



DESEMPENHO DO MODEM-CSUB PARA A COMUNICAÇÃO ACÚSTICA SUBMARINA: UMA AVALIAÇÃO REALIZADA NAS PROXIMIDADES DA ILHA DO CABO FRIO[♦]

Jefferson Osowsky

Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira – IEAPM
Rua Kioto, nº 253, Praia dos Anjos, Arraial do Cabo, RJ, Brasil
jefferson@ieapm.mar.mil.br

Luis Felipe Pereira dos Santos Silva

Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira – IEAPM
Rua Kioto, nº 253, Praia dos Anjos, Arraial do Cabo, RJ, Brasil
li.santossilva@hotmail.com

Alexandre Geddes Lemos Guarino

Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira – IEAPM
Rua Kioto, nº 253, Praia dos Anjos, Arraial do Cabo, RJ, Brasil
guarino@ieapm.mar.mil.br

Fábio Contrera Xavier

Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira – IEAPM
Rua Kioto, nº 253, Praia dos Anjos, Arraial do Cabo, RJ, Brasil
contrera@ieapm.mar.mil.br

Resumo: Este trabalho apresenta uma avaliação de desempenho do Modem-CSUB para a comunicação acústica submarina. Este modem acústico foi definido por software e está sendo desenvolvido pelo Grupo de Acústica Submarina do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira. Esta avaliação se baseia na análise de curvas BER x E_b/N_0 obtidas primeiramente a partir de uma simulação computacional de um canal acústico submarino sujeito a ruído aditivo gaussiano branco e em seguida obtidas a partir da transmissão de dados entre dois navios distantes uma milha náutica entre si e posicionados nas proximidades da ilha do Cabo Frio, Arraial do Cabo/RJ.

Palavras-chave: comunicação acústica submarina; modem acústico submarino.

Abstract: This work presents a performance assessment of the Modem-CSUB for the underwater acoustic communication. This acoustic modem has been defined by software and is being developed by the Underwater Acoustic Group from Institute for Marine

♦ Os autores deste trabalho e o Grupo de Acústica Submarina do IEAPM agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro concedido mediante as subvenções números 381984/2012-5/DTI, 383030/2014-5/DTI e 383094/2014-3/DTI e pelo suporte financeiro da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil (SecCTM), processo número TC 53000/2011-001/2011.

Studies Admiral Paulo Moreira. This assessment is based on the analysis of the BER x E_b/N_0 graphs that were obtained from 1) a computational simulation of an underwater acoustic channel subject to an additive white Gaussian noise and 2) the data transmission between two ships separated from a distance of one nautical mile and positioned close to Cabo Frio island, Arraial do Cabo/RJ.

Keywords: *underwater acoustic communication; underwater acoustic modem.*

1. Introdução

A tarefa de se realizar uma comunicação entre dois pontos, *A* e *B*, separados por uma grande distância utilizando-se a água como meio de transmissão de dados via a propagação de ondas acústicas, estas utilizadas como portadoras de energia contendo as informações a serem transmitidas do ponto *A* para o *B*, tem, ao longo das décadas, atraído a atenção de centros de pesquisa, pesquisadores e engenheiros da área de telecomunicações por todo o mundo visto que o avanço no desenvolvimento de sensores para telemetria, navegação e posicionamento tem alcançado níveis não imagináveis à décadas atrás. Neste contexto, a comunicação a distância por meio aéreo se encontra muito mais desenvolvida do que a telecomunicação por meio submarino. Este *gap* tecnológico é devido principalmente às diferenças físicas entre os dois fluidos, ar e água. A escolha do uso de ondas acústicas ao invés de ondas eletromagnéticas como portadoras das informações transmitidas se deve à rápida absorção que a propagação destas últimas sofrem em meio aquoso em relação à propagação de ondas mecânicas, e.g., a absorção de ondas acústicas com frequências comumente usadas para comunicação submarina é menor por três ordens de grandeza do que a absorção de ondas eletromagnéticas [1]. Além disso, o próprio canal de comunicação submarino apresenta características e propriedades bem distintas daquelas existentes nos canais de comunicação aéreos (veja [2] e as referências lá contidas).

