

Análise da resposta do canal marítimo na faixa de 3,5 GHz em função das condições do mar

Pedro A. Vieira, Julio C. R. Dal Bello

Universidade Federal Fluminense, UFF - Departamento de Telecomunicações - R. Passo da Pátria, 156 - São Domingos - Niterói, RJ

Resumo — A análise e predição de assinaturas de alvos militares em ambiente marítimo, na faixa de radiofrequências, depende de cuidadosa radiometria do mesmo. Este ambiente apresenta inúmeros desafios, pois embora pareça uniforme, possui características típicas, entre as quais a variação das alturas das marés e das ondas, que influenciam na intensidade do sinal recebido. Este artigo apresenta o resultado de medições realizadas no ano de 2009 em canal rádio móvel marítimo, em banda estreita, na região litorânea da cidade de Macaé, Rio de Janeiro. Com os resultados obtidos, foi feita uma análise comparativa com o modelo de dois raios e calculado o fator de atenuação. Também são apresentados os resultados de estudos da variabilidade lenta, rápida, taxa de cruzamento de nível e duração média dos desvanecimentos na faixa de 3,5 GHz, que apresentam uma importante contribuição para a compreensão do comportamento do canal marítimo, seja para utilização civil ou militar.

Palavras-Chave — marítimo, propagação, variabilidade.

I. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo a análise da resposta, em banda estreita, de um canal marítimo na faixa de 3,5 GHz, através da realização de medições na região litorânea da cidade de Macaé, e posterior processamento dos dados obtidos. Adicionalmente, foi estudado um fator de correção relacionado às condições marítimas, avaliadas segundo a escala Beaufort, de modo que o modelo consagrado de dois raios pudesse melhor representar a variabilidade lenta do sinal e, conseqüentemente, melhorar a simulação dos modelos de previsão de cobertura neste ambiente.

Diversos autores [1]-[3] descrevem modelos de propagação para diferentes faixas de frequências e ambientes com características distintas. No entanto, o avanço da tecnologia, com a utilização de faixas de frequências e taxas de transmissão cada vez maiores, impulsiona a realização de testes em campo para validação ou criação de novos modelos que se adaptem a estas novas faixas de frequências e taxas. Os testes de propagação realizados e descritos neste trabalho foram realizados para o levantamento de dados e estimação de parâmetros do canal rádio móvel para as comunicações no ambiente marítimo.

A faixa de 3,5 GHz está sendo reservada, em muitos países, para o serviço de acesso em banda larga na última milha e uma análise inicial em banda estreita, como a realizada neste trabalho, permite uma avaliação do canal em termos de cobertura e variabilidade, fornecendo melhor percepção do comportamento do mesmo para análises posteriores, em banda larga.

Este artigo está organizado da seguinte forma: A seção II descreve o ambiente de medidas e a rota efetuada. A seção III descreve a configuração dos equipamentos utilizados. A seção IV descreve a forma de processamento e os resultados obtidos. A seção V apresenta uma comparação com modelo de dois raios e a obtenção do fator de atenuação. A Seção VI apresenta a caracterização do canal rádio móvel marítimo em termos de: variabilidade rápida, taxa de cruzamento de nível, duração média dos desvanecimentos e modelagem estatística do sinal, em termos de desvanecimento lento. A seção VII apresenta as conclusões sobre as pesquisas realizadas.

II. AMBIENTE MARÍTIMO

O ambiente marítimo estudado foi o situado na costa do litoral da cidade de Macaé, próximo da bacia petrolífera de Campos, no Estado do Rio de Janeiro e inclui o arquipélago de Santana, composto pelas ilhas do Francês, Santana e Ilhote Sul. Neste local se encontram embarcações de pequeno e médio portes (rebocadores), fundeadas, aguardando programação de transporte de carga e pessoal, representando um cenário típico, em pequena escala, de uma região portuária. As medições foram realizadas no período da manhã do dia 12 de dezembro de 2009, com o mar ligeiramente ondulado (força dos ventos igual a 2 na escala Beaufort – brisa leve – com velocidade de 7 a 12 km/h e mar com ligeiras ondulações de 30 cm, com cristas, mas sem arrebenção), ensolarado, temperatura em torno de 26,5 °C e umidade relativa em 86 %.

