

Vertical Underwater Acoustic Channel Model in Sensor Networks for Coastal Monitoring

J. Pires, M. Colombo, J. Gallardo *Member, IEEE*, C. De Marziani and R. Alcoleas

Abstract— In this paper a propagation model of acoustic signals in an underwater channel is analyzed. This one is applied to a short vertical communication link. In this way, it's possible to predict the transmission loss, the noise level, the propagation delay and the general shapes of the used acoustic signals. These parameters can be used to design an efficient communication system for transmitting information between a buoy in the surface of the sea, that compose a sensor network for coastal monitoring in the San Jorge gulf, and a data acquisition system in the bottom of the sea. The transmitted signals are encoded using Spread Spectrum Direct Sequence techniques, employing Golay sequences. The simulations results obtained show that it's possible to correctly detect the encoded signals even in those cases where an adverse condition of channel absorption and low SNR are present.

Keywords— underwater acoustic channel, spread spectrum technique by direct sequence, coastal monitoring, sensor networks.

I. INTRODUCCIÓN

EL DESARROLLO de sistemas sensoriales que permitan supervisar el estado de un entorno es un área de investigación en constante evolución. La escalabilidad y bajo costo de un conjunto de ellos, organizados como una red, proporcionan una buena solución en un gran número de situaciones. Las redes de sensores han diversificado su campo de aplicación desde su aparición en aplicaciones militares [1], extendiéndose a: computación ubicua [2], detección de fenómenos naturales [3], exploración subacuática [4], monitoreo de hábitats naturales [5, 6], etc. Entre los entornos naturales de interés científico se encuentran las costas marítimas frente a ciudades cuyas actividades industriales inciden sobre estas zonas. En particular, debido al riesgo de deterioro del ecosistema de las costas del golfo San Jorge, resulta de interés la medición de diferentes variables físicas para el monitoreo del grado de polución presente.

En [7] se presenta una red de sensores inalámbricos para

monitoreo costero. El principal objetivo que se persigue es el diseño una arquitectura hardware de bajo costo de los nodos a fin de poder desplegar un gran número de estas unidades proporcionando una amplia área de cobertura de las costas bajo estudio (véase Figura 1.a y b). Por ejemplo, esto permite obtener una granularidad fina de datos para un análisis pormenorizado de la biodiversidad existente en éstas zonas.

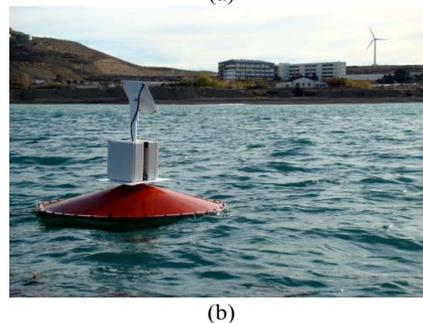
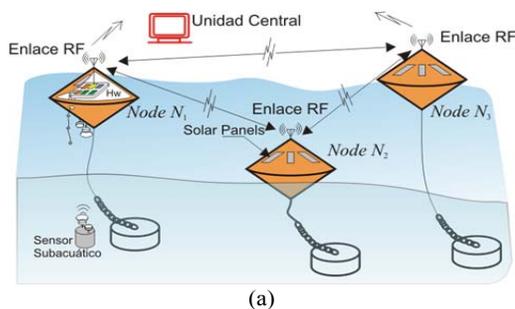


Figura 1. a) Arquitectura básica del sistema bajo estudio. b) Pruebas experimentales del sistema en desarrollo.

En este sistema de monitoreo, es necesaria la recolección de información sobre diferentes parámetros físicos del fondo marino. A fin de transmitir esta información, en los últimos tiempos se han orientado los estudios al empleo de señales acústicas en el medio subacuático [8]. La utilización de este tipo de canales resulta útil para el diseño de sistemas de localización para asistencia a la navegación de vehículos autónomos subacuáticos (AUVs) [9, 10], en la exploración y extracción off-shore de hidrocarburos que tiene impacto en la cuenca del golfo San Jorge [11]. En medios subacuáticos, las ondas electromagnéticas se atenúan severamente (~ 4500 dB/km a 10 kHz [12]) por lo que su uso queda confinado a enlaces de hasta 1 m.

