

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA
XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Comparação das respostas dos sinais Tom (CW) e *Chirp* Linear (LFM) no meio submarino

Silva, A. L. L.¹; Vio, R. P.²; Calazans, R. M.³; Xavier, F. C.⁴

¹⁻⁴ Pós-Graduação em Acústica Submarina, Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Arraial do Cabo, RJ, Brasil, andre_all@yahoo.com.br, {peres.vio, moraes.calazan}@marinha.mil.br, fabiofcx@gmail.com

Resumo

A capacidade de controlar equipamentos sem conexão física (cabos de transmissão) é comum quando se utilizam pulsos eletromagnéticos e o ar é o guia de ondas. No entanto, o ambiente oceânico subaquático não permite a propagação eletromagnética para além de alguns metros. Neste caso, as ondas sonoras apresentam-se como solução. Para que esta comunicação seja bem-sucedida, o equipamento precisa ser capaz de interpretar um sinal recebido, compará-lo com um sinal familiar e então executar um comando específico. Por essa razão, o desenvolvimento de algoritmos de comunicação para atuadores submersos comandados por pulsos sonoros compõe os estudos em acústica submarina. O objetivo do experimento detalhado neste artigo foi verificar qual das formas de onda, um Tom (CW) ou um *Chirp* Linear (LFM), é mais eficiente como sinal chave para acionamento de atuadores submersos utilizando um algoritmo de filtragem casada para reconhecê-lo. Com base na literatura de processamento de sinais, a filtragem casada é a técnica mais utilizada para encontrar um sinal familiar, aqui chamado de Sinal Chave, na presença de ruído ambiente, por meio de autocorrelação e, por esta razão, foi a técnica utilizada. Os dois sinais, um Tom e um *Chirp* Linear, foram transmitidos do mesmo ponto e gravados por um hidrofone a cerca de 700 metros de distância, acrescentando o ruído ambiente presente no local (Enseada dos Anjos – Arraial do Cabo-RJ). Após compará-los quanto ao limiar de decisão e probabilidade de falso alarme, avaliar a faixa de frequência adequada para comunicação e a relação sinal-ruído necessária para garantir sua funcionalidade, a superioridade do sinal modulado em frequência foi comprovada. O LFM apresentou a maior relação entre o limiar de decisão requerido e o nível de ruído ambiente no cenário testado. A amplitude de correlação mostrou-se proporcional à duração e largura de banda do Sinal Chave utilizado.

Palavras-chave: filtro-casado, comunicação submarina, ruído ambiente, acústica submarina.

PACS: 43.30.-k, 43.50.-x, 43.60.-c, 43.60.Ek, 43.60.Bf.

Comparison of the responses of Tone (CW) and Linear Chirp (LFM) signals in the underwater environment

Abstract

The ability to control equipment without a physical connection (transmission cables) is common when using electromagnetic pulses and air is the waveguide. However, the underwater ocean environment does not allow electromagnetic propagation beyond a few meters. In this case, sound waves present themselves as a solution. For this communication to be successful, the equipment needs to be able to interpret a received signal, compare it to a familiar signal and then execute a specific command. For this reason, the development of communication algorithms for underwater actuators controlled by sound pulses is part of the studies in underwater acoustics. The purpose of the experiment detailed in this article was to verify which of the waveforms, a Tone (CW) or a Linear Chirp (LFM), is more efficient as a key signal for triggering underwater actuators using a matched filtering algorithm to recognize it. Based on the signal processing literature, matched filtering is the most used technique to find a familiar signal, here called Key Signal, in the presence of ambient noise, through autocorrelation and, for this reason, it was the technique used. The two signals, a Tone and a Linear Chirp, were transmitted from the same point and recorded by a hydrophone about 700 meters away, adding to the ambient noise present at the site (Enseada dos Anjos – Arraial do Cabo-RJ). After comparing them in terms of decision threshold and false alarm probability, evaluating the appropriate frequency bandwidth for communication and the signal-to-noise necessary to guarantee its functionality, the superiority of the frequency modulated signal was proven. The LFM showed the highest relationship between the required decision threshold and the ambient noise level in the tested scenario. The correlation amplitude was shown to be proportional to the duration and the bandwidth of the Key Signal used.

Keywords: matched-filter, underwater communication, ambient noise, underwater acoustics.



1. INTRODUÇÃO

Dentre as áreas de estudo da acústica submarina está o desenvolvimento de algoritmos de comunicação para atuadores submersos acionados por pulsos sonoros. Diversas áreas da pesquisas oceânicas e da indústria marítima se beneficiam destes equipamentos utilizando-os para monitoramento ambiental e sísmico, instalações *off-shore*, monitoramento militar de tráfego submarino, entre outras [1].