A rota utilizada para as medições está mostrada na Fig. 1, em segmentos de linha contínua na cor azul. Cada segmento representa um trecho medido a partir do qual foram gerados dados para as análises. Nesta figura é possível identificar: a posição da antena de transmissão – TX, no Morro do Engenheiro na cor vermelha; a região de visibilidade; a região de obstrução parcial; a região de obstrução total; a região obstruída pelas ilhas do arquipélago de Santana e a região de fundeio de embarcações. As linhas com tracejado mais forte, em branco, mostram as radiais aproximadas que foram utilizadas para análise e apresentação dos dados deste artigo e os números nos círculos identificam as radiais.

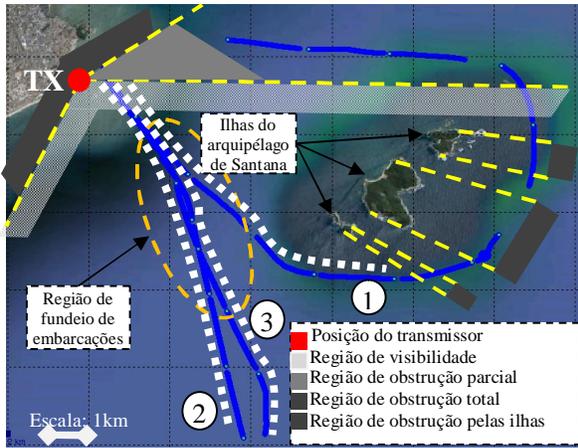


Fig. 1. Visão geral do ambiente de medição.

III. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Para a realização das medidas foi montada uma configuração composta por um sistema de transmissão e um de recepção. O sistema de transmissão foi composto de um gerador de sinais responsável pela geração da portadora de 3,515 GHz, transmitida com potência de 7 W, e uma antena monopolo vertical com ganho de 11 dBi.

O sistema de recepção foi composto por uma antena de recepção monopolo vertical com ganho de 5 dBi, um amplificador de baixo ruído (LNA) com ganho de 15 dB, um analisador de espectro (*zero span* e BW de 300 kHz), um receptor GPS, um módulo conversor analógico-digital com taxa de amostragem de 4000 aps e um microcomputador portátil para controle do analisador de espectro, captura da posição enviada pelo GPS, e armazenamento dos dados lidos do módulo conversor A/D.

O sistema de transmissão foi instalado no Morro do Engenheiro, situado no bairro de Imbetiba, Macaé, dentro da Base Carlos Walter Marinho Campos, da Petrobras. A antena de transmissão foi instalada na altitude de 42 metros. O sistema de recepção foi instalado na embarcação Propriá I, operando a serviço da Petrobras. A antena de recepção foi instalada na altitude de 5,5 metros. A velocidade da embarcação, para fins de medição, foi mantida em cerca de 18 km/h.

A Fig. 2 apresenta o diagrama básico da configuração do sistema de medição utilizado nos testes no mar.

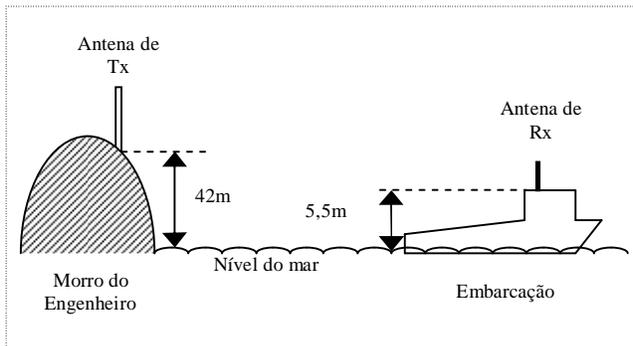


Fig. 2. Diagrama básico da configuração dos testes.