Apesar das dificuldades encontradas no desenvolvimento de sistemas de comunicação acústicos submarino, modems acústicos “de prateleira” estão disponíveis hoje em dia no mercado, tais como: *Teledyne Benthos underwater acoustic modem*, *LinkQuest's SoundLink underwater acoustic modem*, *EvoLogics underwater acoustic communication system*, *Aquatec's AQUAmodem* e *DSPComm's Aquacommod underwater wireless modem*. Estes modems podem alcançar taxas de transmissão de dados da ordem de centenas de bits/s para distâncias entre transmissor e receptor de até 10 km. Por outro lado, podem ser encontrados na literatura modems não comerciais idealizados e desenvolvidos em laboratórios de pesquisa de universidades e institutos [3, 4, 5] principalmente para serem integrados em veículos autônomos submarinos. Dentre estes trabalhos, o mais conhecido na comunidade científica é denominado de *WHOI Micro-Modem*, desenvolvido pelos pesquisadores da *Woods Hole Oceanographic Institution* [6, 7, 8] e que já se encontra na versão 2 [9], esta com maior capacidade computacional, recurso de memória, precisão no sistema de *real-time clock*, entre outras melhorias em relação à versão 1. As análises de desempenho dos modems da WHOI e da AQUAmodem são apresentadas em [10] e [11], respectivamente.

A fim de se dominar a tecnologia envolvida na área de comunicação acústica submarina, evitando assim a dependência nacional em sistemas importados do tipo *blackbox* nesta área crítica para a defesa da “Amazônia Azul” brasileira e dos recursos

naturais contidos nela, o Grupo de Acústica Submarina do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) resolveu desenvolver sua própria tecnologia para conceber o primeiro sistema de comunicação acústica submarina definido por *software* 100% nacional e de propriedade da Marinha do Brasil, denominado de Modem-CSUB.

Este artigo tem o objetivo de apresentar as curvas de desempenho do Modem-CSUB, taxa de erro de bit (*BER*) versus energia de bit/densidade espectral do ruído (E_b/N_0), obtidas através de simulações computacionais em um canal de comunicação submarino sujeito ao multipercurso, desvanecimento e ruído aditivo gaussiano branco (*AWGN*) e, em seguida, através da transmissão de um conjunto de dados entre dois navios distantes uma milha náutica entre si e posicionados nas proximidades da ilha do Cabo Frio, Arraial do Cabo/RJ. Para tal, este trabalho está dividido como se segue: Na seção 2 é formulado matematicamente o problema de comunicação digital ponto-a-ponto que é abordado neste trabalho. O projeto do Modem-CSUB é descrito na seção 3. Nas seções 4 e 5 são apresentados os resultados das simulações e do teste em campo realizado nas proximidades da ilha do Cabo Frio, Arraial do Cabo/RJ, e as considerações finais deste trabalho, respectivamente.

Notação: $\mathbb{Z}^+$ denota o conjunto dos números inteiros positivos. Sejam $X(t)$ e $Y(t)$ dois processos aleatórios, então $E[X(t)Y(t)]$ designa a correlação entre eles, onde $E[\cdot]$ é o valor médio de um processo aleatório. O símbolo σ^2 significa a variância de uma variável aleatória. Sejam f e g duas funções reais, contínuas e integráveis em um dado domínio, o operador $\langle f, g \rangle$ define o produto interno entre a função f e a função g .

2. Formulação do Problema

Nesta seção será descrita de forma sucinta a formulação matemática para a transmissão de dados digitais em canais de comunicação submarino utilizando modulação por chaveamento em frequência (FSK) com $M=2^{N_b}$, $N_b=1, 2, 3, \dots$, portadoras ortogonais, i.e., (*M*-FSK).