Controlar equipamentos remotamente é uma prática comum quando se utilizam pulsos eletromagnéticos (rádio, micro-ondas, infravermelho) e o ar é o guia de ondas. No meio submarino, a propagação de ondas eletromagnética é fortemente atenuada e limita o alcance de um sinal emitido a poucos metros. Nesse caso, ondas sonoras apresentam-se como solução, mas ainda assim, o meio submarino carrega peculiaridades quanto ao perfil de velocidade de propagação (estratificado e dinâmico) e a presença de ruído ambiente em faixas de frequência relativamente próximas às que se quer transmitir. Em um fundeio oceanográfico ou em equipamentos autônomos, onde não há conexão física com a plataforma de controle, para que a comunicação seja bem-sucedida o equipamento submerso precisa ser capaz de interpretar um sinal recebido em meio ao ruído presente e compará-lo com um sinal familiar para então executar um comando específico [2]. Felizmente, neste caso, é possível escolher um sinal conveniente e mantê-lo armazenado no equipamento para comparação.

Dentre as técnicas de processamento de sinais úteis à esta aplicação, a filtragem casada (*matched filtering*) é mais utilizada para a busca de um sinal familiar em meio a ruído através da autocorrelação [3, 4]. Por esse motivo, o algoritmo utilizado no experimento descrito neste artigo aplicou um filtro casado para testar dois sinais quanto a eficiência de detecção na presença de ruído ambiente no meio submarino. Neste trabalho, os sinais testados serão chamados de Sinais Chave porque representam a forma de onda que, ao ser distinguida pelo algoritmo, acionaria o mecanismo do atuador.

Os Sinais Chave foram transmitidos do mesmo ponto e gravados por um hidrofone, a cerca de

700 metros de distância, adicionando ruído real presente no ambiente. Dessa forma, a gravação captada pelo hidrofone, aqui designada como Sinal Gravado ou Sinal Medido, é formado pelo Sinal Chave somado ao ruído ambiente presente durante a gravação. No local onde o hidrofone está posicionado, os sons comumente captados incluem correntes costeiras, fauna marinha e embarcações de turismo e pesca. A Figura 1 é um diagrama simplificado que ilustra o experimento. Um projetor acústico na posição 'T' enviou o Sinal Chave através do canal submarino e um hidrofone na posição 'R' captou o Sinal Gravado que é a composição entre o Sinal Chave e o ruído.

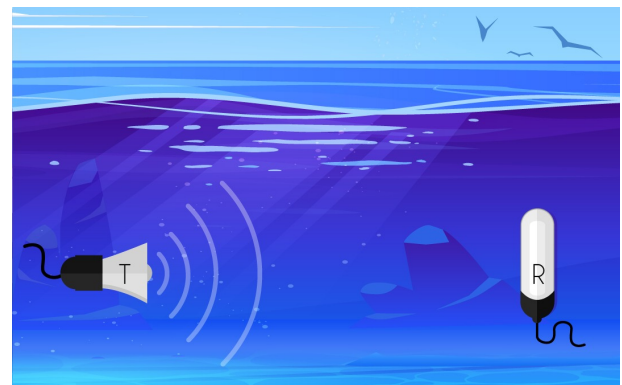


Figura 1: Esquema simplificado de transmissão sonora de 'T' para 'R' através do meio submarino.

Foram escolhidos como Sinais Chave para o teste (escopo deste artigo) um Tom ou *Continuos Wave* – CW (assim chamado por se tratar de uma forma de onda que carrega apenas uma frequência), e um *Chirp* Linear ou *Linear Frequency Modulated* – LFM (assim chamado pela semelhança a um assovio). Estes sinais foram escolhidos por estarem entre as formas de onda mais comumente utilizadas em aplicações de acústica submarina [5].

Assim como a convolução, a correlação é uma operação matemática que produz um vetor a partir de outros dois, nesse caso as amostras do Sinal Chave e do Sinal Gravado. O vetor gerado por essa operação é chamado de correlação cruzada dos dois vetores de entrada. Se um conjunto de amostras for correlacionado com ele mesmo, o resultado será chamado de autocorrelação [6]. A amplitude de cada amostra no vetor resultante da correlação cruzada é uma medida de quanto os sinais de entrada se assemelham. Em outras pa-

lavras, o valor da correlação cruzada será maior quanto mais próximas (correlatas) forem as amostras dos vetores de entrada. No caso deste experimento, foi medida a semelhança entre o Sinal Gravado e o Sinal Chave para aquelas condições específicas de ambiente pois o Sinal Gravado pelo hidrofone sofre alterações devido as condições locais (nível de ruído, perfil de velocidade do som). É esperado que a amplitude seja significativamente maior no vetor de correlação cruzada no trecho em que o Sinal Chave estiver presente no Sinal Gravado. E esse pico de amplitude é que provocará o acionamento do atuador submerso, seja qual for a função a qual está designado a executar.

