ( $x - L$  a  $x + L$ ) em torno de um ponto  $x$  em  $r(y)$ , realiza-se a integração a seguir.

$$\hat{m}(x) = \frac{1}{2L} \int_{x-L}^{x+L} r(y) dy = \frac{1}{2L} \int_{x-L}^{x+L} m(y)r_o(y) dy. \quad (3)$$

Quando o tamanho  $2L$  é escolhido corretamente,  $\hat{m}(x)$  se aproxima de  $m(x)$ , ou seja:

$$\hat{m}(x) = m(x) \left[ \frac{1}{2L} \int_{x-L}^{x+L} r_o(y) dy \right], \quad (4)$$

logo, tem-se que:

$$\langle r_o \rangle = \frac{1}{2L} \int_{x-L}^{x+L} r_o(y) dy = 1, \quad (5)$$

em que  $\langle r_o \rangle$  representa o sinal de desvanecimento de pequena escala normalizado. Quanto mais próximo de 1 é seu valor, mais adequado é o tamanho de  $2L$ .

Sendo  $\hat{m}(x)$  uma estimativa da média verdadeira  $m(x)$ , as flutuações de  $\hat{m}(x)$  em torno de  $m(x)$  podem ser avaliadas a partir da variância dos valores estimados ( $\sigma_{\hat{m}}$ ). O cálculo da variância é realizado para diferentes valores de  $2L$ , de modo a verificar o melhor valor. Lee propõe utilizar a curva  $1\sigma$  spread, definida em dB por:

$$1\sigma_{\hat{m}} \text{ spread} = 20 \log \frac{1 + \sigma_{\hat{m}} \text{ norm}}{1 - \sigma_{\hat{m}} \text{ norm}}, \quad (6)$$

em que  $\sigma_{\hat{m}} \text{ norm}$  é a variância da média estimada normalizada pela média verdadeira  $m(x)$ . Utilizando a Equação (6) e considerando um canal com distribuição Rayleigh, com seus valores teóricos de  $\sigma_{\hat{m}}$  e  $m(x)$ , Lee obteve a curva apresentada na Figura 1. É possível observar que para uma variância de até 1,56 dB e de até 1 dB, tem-se  $2L = 20\lambda$  e  $2L = 40\lambda$ , respectivamente, definindo-se uma faixa de valores para o cálculo da potência média local com distorção controlada.

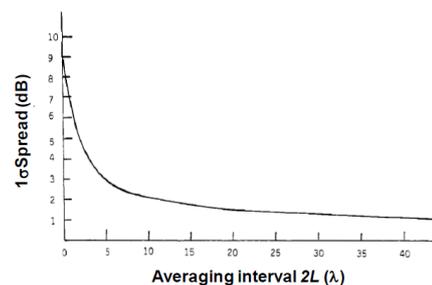


Fig. 1. Curva  $1\sigma$  spread normalizada obtida pelo Método de Lee [1].

### B. Método Generalizado de Lee (GLM)

Tendo em vista que os canais reais apresentam diferentes curvas de distribuição, não necessariamente Rayleigh, como especificado no método de Lee [1], Vega propõe uma forma de generalização do referido método para qualquer canal, independente da distribuição, da frequência da portadora e das condições de recepção. Para isso, são utilizadas amostras do sinal recebido no canal em análise. O método propõe uma nova forma de definir o valor de  $2L$  e  $d$ , sendo o valor de  $N$

obtido pela relação  $N \geq 2L/d$ . A seguir, é apresentado um resumo do GLM para obtenção do melhor valor de  $2L$ .

A curva  $1\sigma_{\hat{m}} \text{ norm spread}$  proposta por Lee, com os valores teóricos referentes à distribuição Rayleigh, apresenta apenas o limite inferior para o tamanho de  $2L$ . Esse limite é definido pelo valor de 1 dB na referida curva. Observa-se na Figura 1 que, para valores menores que 1 dB,  $2L$  tem valor aproximadamente igual ou maior do que  $40\lambda$ , não sendo definido um limite superior para o tamanho de  $2L$ . Isso ocorre porque Lee não considerou a variação do desvanecimento de larga escala. Sua média pode ser considerada constante dentro de um intervalo  $2L$ , porém esse valor muda ao longo dos intervalos seguintes.