IV. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS E RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Ao todo, foram construídos três tipos de arquivos, um com o nível do sinal medido na saída de vídeo do analisador de espectros, outro com o nível do sinal medido pelo analisador de espectro através de comando enviado pelo programa de controle do microcomputador portátil e um terceiro com os registros das posições de latitude e longitude enviadas pelo GPS. Cada arquivo, com o nível de sinal medido na saída de vídeo, correspondeu a um período de 5 minutos de registro, gerando a um total de 1.200.000 amostras. Todos os dados amostrados possuíam uma marcação de tempo, de modo que fosse possível posteriormente determinar com precisão a localização espacial de cada amostra obtida. Ao todo, foram gerados 24 arquivos dos três tipos citados, onde cada grupo de três tipos de arquivos correspondeu a um trecho.

Como a saída de vídeo do analisador de espectro é dada em volts, foi feita, em laboratório, a calibração do nível do sinal medido em dBm para o valor correspondente em volts, gerando uma curva para conversão dos dados de volts para dBm.

Após o processamento, os dados obtidos foram plotados em um mapa para se ter uma ideia dos trechos percorridos e fazer uma correlação com os níveis dos sinais medidos. Esta análise inicial mostrou que alguns trechos foram obstruídos por embarcações fundeadas próximas da rota escolhida e pelas ilhas do arquipélago. A análise mostrou, também, que uma região percorrida apresentou nível de sinal abaixo do esperado decorrente de obstrução do sinal por árvores próximas da estação transmissora. A Fig. 3 mostra a planta de situação do local próximo ao sistema de transmissão, indicando os locais de visada direta, obstrução parcial e total e localização da antena do sistema de transmissão.

Neste trabalho, somente os dados obtidos na região da linha de visada foram analisados, pois representam o caso geral de propagação no ambiente marítimo, sendo identificadas três radiais para análise, mostradas anteriormente na Fig. 1. Na Fig. 3 é possível identificar os detalhes que levaram a definição das regiões de estudo: visada direta, obstrução parcial e obstrução total e local de instalação da antena de transmissão. A região com visada direta é onde se encontram as radiais utilizadas para estudo.

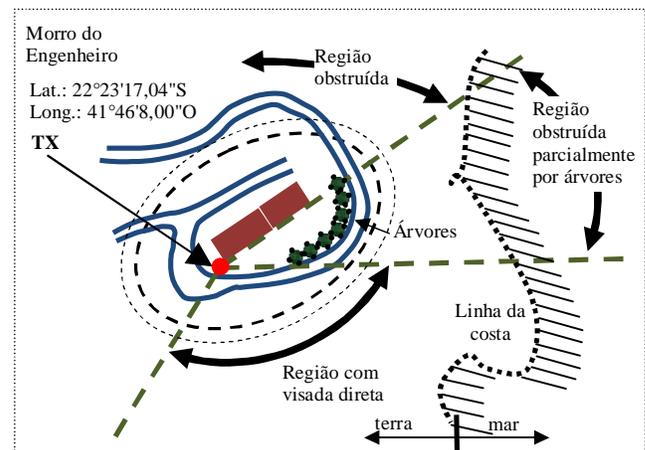


Fig. 3. Planta de situação com regiões de visada e obstrução total e parcial.

V. COMPARAÇÃO COM O MODELO DE DOIS RAIOS

Os níveis dos sinais medidos, em cada radial, foram comparados com o modelo de dois raios para Terra plana [1], em polarização vertical, pois a superfície do mar se comporta como um refletor para o sinal.

A Fig. 4 apresenta os resultados comparativos da radial 1 com o modelo de dois raios para Terra plana. Este mesmo comportamento típico foi observado nas radiais 2 e 3.

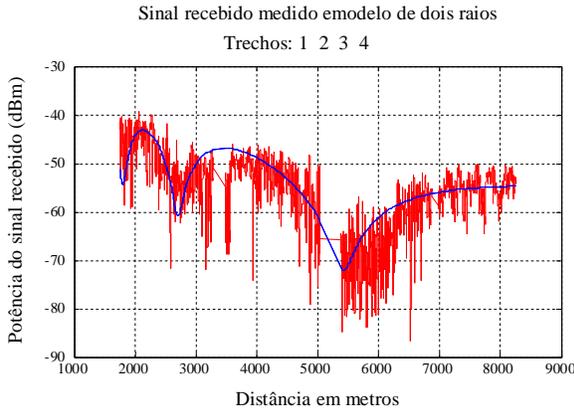


Fig. 4. Potência do sinal recebido e modelo de dois raios.