Dada uma sequência de dados binários $\{s\}$, $s \in [0, 1]$, agrupados em sub-sequências, chamadas também de símbolos, de N_b bits contíguos $\{s_m\}$, $m=1, \dots, M$. O sinal analógico $s_m(t)$ que transmite a sub-sequência $\{s_m\}$ via modulação *M*-FSK é construído como se segue [12]:

$$s_m(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi(f_1 + (m-1)\Delta f)t), & \Delta f = k(T_s)^{-1}, \quad k \in \mathbb{Z}^+, \quad 0 \leq t \leq T_s, \\ 0, & T_s < t \leq T_s + T_g, \end{cases} \quad (1)$$

onde A é a amplitude da portadora, f_1 é a frequência da portadora para a sub-sequência de bits $\{s_1\}$, Δf é a distância entre portadoras contíguas e ortogonais entre si, T_s é o tempo do sinal ou do símbolo, T_g é o tempo de guarda ou de silêncio utilizado para reduzir a interferência intersimbólica (ISI) do sinal transmitido para toda a sequência de dados digitais $\{s\}$. Note que a ortogonalidade entre as portadoras em (1), i.e., $\langle s_i(t), s_j(t) \rangle = 0$ para todo $i \neq j$, $i, j=1, \dots, M$, é assegurada pela definição de Δf .

Caso seja aplicado ao sinal $s_m(t)$ a técnica de enjanelamento de *Hann* [13] a fim de se reduzir o efeito de vazamento espectral das portadoras adota-se um espaçamento entre portadoras igual a $\Delta f = 2k(T_s)^{-1}$, $k \in \mathbb{Z}^+$.

O sinal acústico $s_m(t)$ propaga-se por meio de ondas mecânicas através de um canal de comunicação submarino sujeito ao multipercurso, desvanecimento e ruído aditivo

gaussiano branco (*AWGN*), cuja sua função de resposta ao impulso $h(t)$ pode ser escrita em função das respostas ao impulso de cada percurso $h_p(t)$, p sendo o p -ésimo caminho de propagação, como abaixo [14]:

$$h(t) = \sum_p h_p(t - \tau_p), \quad H(j\omega) = \Gamma_p [A(l_p, \omega)]^{-1/2}, \quad (2)$$

onde $H(j\omega)$ representa a função de resposta em frequência de $h(t)$, τ_p é o atraso no tempo de chegada do sinal transmitido $s_m(t)$ para o caminho p , Γ_p denota o coeficiente de reflexão cumulativa ao longo do p -ésimo percurso e a função $A(l_p, \omega)$ modela a perda de sinal por espalhamento em função de sua frequência ω e do comprimento do p -ésimo caminho percorrido por $s_m(t)$, l_p . Como a função $A(\cdot)$ é diretamente proporcional aos seus argumentos, cada percurso de um canal de comunicação acústico submarino atua como um filtro passa-baixa para o sinal transmitido.

Para finalizar esta seção, nós relembramos duas definições matemáticas que serão utilizadas neste trabalho: 1) relação sinal-ruído (*SNR*); e 2) energia de bit por densidade espectral de ruído (E_b/N_0).

Relação sinal-ruído: Seja $s(t) = s_m(t) + r(t)$, $s_m(t)$ como em (1) e $r(t)$ um ruído aleatório independente e identicamente distribuído (i.i.d.) de média igual a zero, tal que $E[s_m(t)r(t)] = 0$. Então a *SNR* entre $s_m(t)$ e $r(t)$ é dada por:

$$SNR = \frac{E[(s_m(t))^2]}{E[(r(t))^2]} = \frac{E[(s(t))^2]}{E[(r(t))^2]} - 1. \quad (3)$$

Energia de bit (E_b)/Densidade espectral de ruído (N_0) [15]: Seja $s(t) = s_m(t) + r(t)$, $s_m(t)$ como em (1), com largura de banda B_w , representando um símbolo contendo N_b bits e tempo de símbolo igual a T_s e $r(t)$ um ruído *AWG* de média zero e variância $\sigma^2 = N_0/2$. Então a razão, em decibels, entre E_b por N_0 é dada por:

$$\frac{E_b}{N_0} = 10 \log \left(\frac{1}{\rho} SNR \right), \quad \rho = \frac{N_b}{T_s B_w}, \quad (4)$$

onde *SNR* é como em (3) e ρ determina a eficiência espectral, em *bits/s/Hz*, da modulação digital utilizada.

3. Projeto do Modem-CSUB

O Projeto do Modem-CSUB será descrito nesta seção. Seu protocolo de comunicação e os subsistemas nele existentes. Cabe ressaltar que o projeto de um modem sempre terá como foco principal o seu sistema de recebimento dos dados transmitidos. Todas as etapas deste equipamento de recepção de dados visa reduzir a taxa de erro de bit na medida que o canal de comunicação submarino deforma o sinal original.