É necessário definir o limite superior, pois quando utiliza-se valores maiores de  $2L$  para filtrar o sinal recebido, obtém-se o desvanecimento de pequena escala com parte do desvanecimento de larga escala junto. Assim como, para valores menores de  $2L$ , obtém-se o desvanecimento de larga escala junto com componentes de pequena escala. Realizar a média móvel de um sinal corresponde a um procedimento de filtragem com filtro passa-baixa, cuja frequência de corte é inversamente proporcional ao tamanho da janela ( $2L$ ).

Com o GLM, Vega propõe uma forma de estimar tanto o valor ideal de  $2L$ , como uma faixa com limites inferior e superior. Em vez de utilizar um valor teórico de média constante, ele utilizou o próprio sinal recebido para estimar a média de cada intervalo. Para isso, são realizados os 5 passos seguintes para diferentes valores de  $2L$ :

- 1) Filtragem do sinal recebido  $r(y)$  com a média móvel para obter seus valores médios,  $\bar{r}(y)$ ;
- 2) Filtragem de  $\bar{r}(y)$  com a média móvel para obter a média verdadeira aproximada de cada intervalo ( $m'$ );
- 3) Normalização de  $\bar{r}(y)$  por sua média aproximada verdadeira ( $m'$ ), para obter  $\bar{r}(y)_{norm}$ ;
- 4) Cálculo da variância de  $\bar{r}(y)_{norm}$  ( $\sigma_{\hat{m} \text{ norm}}$ );
- 5) Cálculo de  $1\sigma_{\hat{m} \text{ spread}}$ , utilizando a Equação (6).

A Figura 2 mostra o resultado dos 5 passos realizados para diferentes valores de  $2L$ , considerando um canal rural/suburbano e um sinal recebido na frequência de 1,359 MHz, na banda de ondas médias. Observa-se que a curva apresenta um valor mínimo, correspondente ao valor ideal de  $2L$  (aproximadamente  $1,5\lambda$ ) e que estabelece-se um intervalo para  $2L$ , definido pelos limites inferior ( $0,9\lambda$ ) e superior ( $2,1\lambda$ ), referente aos valores da curva abaixo de 1,05 dB.

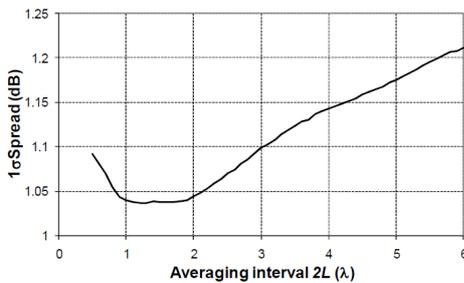


Fig. 2. Curva  $1\sigma$  spread normalizada obtida pelo Método Generalizado de Lee, em canal rural/suburbano, utilizando a frequência de transmissão de 1,359 MHz [3].

### C. Método de Avaliação da Acurácia e Validação do GLM

Para realizar a avaliação de acurácia e a validação do GLM, foi implementado em *software* um simulador de canal que gera separadamente os desvanecimentos de larga e de pequena escala, para as faixas de MF (*Medium Frequency*), HF (*High Frequency*), VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*). O desvanecimento de larga escala segue o modelo log-normal [10], sendo composto pela perda de percurso,  $\overline{PL}(d)$ , e pelo sombreamento,  $X_\sigma$ , conforme a Equação (7).

$$FD_{large}(d)[dB] = \overline{PL}(d) + X_\sigma, \quad (7)$$

em que:

$$\overline{PL}(d)[dB] = \overline{PL}(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right). \quad (8)$$

A perda de percurso, para as faixas de frequências VHF e UHF, segue modelo log-distância, sendo  $n$  o expoente de perda de percurso,  $d_0$  a distância de referência e  $d$  a distância entre transmissor e receptor. O sombreamento é definido pela variável aleatória  $X_\sigma$ , com distribuição gaussiana, de média 0 dB e desvio padrão igual a  $\sigma$  dB. A correlação entre as amostras do sombreamento é gerada por um filtro de média móvel sobre os valores  $X_\sigma$ , com um intervalo de média igual a  $D$ , que representa a distância de decorrelação.

Para a faixa de frequências de 10 kHz a 30 MHz, correspondente à transmissão de ondas de superfície, a perda de percurso é modelada conforme especificado na Recomendação P.368-10 da ITU-R [11].