Para o traçado da curva, pelo modelo de dois raios, foi utilizada a seguinte equação [1]:

$$PL = \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \Gamma(\theta_2) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right| \right]^{-1} \quad (1)$$

e

$$\Gamma(\theta_2) = \frac{\sqrt{\epsilon_r} \cos \theta_1 - \cos \theta_2}{\sqrt{\epsilon_r} \cos \theta_1 + \cos \theta_2} \quad (2)$$

onde:

- $\Gamma(\theta_2)$: é o coeficiente de reflexão para polarização horizontal;
- $k=2\pi/\lambda$: é o número de onda; e
- ϵ_r : é a constante dielétrica do mar ($\epsilon_r = 81$).

Os outros parâmetros estão mostrados na geometria da Fig. 5.

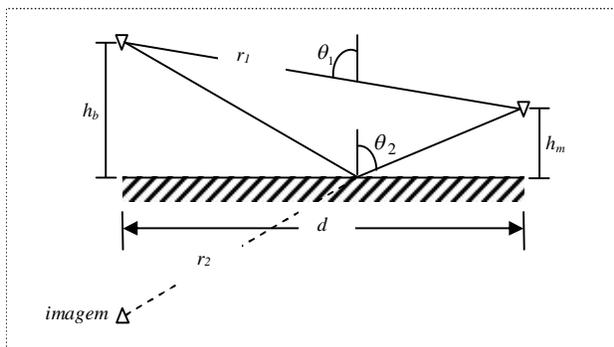


Fig. 5. Geometria para o modelo de dois raios.

Uma curva de regressão foi calculada, pelo método dos mínimos quadrados, para que fosse obtido o fator de atenuação. A Fig. 6 mostra a curva obtida para a radial 1 superposta ao sinal recebido medido.

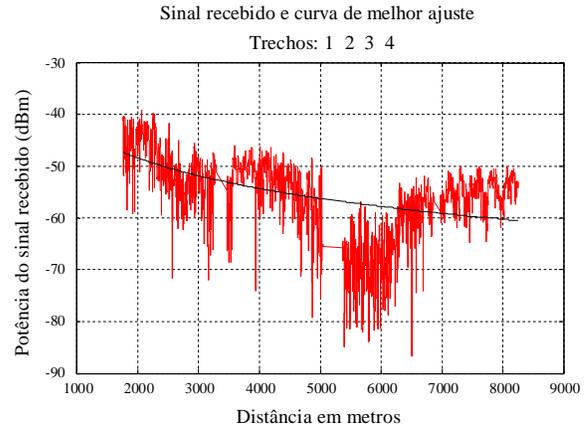


Fig. 6. Potência do sinal recebido e curva de melhor ajuste.

A curva e o fator de atenuação foram obtidos utilizando:

$$P_r = P_r(d_0) - 10n \log_{10} \left(\frac{d_i}{d_0} \right) \quad (3)$$

pelo método proposto em [4] e [5], onde:

- n : é o fator de atenuação procurado;
- P_r : é a potência do sinal recebido, em dBm;
- $P_r(d_0)$: é a potência estimada a uma distância d_0 ; e
- d_i : é distância do ponto de transmissão à posição da i -ésima amostra medida.

Portanto, para uma simulação ou análise da cobertura o modelo de dois raios para Terra plana pode ser empregado. No entanto, uma elevada variação do nível do sinal medido, mesmo após a separação do desvanecimento rápido, foi observada em todas as radiais. Uma possível explicação para este fenômeno pode ser a influência das condições do mar, que afeta tanto a rugosidade da superfície quanto a posição da antena, principalmente na altura, decorrente da movimentação da embarcação, o que deverá ser investigado com maior profundidade em trabalhos futuros.