A presença de ruído na gravação obriga a observância de um limiar de decisão (*decision threshold*) para avaliar a presença ou não do Sinal Chave. Considerando que o ruído ambiente é uma variável aleatória, esta análise passa a ser estatística. O limiar de decisão será uma função das probabilidades de ocorrência que serão descritas na próxima seção.

O objetivo do teste realizado foi verificar qual das formas de onda, Tom ou *Chirp* Linear, é mais eficiente para utilização como Sinal Chave reconhecido através de filtragem casada (autocorrelação) dentro de um Sinal Gravado comparando o limiar de decisão e probabilidade de falso alarme entre eles. Adicionalmente, foi analisada a influência do tempo de duração do sinal utilizado para adequá-lo a aplicação em atuadores submersos. Nessa aplicação, existe a limitação de janela temporal para que o processamento em tempo real do Sinal Gravado seja possível.

O artigo foi organizado da seguinte forma: a seção 2 expõe as justificativas que motivaram os testes e a pesquisa realizada; a seção 3 as etapas do desenvolvimento dos testes; na seção 4 são apresentados os resultados e; na seção 5 as conclusões a que os testes levaram.

2. JUSTIFICATIVA

A comparação entre os sinais utilizando uma gravação com ruído ambiente real torna o resultado mais confiável e fidedigno. Modelar os sinais e adicionar ruído gaussiano (*Additive White Gaussian Noise* - AWGN) possibilita comprovar a diferença de resolução entre os sinais: tons apre-

sentam boa resolução em frequência enquanto que um *Chirp* Linear (assim como outros sinais de frequência modulada) apresenta boa resolução para autocorrelação (no domínio do tempo). Contudo, os valores da amplitude máxima na autocorrelação, que sugerem o limiar de decisão, não diferem entre as duas formas de onda neste modelo simples. Isso ocorre porque não foram consideradas as características do meio de propagação e, principalmente, devido a aproximação do ruído ambiente a um ruído gaussiano branco.

A modelagem do ruído como não gaussiano [4] é uma forma de otimizar o desempenho de detectores, assim como o uso da forma normalizada em ambientes onde o ruído varia rapidamente [7]. Porém, neste trabalho, o objetivo foi comparar apenas os sinais. A Figura 2 ilustra esta discussão. Embora a autocorrelação do *Chirp* (LFM) apresente uma resolução extremamente acurada, se o objetivo for apenas o acionamento de um atuador, e nesse caso, o instante de chegada do sinal não é relevante, os dois apresentariam o mesmo desempenho para um limiar de decisão especificado. Esse resultado não é representativo para um sinal transmitido no meio submarino.

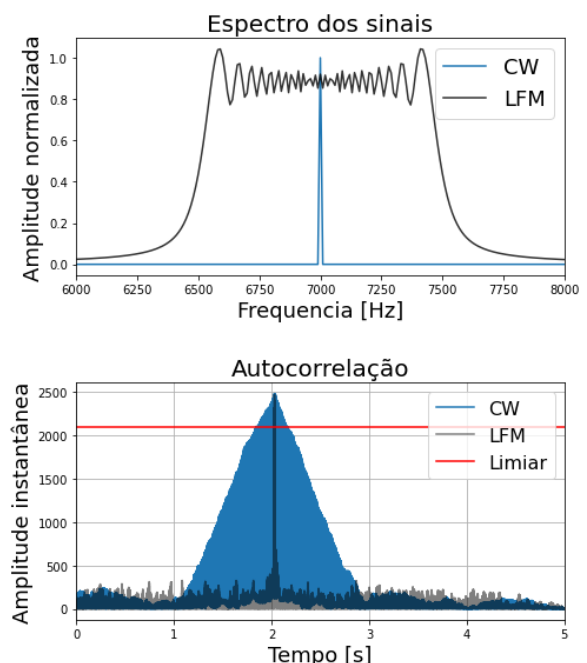


Figura 2: Apresentação do espectro dos sinais; Autocorrelação simulando sinal imerso em ruído gaussiano.

Na literatura, a presença de um sinal em um sistema de detecção é comumente descrito utilizando



uma matriz de decisão binária. A hipótese nula, H_0 , refere-se à ausência do sinal alvo (ruído puro) e hipótese alternativa, H_1 , referindo-se à detecção deste sinal na amostra analisada [8, 9]. Quando a amplitude da correlação atingir ou superar um limiar de decisão especificado, considera-se que o sinal chave está presente no sinal gravado, hipótese H_1 . Do contrário, quando a amplitude da correlação for menor que o limiar de decisão, a interpretação é de que se trata apenas de ruído, hipótese H_0 (Sinal Chave ausente).