Nosso modem acústico submarino é baseado na modulação *M-FSK* com espectro de frequência na banda audível e espaçamento entre portadoras igual a Δf Hz. O tempo de guarda T_g , aquele que separa dois símbolos contíguos, é definido com sendo quatro vezes maior que o tempo do símbolo T_s . Ressalta-se que a ortogonalidade entre as portadoras é garantida pela definição de Δf em (1).

Além disso, uma técnica de entrelaçamento de bits em conjunto com a adição de um

código antecipativo de correção de erros foram usados no protocolo de comunicação deste modem a fim de se reduzir os erros na decodificação dos bits causados pelas interferências inerentes ao canal de comunicação submarino. Um sinal do tipo *chirp* foi também introduzido no protocolo de comunicação para marcar o início e o final dos pacotes contendo 48 símbolos que compõem a mensagem transmitida. Como exemplo, a Figura 1 ilustra o espectrograma de um sinal com dois pacotes a ser transmitido pelo modem-CSUB.

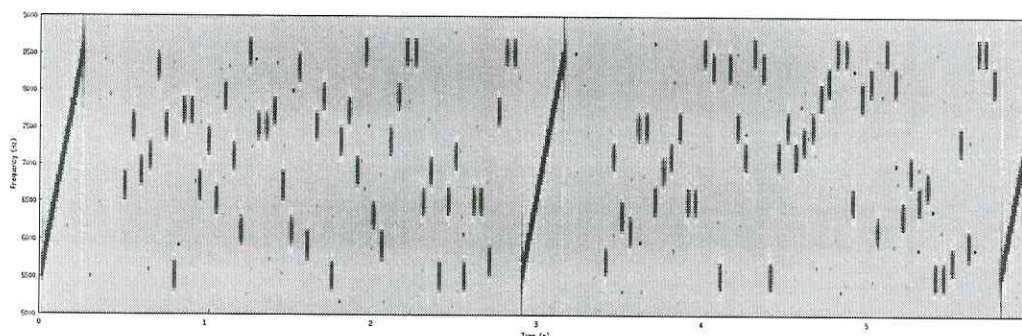


Figura 1: Espectrograma de uma mensagem contendo 96 símbolos, empacotada em dois pacotes com 48 símbolos cada. Três *chirps* delimitam os pacotes da mensagem a ser transmitida pelo modem-CSUB.

A Figura 2 ilustra o processo de recepção, aplicativo *csrx*, das mensagens transmitidas pelo aplicativo *cstx*. Estes programas foram desenvolvidos em linguagem de programação C para sistema operacional *Windows 7.0* ou superior. Estes dois aplicativos realizam chamadas para funções chaves no processo de modulação e demodulação as quais foram implementadas no MATLAB e compiladas através da ferramenta *MATLAB Runtime Compiler*, gerando assim uma biblioteca de enlace dinâmico (DLL) acessíveis pelos *csrx* e *cstx*.

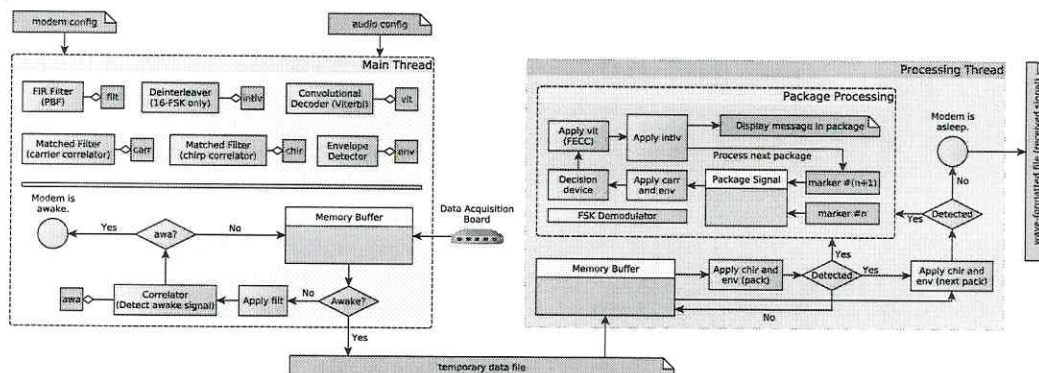


Figura 2: Aplicativo de recepção *csrx* do modem-CSUB implementado em linguagem de programação C e *MATLAB Runtime Compiler* para sistema operacional *Windows 7.0* ou superior.