O desvanecimento de pequena escala é modelado pela variável aleatória  $Y_{\sigma_s}$ , utilizando cadeia de Markov com convergência para as distribuições Nakagami-m, Weibull, Rice ou Rayleigh, como descrito em [12]. Dessa forma, o canal é modelado como expresso na Equação (9).

$$P_{rx}(d)[dBm] = P_{tx} - \overline{PL}(d) + X_\sigma + 20 \log_{10} Y_{\sigma_s}, \quad (9)$$

em que  $P_{rx}(d)$  representa a potência recebida a uma distância  $d$  do transmissor e  $P_{tx}$  representa a potência de transmissão.

O simulador possibilita a geração de diferentes tipos de canais, por meio da configuração dos seguintes parâmetros: frequência da portadora ( $f_c$ ), potência transmitida ( $P_{tx}$ ), quantidade de amostras do sinal ( $n_a$ ), distância entre as amostras ( $d_a$ ), distância de referência do percurso de medição ( $d_0$ ), expoente de perda de percurso ( $n$ ), distância de decorrelação do sombreamento ( $D$ ), desvio padrão do sombreamento ( $\sigma$ ), fator de escala ( $\Omega, \lambda, f_{e_{rice}}, f_{e_{ray}}$ ) e fator de forma ( $m, k, v$ ) das curvas de distribuição do desvanecimento de pequena escala, Nakagami-m, Weibull, Rice e Rayleigh, respectivamente.

Para a validação do GLM, foram gerados canais *indoor* e *outdoor* (urbano, suburbano e rural) e, para cada tipo de canal, foi aplicado o referido método, sendo comparados os resultados de tamanho de  $2L$  com faixas de valores de referência, calculadas analiticamente em [6]. Para a avaliação da acurácia, foi calculado o RMSE entre o desvanecimentos (de larga e pequena escala) do canal modelo e os desvanecimentos obtidos pelas filtragens com a janela ideal obtida pelo simulador e com a janela definida pelo GLM.

## IV. RESULTADOS

Para a geração dos canais modelo, foram utilizados os seguintes parâmetros:  $d_0 = 5, 500, 1000$  e  $2000$  m (para os canais *indoor*, urbano, suburbano e rural, respectivamente);  $\Omega = 2$ ;  $P_{tx} = 30$  dBm; e  $n_a = 200000$ . Para garantir boa resolução na geração do canal, a distância entre as amostras geradas ( $d_a$ ) é especificada no valor máximo de  $0,050\lambda$  e  $0,017\lambda$ , correspondente a 10 % do valor típico de decorrelação entre as amostras (em torno de  $0,50\lambda$  [1] e  $0,17\lambda$  [3], para as bandas UHF e MF, respectivamente). A Tabela I apresenta parâmetros de referência presentes na literatura e compilados em [6]. Os valores de  $n$  são baseados em [10]. Os valores dos parâmetros  $n$ ,  $D$ ,  $\sigma$  e  $m$ , utilizados nesta investigação, são listados na Tabela II.

TABELA I

PARÂMETROS DE REFERÊNCIA PARA DIFERENTES TIPOS DE CANAIS UHF.

Canal	$n$	$D$ (m)	$\sigma$ (dB)	$m$	$2L_{Ref}$
Indoor	2–6	3–5	< 5	2–4	5–10 $\lambda$
Urbano	3–5	30–50	7–9	1	10–20 $\lambda$
Suburbano	2,7–3,5	200–300	5–7	2–4	20–50 $\lambda$
Rural	2–2,7	> 300	5–7	4–8	20–50 $\lambda$

Os resultados de validação do GLM para diferentes tipos de canais, na faixa de UHF ( $f_c = 1000$  MHz), com distribuição Nakagami- $m$ , são apresentados na Figura 3 e na Tabela II.

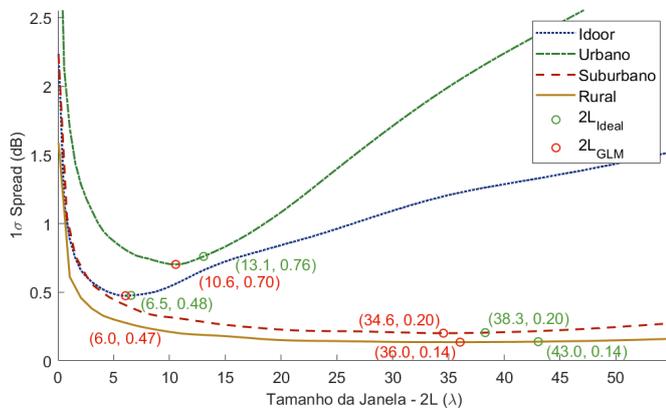

 Fig. 3. Curva  $1\sigma$  spread utilizando o Método Generalizado de Lee, para diferentes tipos de canais.