Dessa maneira, surgem quatro situações possíveis para o problema enunciado: o limiar de decisão pode ser atingido com a presença do Sinal Chave no Sinal Gravado, este é o efeito desejado, a detecção correta; a segunda possibilidade é o limiar de decisão ser atingido sem a presença do Sinal Chave no Sinal Gravado, é um alarme falso; também é possível que a amplitude da correlação não alcance o limiar de decisão porque o Sinal Chave está ausente no Sinal Gravado, é uma decisão nula (este também é um efeito desejado e mantém o atuador em espera); e, a última possibilidade, é a amplitude da correlação não atingir o limiar de decisão, embora o Sinal Chave faça parte do Sinal Gravado, o chamado sinal perdido.

Na tabela 1, adaptada de [10], apresentasse a matriz de decisão binária que sintetiza essa teoria em termos de probabilidade.

Tabela 1: Matriz de decisão binária (adaptado de [10]).

	Interpretado presente	Interpretado ausente
Sinal presente	Detecção correta P_D	Sinal perdido $1 - P_D$
Sinal ausente	Alarme falso P_{FA}	Decisão nula $1 - P_{FA}$

A terminologia típica da estatística, utilizada nas comparações entre os dois sinais, denomina como Probabilidade de Detecção (P_D) a chance de o Sinal Chave ser encontrado estando presente no Sinal Gravado e de Probabilidade de Falso Alarme (P_{FA}) a chance de o limiar de decisão ser atingindo na ausência do Sinal Chave na gravação [11].

Uma avaliação gráfica das probabilidade de detecção e de falso alarme será apresentada na seção 4. Essas são as principais variáveis para quanti-

ficar o desempenho de um sistema de detecção. A decisão nula pode ser interpretada como a não ocorrência de falsos alarmes nos trecho da gravação em que existe apenas ruído e assim será referida. Já a alternativa de sinal perdido está relacionada com a seleção adequada do limiar de decisão. No cenário testado a distância entre o projetor acústico e o hidrofone é relativamente pequena. Isso permite utilizar uma relação sinal ruído favorável, na qual a presença do Sinal Chave se destaca. Dessa forma a probabilidade de um sinal perdido é insignificante.

3. DESENVOLVIMENTO

Os testes descritos neste artigo foram idealizados para que pudessem ser executados com o material e condições disponíveis no local¹. Dessa maneira, a escolha das características dos sinais e procedimentos a executar sempre considerou a disponibilidade de equipamentos para o ensaio. As seções a seguir descrevem e justificam as etapas percorridas.

3.1 Faixa de frequência da transmissão

O projetor acústico disponível e utilizado para os testes foi o EDO modelo 610E. O transdutor do tipo *Tonpilz* possui uma larga faixa de frequência de operação entre 3 e 11 kHz (faixa estendida) indicada pelo fabricante. Tendo em vista o objetivo de utilização do sinal como chave única para um atuador submerso, um dos critérios de escolha da faixa de frequência foi de afastá-la ao máximo do ruído comumente captado no local do experimento. Embarcações e outros ruídos antropogênicos têm maior intensidade sonora na faixa de frequências de até 1 kHz. A intensidade sonora dessas fontes reduz significativamente em faixas de frequência acima deste limiar [12]. Por outro lado, o ruído biológico na região abrange uma banda de frequência mais larga. Estudos anteriores [13] e em curso têm se dedicado a catalogar a assinatura acústica de peixes e invertebrados residentes. Nessas pesquisas, já foram identificadas emissões sonoras em banda de frequência de dezenas de Hertz.

Nesse artigo foram utilizados como referência os dados de observação catalogados pelas gravações

¹Laboratório de Engenharia Acústica - Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira - Arraial do Cabo/RJ.

anteriores do mesmo hidrofone disponível para o teste. Essa série temporal corrobora com a tendência esperada de concentração da intensidade sonora na faixa de frequência de até 5 kHz. Entre 5 e 10 kHz, embora com menor intensidade, ainda há ruído presente, porém a faixa de operação do projetor acústico sugere não ultrapassar esse limite. Adicionalmente, o aumento da frequência de transmissão traz consigo o aumento das perdas por absorção, proporcionais ao quadrado da frequência [14].

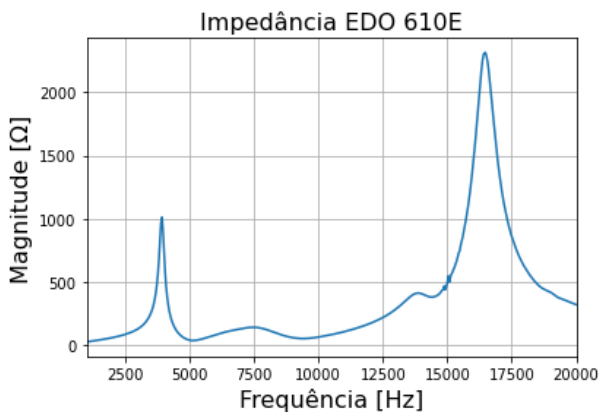


Figura 3: Curva de Impedância e Fase vs. frequência do projetor acústico EDO-610E.