VI. CARACTERIZAÇÃO DO CANAL RÁDIO MÓVEL MARÍTIMO

A. Variabilidade Rápida do Sinal Recebido

A variabilidade rápida do sinal recebido foi analisada comparando-se as distribuições de Rice, Gauss e Rayleigh e considerando-se setores de 20λ para separação do desvanecimento rápido do sinal medido, seguindo procedimento formulado em [4].

Um resultado comum, obtido para esta estatística, está mostrado na Fig. 7 onde a distribuição Rice apresentou a melhor aderência avaliada pelo teste qui-quadrado.

Cabe observar que a distribuição Rice já poderia ser esperada, uma vez que os testes nos setores selecionados ocorreram com visada, em sua grande maioria, havendo esporádicas obstruções parciais devido a rebocadores fundeados próximo ao local da navegação.

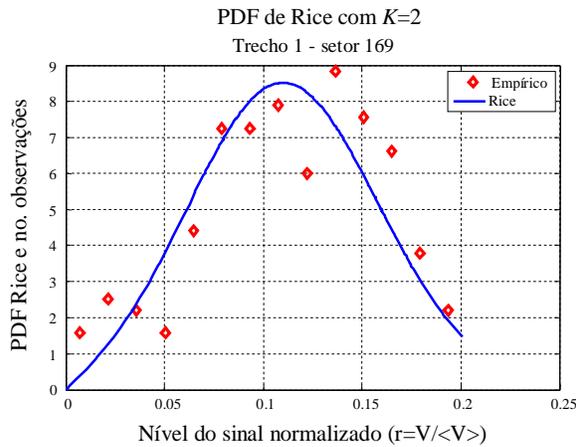


Fig. 7. PDF do desvanecimento rápido no trecho 1, setor 169, utilizando a distribuição de Rice com $K=2$.

A distribuição de Rice teórica foi calculada utilizando (4) a partir de [1]:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{(r^2 + r_0^2)}{2\sigma^2}\right] I_0\left[\frac{rr_0}{\sigma^2}\right] \quad (4)$$

onde:

- I_0 : é a função Bessel de ordem zero e argumento imaginário;
- σ : é o desvio padrão;
- r_0 : é a amplitude de um sinal estacionário, direto ou dominante;
- r : é a variável aleatória que representa o valor normalizado da voltagem.

Obs.: definida somente para $r \geq 0$.

A distribuição de Rice é frequentemente definida em termos de um parâmetro K definido por [2]:

$$K = \frac{r_0^2}{2\sigma^2} \quad (5)$$

O parâmetro K representa a potência transportada pelo sinal dominante, em um ambiente de múltiplos percursos, como é o caso do ambiente marítimo.

B. Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento

A taxa de cruzamento de nível mostra o número de vezes que a envoltória do sinal recebido atravessa certo nível estabelecido ou de referência R . A duração média dos desvanecimentos mostra o tempo médio (em segundos) no

qual a envoltória do sinal permanece abaixo deste mesmo nível de referência R . Estas duas estatísticas, de segunda ordem, permitem a caracterização do aspecto dinâmico da variação do canal em pequenas durações de tempo, o que auxilia no entendimento e na especificação das medidas que podem ser adotadas para minimizar os efeitos do desvanecimento do sinal. Estas estatísticas permitem, por exemplo, selecionar a taxa de transmissão de bit, comprimento das palavras e esquemas de codificação em sistemas digitais [2].

A Fig. 8 apresenta a curva da taxa de cruzamento de nível empírica e teóricas (Rice e Rayleigh), no setor 169 do trecho 1, onde pode ser verificado que apresenta uma aderência próxima a da distribuição Rice com fator $K=2$.