TABELA II

RESULTADOS DO GLM PARA DIFERENTES TIPOS DE CANAIS UHF.

Canal	$n$	$D$ (m)	$\sigma$ (dB)	$m$	$2L_{Ideal}$	$2L_{GLM}$
Indoor	5	4	1	3	6,5 $\lambda$	6,0 $\lambda$
Urbano	4	40	8	1	13,1 $\lambda$	10,6 $\lambda$
Suburbano	3	250	6	3	38,3 $\lambda$	34,6 $\lambda$
Rural	2,5	400	6	6	43,0 $\lambda$	36,0 $\lambda$

A janela de filtragem ideal ( $2L_{Ideal}$ ) é a janela de média móvel que resulta no menor RMSE entre os desvanecimentos do canal modelo e o obtido após a filtragem. Já o tamanho da janela obtido pelo Método Generalizado de Lee ( $2L_{GLM}$ ) é

definido pelo menor valor da curva  $1\sigma$  spread, como mostram as Figuras 3 e 4.

Os valores obtidos de  $2L_{Ideal}$  e de  $2L_{GLM}$  estão dentro da faixa de valores referenciados por estudos recentes que utilizam cálculos analíticos para a estimação do melhor valor de  $2L$  [6], [7]. Os valores de referência ( $2L_{Ref}$ ) são apresentados na Tabela I.

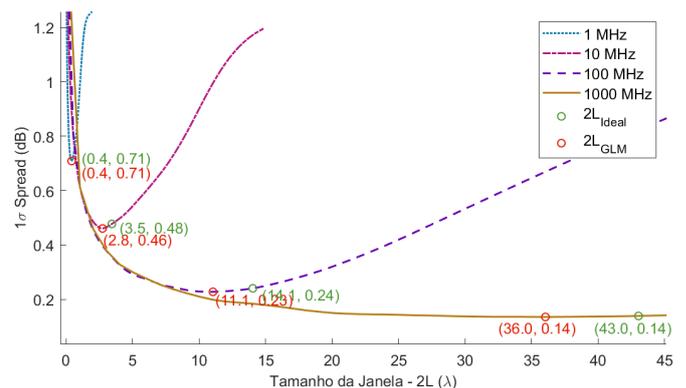
A Tabela III apresenta as diferenças percentuais ( $Dif\%$ ) entre os valores de  $2L_{GLM}$  e  $2L_{Ideal}$  e mostra os resultados de acurácia, definida pelo RMSE entre os desvanecimentos do canal modelo e os obtidos aplicando o GLM ( $RMSE_{GLM}$ ). O  $RMSE_{Ideal}$  é obtido calculando-se o RMSE entre os desvanecimentos do canal modelo e os obtidos com a janela ideal. Apesar da diferença entre os tamanhos de  $2L_{GLM}$  e  $2L_{Ideal}$ , os valores de acurácia são bastante significativos. Verifica-se que a acurácia é maior para os canais rural e suburbano.

TABELA III

ACURÁCIA DO GLM PARA DIFERENTES TIPOS DE CANAIS UHF.

Canal	$Dif\%$	$RMSE_{Ideal}$	$RMSE_{GLM}$
Indoor	7,7%	0,276 dB	0,277 dB
Urbano	19,1%	0,381 dB	0,389 dB
Suburbano	9,7%	0,108 dB	0,109 dB
Rural	16,3%	0,071 dB	0,072 dB

Para analisar a influência das faixas de frequência (MF, HF, VHF e UHF) no tamanho da janela de filtragem, o GLM foi utilizado em canais rurais, com distribuição Nakagami- $m$  e com frequências 1, 10, 100 e 1000 MHz. Os parâmetros dos canais gerados são os mesmos apresentados na Tabela II, com exceção do desvio padrão do sombreamento, que diminui de 1 a 2 dB quando se diminui a faixa de frequência (e.g., de UHF para VHF) [6]. Os resultados são apresentados na Figura 4 e resumidos na Tabela IV.