A Figura 3 mostra a curva de Impedância medida para o projetor. É possível observar que a banda de frequência entre 5 e 10 kHz coincide com a faixa de menor impedância e comportamento aproximadamente linear onde o conjunto, projetor e casador de impedância, foi otimizado. Essa é considerada a banda de frequência ótima para esse projetor. Partindo destas considerações, 7 kHz foi a frequência central escolhida nesse estudo. E os Sinais Chave testados foram um Tom de 7 kHz e um *Chirp* Linear de 6,5 kHz a 7,5 kHz cuja frequência central é a mesma do Tom. A largura de banda de 1kHz mantém o sinal dentro de uma faixa aproximadamente linear do projetor acústico e previne a distorção do sinal.

3.2 Duração do Sinal Chave

Sabe-se que a duração de um sinal é diretamente proporcional a amplitude instantânea da sua autocorrelação [5]. Em outras palavras, quanto maior a duração do sinal maior será a quantidade de amostras correlacionadas. Isso leva ao raciocínio de que sinais de maior duração seriam superiores

para a aplicação sugerida. Entretanto, existiria uma limitação da duração do sinal em qualquer sistema de transmissão e detecção que possa ser construído [10]. No caso descrito nesse artigo, a recepção e processamento do sinal em tempo real foi considerada limitada a 0,1 s. Janelas temporais maiores geralmente não são suportadas pelas placas de áudio disponíveis sem que haja perda de pacotes de dados durante o processamento. Por esse motivo, dois conjuntos de sinais foram montados para permitir a comparação quanto ao tempo de duração: no primeiro, os sinais foram transmitidos com duração de 1 s e; no segundo conjunto, os sinais foram transmitidos com a duração limite esperada para o processamento em tempo real de 0,1 s.

A Figura 4 mostra o Espectrograma dos dois sinais transmitidos dentro do primeiro conjunto (cuja duração foi de 1 s). O *Chirp* varre a banda de frequência de 6,5 a 7,5 kHz enquanto o Tom concentrasse na frequência de 7 kHz.

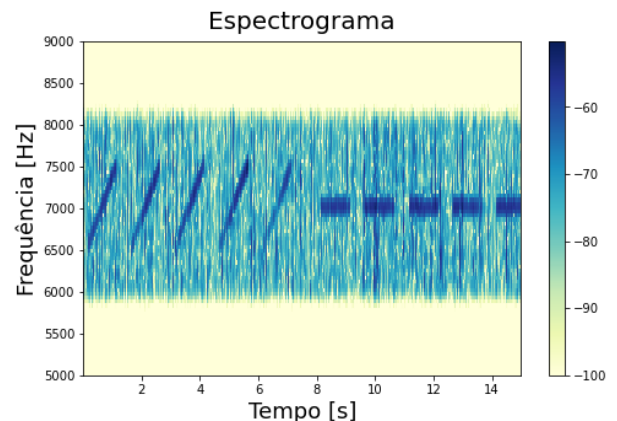


Figura 4: Espectrograma dos sinais transmitidos: *Chirp* Linear de 6,5 a 7,5 kHz e Tom de 7 kHz, sucessivamente.

3.3 Amplitude e amostragem do sinal

Para permitir a comparação entre os dois sinais, eles foram gerados com a mesma amplitude e transmitidos com a mesma potência. A frequência de amostragem, f_s , utilizada foi de 48kHz, resultando numa frequência de *Nyquist*, calculada através da Equação (1),

$$f_N = f_s / 2, \quad (1)$$



igual a 24kHz. Esta banda de frequência permite captar e representar os sinais escolhidos sem nenhum risco quanto a subamostragem ou *aliasing* [15]. Os sinais para comparação foram gerados e seu processamento foi feito utilizando a linguagem de programação *Python*² que é distribuído livremente assim como as bibliotecas necessárias (*Numpy*³, *Scipy*⁴ e *Matplotlib*⁵).

3.4 Dinâmica da transmissão

A transmissão foi feita em blocos de cinco pulsos espaçados a cada 0,5 s de silêncio, para cada forma de onda. Após 1 s de intervalo, o bloco contendo a segunda forma de onda foi transmitido.

Foi denominado de Bloco 1 o conjunto formado por cinco *Chirps* Lineares com duração de 1 s espaçados por 0,5 s de silêncio. Bloco 2 o conjunto de cinco Tons com duração de 1 s espaçados por 0,5s de silêncio. Bloco 3 o conjunto de cinco *Chirps* Lineares com duração de 0,1 s espaçados por 0,5 s de silêncio. E, por fim, o Bloco 4 o conjunto de cinco Tons com duração de 0,1 s espaçados por 0,5 s de silêncio. Dessa forma, a gravação completa foi composta por quatro transmissões dos blocos 1 + 2 e quatro transmissões do bloco 3 + 4. Cada ciclo de Sinal Gravado contém 20 amostras de cada um dos possíveis sinais chave. A Figura 4 mostrou um trecho da gravação que contém os blocos 1 e 2. Durante o teste a transmissão foi executada repetidas vezes para criar um conjunto de dados com ruído aleatório e representativo do local.