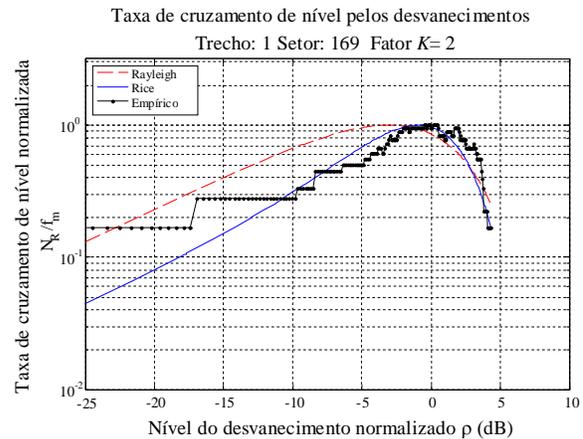


Fig. 8. Taxa de cruzamento de nível no setor 169 do trecho 1.

A duração média dos desvanecimentos para o mesmo setor 169 do trecho 1 está mostrada na Fig. 9, onde se observa que não há uma boa aderência com as curvas de Rayleigh e Rice, o que sugere a busca por uma estatística que apresente melhor aderência, o que será feito em trabalhos futuros.

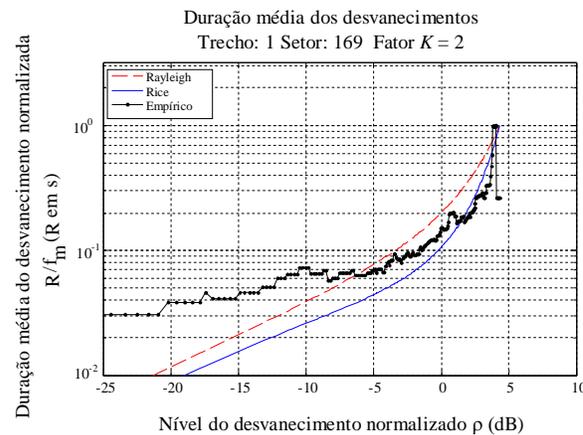


Fig. 9. Duração média dos desvanecimentos no setor 169 do trecho 1.

C. Modelagem estatística do sinal recebido

Um estudo da variabilidade lenta do sinal recebido mostrou que as radiais obtidas não apresentam um bom ajuste para a curva log-normal conforme comumente apresenta a literatura técnica [1]-[4], pois, conforme está mostrada na

Fig. 10, a PDF (função densidade de probabilidade) log-normal apresenta um deslocamento mais acentuado para a esquerda, indicando que outra distribuição poderia apresentar melhor ajuste.

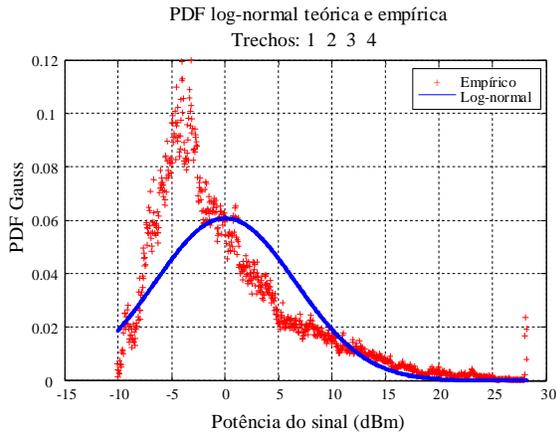


Fig. 10. PDF log-normal comparada com a empírica na radial 1.

A análise da variabilidade lenta do sinal indicou que existe uma relação entre a variação da altura da antena e as oscilações da embarcação. E, uma vez que o movimento da embarcação está ligado às condições do mar, é possível relacionar a variabilidade lenta do sinal com as condições do mar fornecendo um modo de avaliação tanto das condições do mar quanto das características da embarcação em função do nível do sinal medido.

Inicialmente, a movimentação da embarcação foi relacionada com a altura da antena a partir de:

$$h(Y) = H \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{\Lambda} x\right) + h_m \quad (6)$$

onde:

- Y : é a altura instantânea da embarcação e uma variável aleatória;
- $h(Y)$: é a altura da antena da embarcação e uma variável aleatória;
- h_m : é a altura da antena da embarcação em relação ao nível médio do mar;
- H : é uma variável aleatória, com distribuição normal, que considera a variação da altura da embarcação;
- x : é a distância horizontal percorrida pela embarcação ou pela onda; e
- Λ : é o comprimento da onda do mar, com distribuição uniforme.