 Fig. 4. Curva  $1\sigma$  spread utilizando o Método Generalizado de Lee, para o canal rural e diferentes frequências.

Observa-se que o tamanho da janela é diretamente proporcional à variação da frequência, conforme verificado na literatura [1], [3], [6], e que os valores de RMSE são reduzidos.

Por fim, o GLM foi aplicado a canais com diferentes parâmetros dos desvanecimentos de pequena e larga escala e com diferentes curvas de distribuição, para se avaliar a

TABELA IV

 VALORES DE  $2L$  PARA O CANAL RURAL E DIFERENTES FREQUÊNCIAS.

$f_c$ (MHz)	$\sigma$ (dB)	$2L_{Ideal}$	$2L_{GLM}$	$RMSE_{Ideal}$	$RMSE_{GLM}$
1	1	0,4 $\lambda$	0,4 $\lambda$	0,398 dB	0,398 dB
10	2	3,5 $\lambda$	2,8 $\lambda$	0,259 dB	0,267 dB
100	4	14,1 $\lambda$	11,1 $\lambda$	0,128 dB	0,132 dB
1000	6	43,0 $\lambda$	36,0 $\lambda$	0,071 dB	0,072 dB

influência no tamanho de  $2L$ . Para isso, foram gerados canais rurais, com  $f_c = 1,359$  MHz, com o objetivo também de comparar os resultados com as medições realizadas em [3]. A Tabela V apresenta os resultados.

TABELA V

 VALORES DE  $2L$  PARA O CANAL RURAL COM DIFERENTES PARÂMETROS.

Nº	PDF	$ff$	$fe$	D (m)	$\sigma$	$2L_{Ideal}$	$2L_{GLM}$
1	Nakagami	2	2	400	1	0,65 $\lambda$	0,61 $\lambda$
2	Rayleigh	–	2	400	1	0,92 $\lambda$	0,85 $\lambda$
3	Rice	2	2	400	1	0,97 $\lambda$	1,04 $\lambda$
4	Weibull	2	2	400	1	0,70 $\lambda$	0,70 $\lambda$
5	Nakagami	2	2	400	2	0,44 $\lambda$	0,38 $\lambda$
6	Nakagami	4	2	400	1	0,51 $\lambda$	0,41 $\lambda$
7	Nakagami	2	4	400	1	0,65 $\lambda$	0,72 $\lambda$
8	Nakagami	2	2	600	1	0,82 $\lambda$	0,89 $\lambda$
9	Nakagami	0,5	3	600	1	1,63 $\lambda$	1,57 $\lambda$
10	Rayleigh	–	5	600	1	1,61 $\lambda$	1,51 $\lambda$
11	Rice	2	3	600	1	1,58 $\lambda$	1,68 $\lambda$
12	Weibull	2	3	600	1	1,55 $\lambda$	1,65 $\lambda$

Os resultados mostram que a distância de decorrelação do sombreado,  $D$ , e o fator de escala,  $fe$ , da curva de distribuição do desvanecimento de pequena escala são diretamente proporcionais ao tamanho de  $2L$ . Já o desvio padrão do sombreado,  $\sigma$  (dB), e o fator de forma,  $ff$ , são inversamente proporcionais. Além disso, observa-se que, para os valores de fator de escala e de forma fixados em 2, as curvas de distribuição apresentam maior tamanho de  $2L$  na seguinte ordem crescente: Nakagami-m, Weibull, Rayleigh e Rice. Isso ocorre pois, nessa configuração, as distribuições possuem variância igual a 0,23, 0,86, 1,71 e 2,40, respectivamente, e quanto maior a variância, maior o tamanho de  $2L$ .

Em [3], o GLM é proposto e aplicado em medições de onda de superfície, realizadas em um canal rural/suburbano, com transmissão na frequência de 1,359 MHz, resultando em valores de  $2L$  em torno de 1,5 $\lambda$ , como mostra a Figura 2. Não são informados os valores de distância de decorrelação e de desvio padrão do sombreado, nem os parâmetros do desvanecimento de pequena escala do canal. Por isso, aqui foram utilizados valores genéricos dentro das faixas de referência.