Os dois arquivos de configuração contêm os parâmetros que ajustam o modo de modulação e demodulação FSK e o tipo de dispositivo de áudio (*data acquisition board*) utilizados na transmissão e na recepção dos sinais. Primeiramente, no *Main Thread*, é aplicado um filtro passa-faixa ao sinal recebido na banda de frequência da modulação *M-FSK* configurada em arquivo. O modem é acordado por um sinal multitonal. Em seguida, todas as amostras recebidas do dispositivo de áudio são transferidas para um arquivo

temporário e processadas pelo *Processing Thread*. Neste, os sinais que marcam início e final de pacote, sinais do tipo *chirp*, são identificados, delimitando assim os pacotes recebidos. Estes pacotes passam pelo demodulador FSK a fim de detectar os bits recebidos. A mensagem é então mostrada na tela e todo o sinal é convertido em arquivo de áudio no formato *wave*. Por fim, o modem volta a dormir e o *Processing Thread* termina sua operação, ativando novamente o *Main Thread*.

4. Simulações e Experimento em Campo

Duas avaliações de desempenho do Modem-CSUB serão efetuadas nesta seção, ambas terão como foco o levantamento das curvas $BER \times E_b/N_0$, as quais relacionam a taxa de erro de bit com o nível de ruído existente num canal de comunicação *AWGN*, mas que pode ser expandido para outros tipos de canais de comunicação. A primeira foi baseada na transmissão de dados via um canal de comunicação sujeito a um ruído *AWG* simulado computacionalmente. A segunda avaliação de desempenho foi realizada nas imediações da ilha do Cabo Frio na data de 25 de junho de 2014 com o AvPqOc “Diadorim” e um segundo barco “paisano” que serviu de apoio ao sistema de recepção do Modem-CSUB.

Na simulação computacional, o sinal original foi transmitido para a porta de saída da placa de áudio de um laptop e recebido pela porta de entrada da mesma placa. Após a digitalização do sinal, um ruído gaussiano branco de média zero e $\sigma^2 = 0.1$ foi adicionado a este sinal que só então passava pelo processo de demodulação mostrado na Figura 2. A variação do E_b/N_0 foi efetuado variando-se o nível de áudio transmitido pela saída do dispositivo de áudio. As configurações do modem-CSUB utilizadas para esta avaliação em ambiente computacional são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Três configurações para a modulação digital *M*-FSK do modem-CSUB para a realização do levantamento das curvas $BER \times E_b/N_0$.

Análise	Ordem M	Janela	T_s (ms)	T_g (ms)	Δf (Hz)	B_w (Hz)	ρ (bits/s/Hz)	f_1 (Hz)	f_M (Hz)
A1	2	Nenhuma	8	20	250	500	1/4	1375	1625
A2	2	Hann	8	20	500	1000	1/8	1250	1750
A3	8	Hann	10	20	400	3200	1/32	4400	7200

O efeito do enjanelamento das portadoras como em (1) é mostrado na Figura 3. Nela tem-se as formas das portadoras para $M = 2$ da Tabela 1 no domínio da frequência.

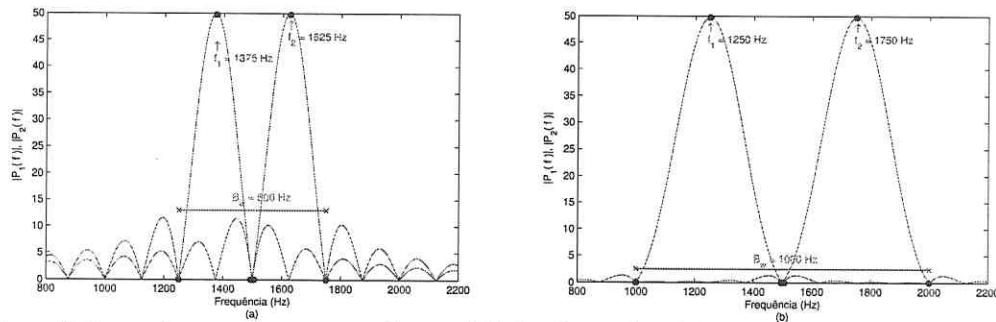


Figura 3: Forma das portadoras para as duas modulações 2-FSK da Tabela 1 no domínio da frequência. a) as portadoras não foram enjaneladas; e b) as portadoras foram enjaneladas por uma janela do tipo Hann.