Esta expressão (sem h_m) foi utilizada em [7] para determinar a variação da altura das ondas do mar. No presente estudo foi utilizada com o objetivo de mostrar a variação da oscilação da embarcação em função das ondas do mar conforme mostra a Tabela I.

TABELA I VARIACÃO DA ALTURA DAS ONDAS DO MAR E DA EMBARCAÇÃO

Ondas do mar	Embarcação
$y=h.\text{sen}(2\pi x/\gamma)$	$Y=H.\text{sen}(2\pi x/\Lambda)$

Assim, a densidade de variação da altura da embarcação mar terá distribuição normal dada por:

$$K(H) = \frac{\exp\left(-H^2 / 2\sigma_H^2\right)}{\sigma_H \sqrt{2\pi}} \quad (7)$$

onde:

- σ_H : é o desvio padrão da altura de oscilação da embarcação.

A densidade do comprimento de oscilação da embarcação possui distribuição uniforme e é dada por:

$$F(\theta) = \begin{cases} 1/\pi & |\theta| < \pi/2 \\ 0 & |\theta| \geq \pi/2 \end{cases} \quad (8)$$

com:

$$\theta = \frac{2\pi}{\Lambda} x \quad (9)$$

Com estas considerações, pode ser verificado que a altura da antena da embarcação com ondulação irá variar em torno da altura da antena sem ondulação. Assim, obtêm-se a altura da antena da embarcação conforme (6) que será normalizada como:

$$h_n(Y) = h(Y) / \langle h(Y) \rangle \quad (10)$$

O fator de ganho ou atenuação devido à altura da antena pode ser calculado, em decibéis, através do fator $20\log_{10}(h_n(Y))$. O valor assim obtido pode ser somado ao valor calculado da perda de percurso pelo modelo de dois raios dado por (1) e pode ser colocada em função das condições do mar dada pela escala Beaufort. Desta forma, foi possível prever e simular a perda de percurso com maior precisão em função das condições observadas do mar:

$$PL_{h_m}^B = -[PL(dB) + h_{dB}(Y)] \quad (11)$$

onde:

- B : é a escala de vento Beaufort;
- h_m : altura da antena receptora em relação ao nível médio do mar.

A altura máxima provável das ondas do mar, decorrente da escala Beaufort, fornecerá o valor que será multiplicado por 7 para se obter σ_H utilizado para se obter os valores de H .

Em relação ao valor de Λ , cabem duas observações. A primeira relacionada ao balanço da embarcação: é razoável supor que quando não há ondulação no mar a embarcação apresentará pouca ou nenhuma oscilação. A segunda é relacionada às características dimensionais, forma e peso da embarcação: embarcações menores e mais leves estarão mais sujeitas as ondulações do mar; enquanto que embarcações maiores e mais pesadas estarão menos sujeitas a estas condições. Foi verificado que, nas condições dos testes, o valor de Λ é função do comprimento da embarcação no mar.

Também deve ser observado que valores de σ_H (desvio padrão da altura de oscilação da embarcação) e Λ

(comprimento da onda de oscilação da embarcação), para a determinação da variação de h_m , foram estimados de modo empírico e verificados que estão relacionados às características das embarcações cuja oscilação depende das condições do mar, ou seja:

Condições do mar (escala Beaufort) => σ_h => σ_H

A relação entre a variação das ondas do mar (condições do mar) e de oscilação da embarcação (σ_H) foi estabelecido de modo empírico, devendo ser mais bem investigada em trabalhos futuros.

Uma simulação foi feita e comparada com o sinal medido, conforme função de distribuição acumulada empírica mostrada na Fig. 11, mostra que este pode ser o caminho para se estimar com maior precisão a variação do sinal recebido em função das condições do mar, além de permitir a obtenção das condições do mar e características da embarcação.