Comparando-se os resultados de [3] com os resultados da Tabela V, constata-se que as simulações de números 9 a 12 apresentam tamanho de  $2L$  próximos aos encontrados nas medições empíricas. E, entre elas, a simulação 9 ( $2L_{GLM} = 1,57\lambda$ ) é a que mais se aproxima do referido canal, pois é descrita pela distribuição normal ( $m = 0,5$ ), indicada em [13] como a que melhor caracteriza o canal rural na referida faixa de frequência.

## V. CONCLUSÕES

O presente trabalho traz as seguintes conclusões e contribuições: 1) o Método Generalizado de Lee foi testado e validado com uma metodologia controlada, utilizando diferentes tipos de canais simulados. Os resultados de tamanho de  $2L$  obtidos se mostraram coerentes com a literatura, para diferentes ambientes e frequências de transmissão; 2) a acurácia do GLM foi avaliada, tendo sido confirmado o seu bom desempenho para canais genéricos, considerando diferentes ambientes e faixas de frequência (RSME menores que 0,39 dB); 3) foi realizada uma ampla análise sobre a relação entre os diferentes parâmetros do canal e o tamanho de  $2L$ ; e, 4) foram comparados os resultados das simulações com os resultados das medições empíricas de [3], sendo verificadas similaridades.

Como possibilidade de trabalho futuro, observa-se a necessidade de validar e medir a acurácia do GLM com relação ao cálculo do número mínimo de amostras dentro de uma janela de filtragem ( $N$ ) e com relação à definição da distância entre amostras descorrelacionadas ( $d$ ). Sugere-se também a validação do GLM utilizando modelos de canal com mobilidade, bem como dados empíricos de diferentes canais e com diferentes frequências. Observa-se, ainda, a possibilidade do desenvolvimento de um método híbrido, utilizando cálculos analíticos para estimar o valor de  $N$ ,  $d$  e uma faixa inicial de  $2L$ , junto com o GLM, para definir com maior precisão o valor de  $2L$  dentro da faixa inicialmente estimada. Isso permitiria ao mesmo tempo boa acurácia e uso em tempo real.

## REFERÊNCIAS

- [1] W. C. Lee, "Estimate of local average power of a mobile radio signal," *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 34, no. 1, pp. 22–27, 1985.
- [2] ITU-R, "Recommendation itu-r sm.1708-1, field-strength measurements along a route with geographical coordinate registrations," ITU-R, 2011.
- [3] D. de la Vega, S. López, J. M. Matias, U. Gil, I. Pena, M. M. Velez, J. L. Ordiales, and P. Angueira, "Generalization of the lee method for the analysis of the signal variability," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 58, no. 2, pp. 506–516, 2009.
- [4] U. Gil *et al.*, "Statistical characterization of the medium wave field strength spatial variability in urban environments using the generalized lee method," in *Proceedings of the 4th EuCAP*. IEEE, 2010, pp. 1–5.
- [5] U. Gil, I. Peña, D. Guerra, D. De la Vega, A. Arrinda, and P. Angueira, "Medium wave field strength spatial variability in urban environments," in *Proceedings of the 3rd EuCAP*. IEEE, 2009, pp. 2266–2270.
- [6] P. Njemčević, A. Lipovac, and V. Lipovac, "Improved model for estimation of spatial averaging path length," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, 2018.
- [7] P. Njemcevic, A. Lipovac, and V. Lipovac, "Recommendations for shadow fading estimation from received composite signal samples," *Wireless Networks*, vol. 26, pp. 1057–1067, 2020.
- [8] B. Ai *et al.*, "Novel statistical processing methods for wireless field strength prediction," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 55, no. 4, pp. 1805–1809, 2009.
- [9] T. Kurt, R. Lerbour, Y. Le Helloco, and B. Breton, "Adaptive kalman filtering for local mean power estimation in mobile communications," in *IEEE Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2006, pp. 1–4.
- [10] T. S. Rappaport, *Comunicações sem fio: princípios e práticas*. Pearson Prentice Hall, 2009.
- [11] ITU-R, "Recommendation ITU-R P.368-10, ground-wave propagation prediction method for frequencies between 10 khz and 30 mhz," ITU-R, 2022.
- [12] R. M. Neal, "Slice sampling," *The annals of statistics*, vol. 31, no. 3, pp. 705–767, 2003.
- [13] D. Guerra *et al.*, "Medium wave digital radio mondiale (drm) field strength time variation in different reception environments," *IEEE transactions on broadcasting*, vol. 52, no. 4, pp. 483–491, 2006.