3.5 Processamento do Sinal Gravado

De posse das gravações, os dados foram tratados para análise e comparação dos sinais. O primeiro passo foi computar o espectro do Sinal Gravado para validação das hipóteses quanto a faixa de frequência predominante. Em seguida, aplicou-se um filtro passa banda na faixa de interesse para a análise, entre 6 e 8 kHz. Como descrito na seção 3.3, a amostragem capturou frequências de até 24 kHz mas a partir de 12 kHz não houve variação significativa de magnitude. Por esse motivo

e para melhor visualização a Figura 5 apresenta o espectro do sinal, na faixa até 12 kHz, antes e depois da aplicação do filtro. Nota-se a predominância de sinais nas frequências abaixo de 5 kHz.

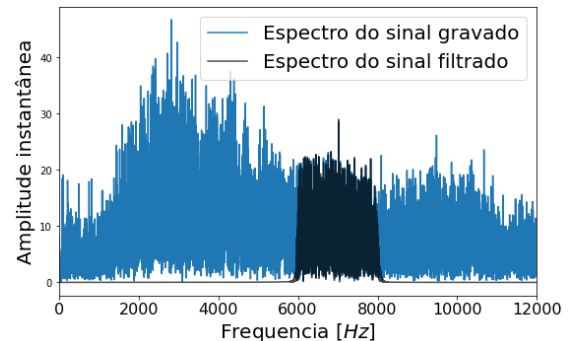


Figura 5: Espectro do sinal gravado e espectro do sinal filtrado entre 6 e 8 kHz.

Após filtragem do Sinal Gravado, foi calculada a autocorrelação com cada um dos Sinais Chave utilizando uma função implementada [16] que correlaciona dois vetores. Como resultado, é apresentada a magnitude da correlação e uma variável booleana (valor de verdadeiro ou falso) referindo-se a presença do Sinal Chave no Sinal Gravado para um limiar de decisão pré-estabelecido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A amplitude da correlação de cada Sinal Chave com o Sinal Medido mostra o quanto ele é eficiente para a função proposta (acionar um atuador submerso), o quanto ele sofre interferência do ruído ambiente ou de outros possíveis sinais transmitidos no alcance do receptor.

A Figura 6 mostra o resultado da correlação do Bloco 1 que continha *Chirps* com duração de 1 s. A amplitude foi normalizada para facilitar a comparação com os outros Sinais Chave. Para este bloco, a correlação é próxima da ideal. Considerando um limiar arbitrário de 0,4 da amplitude máxima (linha verde na Figura 6) todos os 20 sinais transmitidos seriam detectados e não haveria nenhum falso alarme. A correlação com o ruído e com os outros sinais transmitidos foi inferior ao limiar de 0,1 da amplitude máxima (a linha vermelha na Figura 6 mostra esse limiar).

²<https://www.python.org/downloads/>.

³<https://numpy.org/>.

⁴<https://scipy.org/>.

⁵<https://matplotlib.org/>.

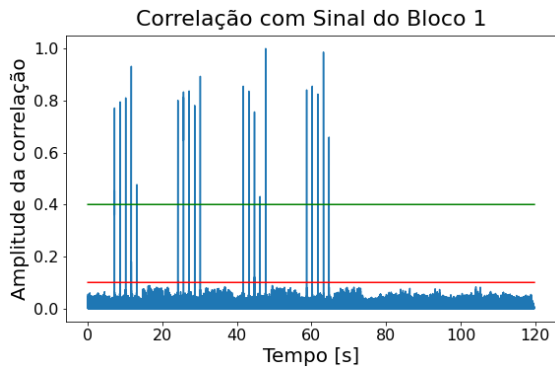


Figura 6: Correlação do Sinal Chave Bloco 1 (LFM-1 s) com o Sinal Gravado.

O resultado para o Tom com duração de 1 s (Bloco 2) é mostrado na Figura 7. Considerando os mesmos limiares, seu desempenho como Sinal Chave mostrou-se inferior. O Bloco 2 apresentou maior correlação tanto com o ruído puro quanto com os outros sinais transmitidos. Particularmente, o Tom com duração de 1 s mostrou grande correlação com o sinal de mesma frequência e menor duração (Grupo 4) transmitido a partir de 80 s na gravação apresentada. Essa característica deteriora significativamente a eficiência do sistema pois, indica que qualquer sinal de mesma frequência, independente da duração, poderia causar um falso alarme.