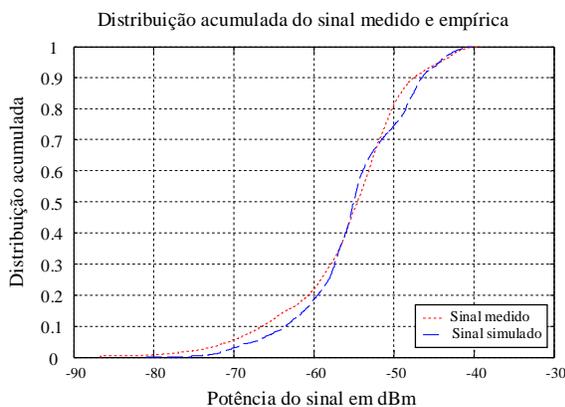


Fig. 11. Comparação da distribuição do sinal medido com o simulado.

VII. CONCLUSÃO

Neste artigo foram apresentados os resultados de medições realizados na região litorânea próxima da bacia petrolífera de Campos, na faixa de 3,5 GHz, em banda estreita. Foi concluído que a atenuação em ambiente marítimo segue o modelo de dois raios para a Terra plana, embora algumas medidas não tenham apresentado os desvanecimentos profundos típicos daquele modelo, o que mereceu uma análise mais profunda em termos de variabilidade lenta e sua relação com as características do ambiente.

As variações rápidas do sinal apresentaram uma distribuição típica de Rice, com valores de K superiores a 2, indicando a presença de raio dominante em todo percurso da embarcação dentro da região de visibilidade.

Foi constatado que a variabilidade lenta medida não apresentou boa aderência com o modelo comumente utilizado em ambientes terrestres (PDF log-normal). Tal variação pode ser explicada como sendo resultado da variação da altura da antena receptora decorrente das condições do mar. Assim, um fator de ajuste para o modelo de dois raios para a Terra plana foi proposto de modo que fossem consideradas as condições do mar, seu efeito na embarcação e consequentemente na variação da altura da antena. Uma simulação da variação da altura da embarcação mostrou que este pode ser o caminho

para se levar em consideração o efeito das condições do mar na composição do sinal recebido.

Finalmente, considerando ainda que a faixa de 3,5 GHz está sendo reservada para o serviço de acesso em banda larga na última milha em vários países, a análise em banda estreita apresentada neste trabalho permite uma avaliação prévia do comportamento do canal marítimo em termos de cobertura e variabilidade, incentivando pesquisas posteriores em outras condições climáticas e horários bem como também em banda larga.

RECONHECIMENTO

Os autores gostariam de agradecer a Petrobras e ao Prof. Dr. Gláucio L. Siqueira, do PUC/CETUC, que apoiaram a realização dos testes de propagação fornecendo embarcação e alguns equipamentos constituintes da configuração do sistema de medição.

REFERÊNCIAS

- [1] H. L. Bertoni, "Radio Propagation for Modern Wireless Systems", Prentice Hall PTR, New Jersey, 2000.
- [2] J. D. Parsons, "The mobile Radio Propagation Channel" – 2nd edition, John Wiley & Sons LTD, West Sussex, 2000.
- [3] T. S. Rappaport, "Wireless Communications – Principles & Practice", Prentice Hal, New Jersey, 2000.
- [4] W. Afric, B. Z. Cihlar, S.B. Grgic, "Methodology of Path Loss Calculation using Measurement Results", IEEE Proceedings, p. 257–260, Junho 2007 [14th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing, Slovenia, 2007].
- [5] M. A. Aboul-Dahab, H.M. Kamel, "Methodology for calculating Path Loss Upper and Lower Bounds for WiMax", IEEE Proceedings, p. 28–32, Dezembro 2009 [3rd International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), Egypt, 2009].
- [6] M. D. Yacoub, "Foundations of Mobile Radio Engineering", CRC Press, Boca Raton, 1993.
- [7] A. R. Miller, R. M. Brown, E. Vegh, "A New Derivation for the Rough Surface Reflection and for the Distribution of Sea Wave Elevations", NRL Report 8744, Setembro 1983.