Las comunicaciones ópticas ofrecen mayor ancho de banda y alcance (~ 100 m), pero sufren de dispersión y la alineación transmisor-receptor es crítica. En contraste, las ondas acústicas

J. Pires, Universidad Nacional de la Patagonia SJB (UNPSJB), Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina, jorgepires@speedy.com.ar

M. Colombo, Universidad Nacional de la Patagonia SJB (UNPSJB), Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina, martin.colombo@hotmail.com

J. Gallardo, Universidad Nacional de la Patagonia SJB (UNPSJB), Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina, jgallardo@unpata.edu.ar

C. De Marziani, Universidad Nacional de la Patagonia SJB (UNPSJB), CONICET, Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina, marziani@unpata.edu.ar

R. Alcoleas, Universidad Nacional de la Patagonia SJB (UNPSJB), Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina, alcoleas@unpata.edu.ar

sufren de menor atenuación (~ 40 dB/km a 100 kHz) y por lo tanto permiten el desarrollo de enlaces de comunicación robustos que alcanzan decenas de kilómetros.

Para ello, se requiere un estudio detallado del medio debido a la variabilidad temporal y espacial que puede presentarse. En este trabajo se presenta el análisis y modelado de un canal acústico subacuático a fin de reportar datos desde el fondo marino a una boya de superficie hasta una distancia de 80 m, que es la profundidad media del golfo San Jorge. En la sección II se realiza una introducción al canal acústico subacuático. Seguidamente, en la sección III, se presenta el modelo del enlace vertical corto, explicitando el alcance del mismo y las simplificaciones consideradas. En la sección IV se presenta el esquema de codificación propuesto para la transmisión de las señales acústicas. Posteriormente, en la sección V se muestran los resultados de las simulaciones realizadas. Por último en la sección VI se presentan las conclusiones de este trabajo.

II. CANAL ACÚSTICO SUBACUÁTICO

En comparación con un canal de radio frecuencia terrestre, el canal acústico subacuático (CAS) dispone de menor ancho de banda (\sim kHz). Debido a la atenuación del medio, existe un límite a la frecuencia de portadora que se puede utilizar. Por otro lado, los tiempos de propagación son mayores (ms-s) debido a la velocidad de propagación del sonido, lo cual facilita la implementación de receptores con menores exigencias en cuanto a su sincronismo. A continuación se analizarán los diferentes parámetros que inciden en el modelado del canal subacuático.

A. Velocidad del sonido

Uno de los parámetros que define la manera en que se desplazan las ondas de sonido en el medio es su velocidad de propagación, la cual adopta un valor cercano a 1500 m/s. Para el modelo simplificado que se analiza, la velocidad del sonido permite calcular el tiempo de propagación τ de la onda siendo $\tau = d/v_s$. Donde d es la distancia del enlace y v_s la velocidad del sonido. La velocidad v_s depende principalmente de la temperatura, salinidad y presión hidrostática del agua.

Si bien puede derivarse una fórmula teórica a partir de la ecuación de onda del sonido [13], en la práctica no se pueden obtener todos los parámetros que se requieren. Por tal motivo, se han desarrollado fórmulas semi-empíricas que predicen, dentro de un rango de variación acotado de los parámetros, valores precisos de v_s . Para el modelo que aquí se analiza se ha empleado la fórmula desarrollada por *Del Grosso*. En la Figura 2 se puede observar de qué manera varía la velocidad del sonido con la profundidad. Para su estudio, se divide el océano en capas:

- Capa superficial: las condiciones del medio varían significativamente con la estación y el clima, ya que es la masa de agua que tiene contacto directo con la atmósfera. Debido a factores de mezclado, se considera que la capa es isotérmica (igual temperatura).
- Capa termoclina estacional: dentro de esta capa, la temperatura desciende con la profundidad, pero

también depende del clima (estaciones).

- Capa termoclina principal: la temperatura desciende con la profundidad pero al estar más aislada de la superficie, no depende del clima.
- Capa isotérmica profunda: las variaciones de la temperatura son menores, al punto de poder decirse que se tiene una capa isotérmica. La presión del agua es el parámetro que domina el comportamiento de la velocidad del sonido.

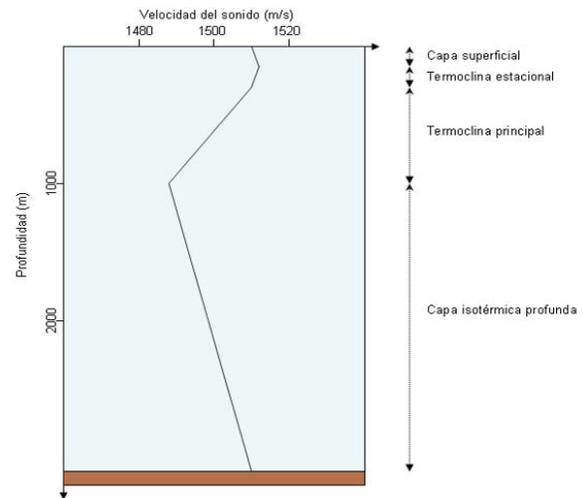


Figura 2. Perfil típico para latitudes medias de la velocidad del sonido [13].