Para a modulação 8-FSK da Tabela 1, a forma das portadoras no domínio da frequência se assemelha àquela mostrada na Figura 3(b), porém com diferentes f_i e Δf .

As avaliações do modem-CSUB para sinais $s_m(t)$ sujeitos à ruído AWG simulados computacionalmente são mostradas na Figura 4. Nas Figuras 4(a)-(c) têm-se os resultados obtidos para as análises A1-A3 da Tabela 1, respectivamente.

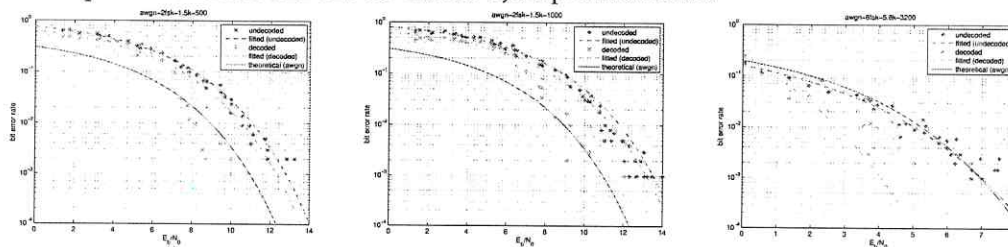


Figura 4: Levantamento das curvas $BER \times E_b/N_0$ para A1-A3 da Tabela 1 na avaliação do desempenho do modem-CSUB, utilizando modulação M-FSK e canal de comunicação submarino simulado.

A segunda avaliação de desempenho do modem-CSUB foi realizada nas imediações da ilha do Cabo Frio, vide Figura 5(a), na data de 25 de junho de 2014 com o AvPqOc “Diadorim” utilizado como transmissor do sinal modulado e um barco “paisano” utilizado como modem receptor do sinal. Nas Figuras 5(b) e (c) têm-se os resultados obtidos para as análises A2 e A3 da Tabela 1, respectivamente. Cabe ressaltar que neste caso, o canal submarino está sujeito ao desvanecimento, ao multipercurso e à ruído AWG. Estes efeitos, reduziram significativamente a eficiência do modem-CSUB.

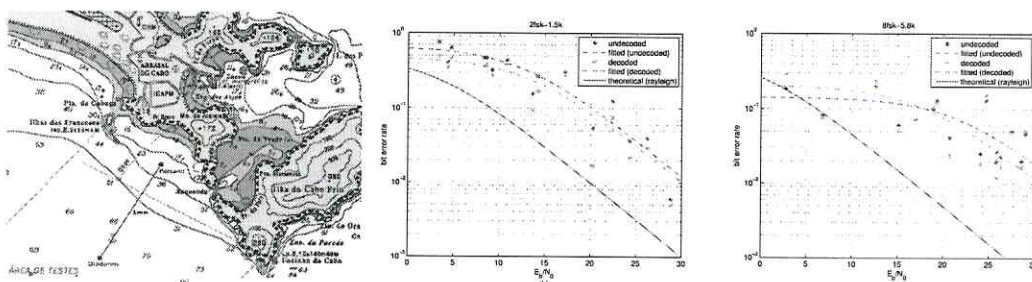


Figura 5: Levantamento das curvas $BER \times E_b/N_0$ para A2 e A3 da Tabela 1 na avaliação do desempenho do modem-CSUB, utilizando modulação M-FSK e canal de comunicação submarino real.