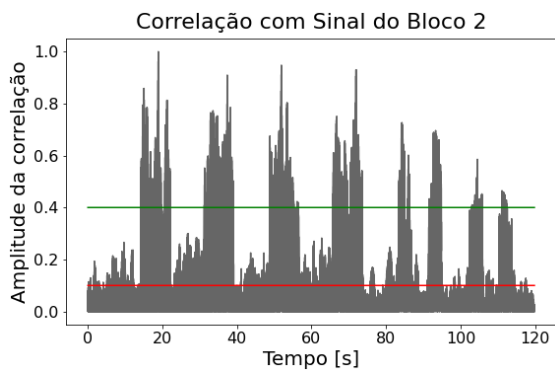


Figura 7: Correlação do Sinal Chave Bloco 2 (Tom-1 s) com o Sinal Gravado.

A partir de 80 s da transmissão foram enviados os sinais dos Blocos 3 e 4 cuja duração é mais realista, apontando para a aplicação sugerida. A Figura 8 mostra o desempenho do Bloco 3 composto por *Chirps* cuja duração foi 0,1 s. Assim como o Bloco 1, esse modelo de chave obteve ótimo desempenho no cenário testado. Embora a correlação com o ruído puro e com os outros si-

nais tenham aumentado, a amplitude da autocorrelação também foi mais consistente, indicando que um limiar mais alto poderia ser atribuído. Em geral, o limiar de decisão é escolhido de forma a minimizar a probabilidade de falso alarme, mesmo com o custo de diminuir a probabilidade de detecção [11]. Esse é o princípio fundamental do teorema de Neyman-Pearson e, assim como em um sistema sonar, é indicado para os atuadores submersos onde um falso alarme pode ser mais prejudicial que um sinal perdido [10]. O fato de este sinal não apresentar correlação elevada com o Grupo 1 é relevante pois sugere que vários atuadores podem ser posicionados em uma mesma área de testes e seus Sinais Chave modelados, variando banda de frequência e tempo de duração, sem que haja interferência mútua no acionamento.

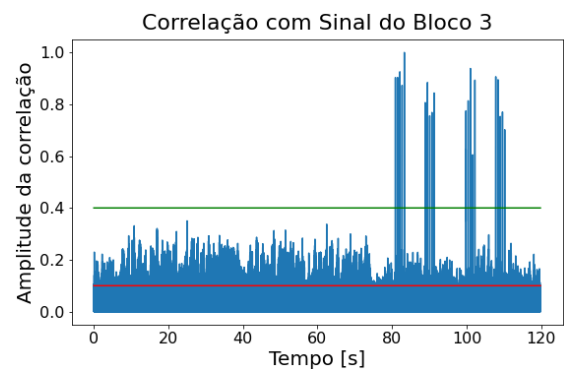


Figura 8: Correlação do Sinal Chave Bloco 3 (LFM-0,1 s) com o Sinal Gravado.

Por fim, a Figura 9 apresenta a correlação do Sinal Gravado com o Grupo 4, Tons com duração de 0,1 s. Este, obteve o pior desempenho entre os pulsos testados. Além da esperada correlação com o Grupo 2, de mesma frequência e duração superior, ele também sofreu forte interferência dos sinais do Grupo 1 cuja frequência modulada foi na faixa de 6,5 a 7,5 kHz. Esse resultado indica que, para um algoritmo de correlação simples, um Tom de duração curta sofreria influência de qualquer sinal de frequência modulada com maior duração e que contivesse a frequência deste Tom em sua banda.

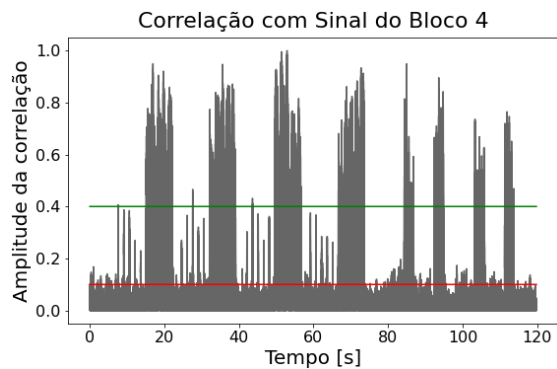


Figura 9: Correlação do Sinal Chave Bloco 4 (Tom-0,1 s) com o Sinal Gravado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O experimento descrito neste artigo comprovou a superioridade de sinais de frequência modulada como Sinal Chave (ou Sinal Alvo) para acionamento de um atuador submerso quando comparados a um Tom. Utilizando um algoritmo de autocorrelação, técnica conhecida como *matched filter*, o *Chirp* Linear obteve ótimo desempenho no cenário testado.

Seja na presença de ruído ambiente, sinais contínuos (tons) com frequência pertencente a sua banda e até mesmo na presença de um *Chirp* Linear na mesma banda de frequência e duração diferente, o LFM foi superior ao CW e apresentou maior relação entre o limiar de decisão para detecção ideal e o limiar de decisão que favorecia a ocorrência de falsos alarmes. Tons (sinais CW), apesar da excelente resolução em frequência, não apresentaram limiar aceitável que o distinguísse como Sinal Chave.