5. Considerações Finais

Este artigo apresentou os resultados alcançados pelo Modem-CSUB em dois testes de desempenho para a obtenção de suas curvas $BER \times E_b/N_0$. O primeiro sendo executado através de uma análise computacional, simulando um canal de comunicação sujeito a ruído do tipo AWG. Já a segunda avaliação de desempenho foi realizada em campo, nas proximidades da ilha do Cabo Frio, Arraial do Cabo/RJ, em 25 de junho de 2014 e teve por objetivo levantar a curva $BER \times E_b/N_0$ do modem em um ambiente real a partir da transmissão de dados digitais entre dois navios distantes uma milha náutica entre si.

Referências

- [1] Ayaz, M.; Baig, I.; Abdullah, A.; Faye, I. A survey on routing techniques in underwater wireless sensor networks, **Journal of Network and Computer Applications** 34(6), pp. 1908-1927, 2011.

- 
- [2] Quazi, A.; Konrad, W. Underwater acoustic communications, **Communications Magazine, IEEE** 20(2), pp. 24-30, 1982.
 - [3] LeBlanc, L. R.; Beaujean, P. P.; Singer, M.; Boubli, C.; Strutt, G. T. Chirp FSK modem for high reliability communication in shallow water, Proceedings on **Oceans Conference, MTS/IEEE**, pp. 1-6, Seattle, USA, 1999.
 - [4] LeBlanc, L. R.; Singer, M.; Beaujean, P. P.; Boubli, C.; Alleyne, J. R. Improved chirp FSK modem for high reliability communications in shallow water, Proceedings on **Oceans Conference, MTS/IEEE**, pp. 601-603, Providence, USA, 2000.
 - [5] Wills, J.; Ye, Wei.; Heidemann, J. Low-power acoustic modem for dense underwater sensor networks, Proceedings on **1st International Workshop on Underwater Networks, ACM**, pp. 1-7, Los Angeles, USA, 2006.
 - [6] Freitag, L. E.; Grund, M.; Partan, J.; Ball, K.; Singh, S.; Koshi, P. Multi-band acoustic modem for the communications and navigation aid AUV, Proceedings on **Oceans Conference, MTS/IEEE**, pp. 1080-1085, Washington, USA, 2005.
 - [7] Freitag, L.; Grund, M.; Singh, S.; Partan, J.; Koshi, P.; Ball, K. The WHOI micro-modem: An acoustic communications and navigation system for multiple platforms, Proceedings on **Oceans Conference, MTS/IEEE**, pp. 1086-1092, Washington, USA, 2005.
 - [8] Singh, S.; Grund, M.; Bingham, B.; Eustice, R.; Singh, H.; Freitag, L. Underwater acoustic: Navigation with the WHOI micro-modem, Proceedings on **Oceans Conference, MTS/IEEE**, pp. 1-4, Boston, USA, 2006.
 - [9] Gallimore, E.; Partan, J.; Vaughn, I.; Singh, S.; Shusta, J.; Freitag, L. The WHOI micromodem-2: A scalable system for acoustic communications and networking, Proceedings on **Oceans Conference, MTS/IEEE**, pp. 1-7, Seattle, USA, 2010.
 - [10] Singh, S.; Webster, S. E.; Freitag, L.; Whitcomb, L. L.; Ball, K.; Bailey, J.; Taylor, C. Acoustic communication performance of the WHOI micro-modem in sea trials of the Nereus vehicle to 11,000 m depth, Proceedings on **Oceans Conference, MTS/IEEE**, pp. 1-6, Biloxi, USA, 2009.
 - [11] Pusey, G. M.; Duncan, A. J.; Smerdon, A. M. Analysis of acoustic modem performance for long range horizontal data transmission, Proceedings on **Oceans Conference, Europe/IEEE**, pp. 1-9, Bremen, Germany, 2009.
 - [12] Proakis, J. G. **Digital communication**, 4th Edition, McGraw-Hill, 2000.
 - [13] Oppenheim, A. V.; Schaffer, R. W. **Discrete-time signal processing**, 3th Edition, Prentice Hall, 2009.
 - [14] Stojanovic, M.; Preisig, J. Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization, **Communications Magazine, IEEE** 47(1), pp. 84-89, 2009.
 - [15] Haykin, S. **Communication systems**, 4th Edition, John Wiley & Sons, 2001.