Para Tons a amplitude da correlação é proporcional a duração do sinal e para sinais com frequência modulada, além da duração, a amplitude é proporcional a largura da banda [5]. O teste apresentado foi limitado a largura de banda de 1 kHz, entretanto o projetor permite ampliar essa faixa e, dessa maneira, melhorar o desempenho de detecção, desde que evite-se a banda de frequência comum ao ruído local.

Diversas abordagens quanto ao algoritmo e metodologias de cálculo utilizando filtragem casada foram desenvolvidas e testados ao longo das últimas décadas [4, 7, 17–19]. Cada uma delas tratou de aproximar o modelo de correlação linear ao problema real no meio submarino cujos maio-

res desafios são uma modelagem mais precisa do ruído e da variação (espacial e temporal) dos parâmetros de propagação. Esse aprimoramento torna os atuadores submersos equipamentos mais robustos e capazes de operar em condições extremas sendo acionados à grandes distâncias, maiores profundidades e em ambientes com elevado nível de ruído. No caso proposto, onde a distância entre o projetor e o receptor é relativamente pequena (menor que 1 km), a correlação direta do Sinal Gravado com um Sinal Chave apresentou eficiência compatível com a aplicação.

REFERÊNCIAS

- [1] Akyildiz, Ian F; Pompili, Dario e Melodia, Tommaso. State-of-the-art in protocol research for underwater acoustic sensor networks, 2006.
- [2] NONNATO, Luiz Vianna. *Instrumentação oceanográfica*. In: HARARI, Joseph (org.). *Noções de Oceanografia*. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 34: p. 763-788, 2021.
- [3] Smith, Steven W. Digital signal processing second edition, 1999. Disponível em: www.DSPguide.com.
- [4] Al-Aboosi, Yasin Yousif; Sha'ameri, AZ Bin e Khamis, Nor Hisham Haji. Comparison of methodologies for signal detection in underwater acoustic noise in shallow tropical waters. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(5):3086–3094, 2016.
- [5] Abraham, Douglassa e Siderius, Martin. Modern acoustics and signal processing underwater acoustic signal processing modeling, detection, and estimation foreword by, 2019. Disponível em: <http://www.springer.com/series/3754>.
- [6] Rodríguez, Orlando. *Fundamentos de acústica submarina*. Universidade do Algarve Editora, 2021.
- [7] Diamant, Roe. Closed form analysis of the normalized matched filter with a test case for detection of underwater acoustic signals. *IEEE Access*, 4:8225–8235, 2016. ISSN 21693536. doi: [10.1109/ACCESS.2016.2630498](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2630498).
- [8] Hodges, Richard P. *Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar*. John Wiley & Sons, 2011.
- [9] Davis, MHA. A review of the statistical theory of signal detection. *Gravitational Wave Data Analysis*, págs. 73–94, 1989.
- [10] Urick, R.J. *Principles of Underwater Sound*. Peninsula Publishing, 2013. ISBN 9780932146274. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=UzpVrgEACAAJ>.
- [11] Kay, Steven M. *Fundamentals of statistical signal processing: Practical algorithm development*. Pearson Education, 2013. volume 3.

- [12] Council, National Research. *Ocean Noise and Marine Mammals*. The National Academies Press, 2003. ISBN 978-0-309-08536-6. doi: [10.17226/10564](https://doi.org/10.17226/10564). Disponível em: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/10564/ocean-noise-and-marine-mammals>.
- [13] Campbell, Daniel; Xavier, Fabio; Júnior, Ubirajara; Silveira, Nilce; Versiani, Leonardo e Netto, Eduardo. Underwater soundscape pattern during high season of nautical tourism in cabo frio island, brazil. volume 37, pág. 70003, 5 2019. doi: [10.1121/2.0001100](https://doi.org/10.1121/2.0001100).
- [14] Kinsler, Lawrence E; Frey, Austin R; Coppens, Alan B e Sanders, James V. *Fundamentals of acoustics*. John wiley & sons, 2000.
- [15] Oppenheim, Alan V. e Willsky, Alan S. Sinais e sistemas. 2014.
- [16] Diniz, Pedro Mendes. Python signal tools, função *detect*. 2021.
- [17] Kelly, E.J. An adaptive detection algorithm. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-22(2):115–127, 1986. doi: [10.1109/TAES.1986.310745](https://doi.org/10.1109/TAES.1986.310745).
- [18] Maio, Antonio De. A new derivation of the adaptive matched filter. *IEEE Signal Processing Letters*, 11:792–793, 10 2004. ISSN 10709908. doi: [10.1109/LSP.2004.835464](https://doi.org/10.1109/LSP.2004.835464).
- [19] Bouvet, M. e Schwartz, S.C. Comparison of adaptive and robust receivers for signal detection in ambient underwater noise. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 37(5):621–626, 1989. doi: [10.1109/29.17553](https://doi.org/10.1109/29.17553).