B. Pérdidas de transmisión

Existen dos fenómenos a partir de los cuales la onda de presión pierde energía en el CAS dando lugar a las pérdidas por transmisión TL . Por un lado se consideran las pérdidas geométricas TL_g , las cuales se deben a la dispersión de la energía de la onda a medida que se expande por más superficie. Estas pérdidas (en dB re $1\mu\text{Pa}$) se calculan como:

$$TL_g = 10k \log d \quad (1)$$

donde d es la distancia del enlace en metros y k es el factor de propagación que adopta el valor 1 para propagación cilíndrica o 2 para propagación esférica. En este estudio se utiliza $k=1.5$ para una propagación intermedia. El otro componente de las pérdidas de transmisión son aquellas por efecto de la absorción de la energía acústica por parte del medio, TL_a . Parte de la energía que transporta la onda de presión se transforma en calor mediante los mecanismos de fricción viscosa y resonancia molecular [13]. En dB re $1\mu\text{Pa}$, estas pérdidas se expresan como:

$$TL_a = \alpha \cdot d \quad (2)$$

donde α se denomina coeficiente de absorción (dB/km). Dicho coeficiente depende de los parámetros del agua y de la frecuencia de la onda. Existen varias fórmulas empíricas para determinar este coeficiente, cada una con un intervalo de frecuencia de validez. En este caso, debido al rango de la frecuencia de transmisión que se pretende usar, se utilizará la

fórmula de Schulkin y Marsh [14], cuya expresión es:

$$\alpha = 8686 \left(\frac{S \cdot A \cdot f_i \cdot f^2}{f^2 + f_i^2} + \frac{B f^2}{f_i} \right) (1 - 6.54 \cdot 10^{-4} P) \quad (3)$$

donde S es la salinidad del mar en partes por tonelada (ppt), $A=2.34 \cdot 10^{-6}$, $B=3.38 \cdot 10^{-6}$, f_i es la frecuencia de relajación la cual depende de la temperatura T (°C) y se calcula como:

$$f_i = 21.9 \cdot 10^6 \frac{1520}{T+273} \quad (4)$$

Finalmente, en (3), $P=1,01(1+0,1z)$ es la presión hidrostática, la cual es función de la profundidad z en metros. La ecuación (3) es válida en el rango de frecuencias comprendido entre 3 kHz y 500 kHz (véase Figura 3).

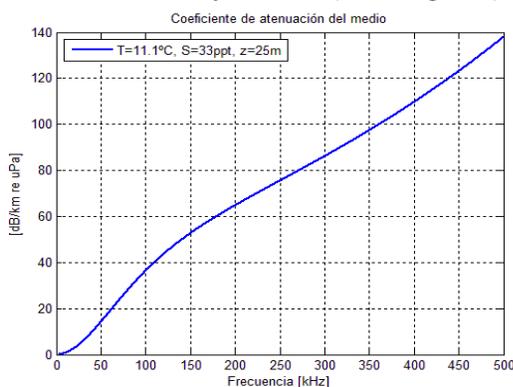


Figura 3. Variación del coeficiente de atenuación α en función de la frecuencia para el intervalo 3-500 kHz según [14].

Así, las pérdidas de transmisión son:

$$TL = TL_g + TL_a \quad (5)$$

C. Ruido ambiental oceánico

Al igual que en el caso de señales RF en el aire, existe una potencia de ruido de fondo en el canal que degrada la calidad de la señal acústica transmitida en el medio subacuático. En [15] se describe un modelo empírico que permite predecir el nivel de ruido en determinado ancho de banda según las condiciones del mar. Dicho modelo se describe mediante:

$$10 \log D_t = 17 - 30 \log f \quad (6)$$

$$10 \log D_s = 40 + 20(s - 0.5) + 26 \log f - 60 \log(f + 0.03) \quad (7)$$

$$10 \log D_w = 50 + 7.5 \sqrt{w} + 20 \log f - 40 \log(f + 0.4) \quad (8)$$

$$10 \log D_{th} = -15 + 20 \log f \quad (9)$$

donde las densidades espectrales de potencia de ruido, D , están dadas en dB re $1 \mu\text{Pa}/\text{Hz}$, la frecuencia de transmisión f en kHz, s es el coeficiente de tráfico marítimo y w es la velocidad del viento en m/s.

En (6) se modela el ruido provocado por la *turbulencia*, que es el movimiento brusco y aleatorio de corrientes de agua el cual ocasiona ondas de presión que se traducen en ruido de muy baja frecuencia. Por otra parte, en (7) se contempla el

ruido ocasionado por el *tráfico marítimo*, generado por las hélices de los barcos que provoca ruido acústico por cavitación. Puede considerarse que este ruido está presente en baja frecuencia y es relativamente constante en el tiempo. En (7), se considera la densidad del tráfico marítimo mediante el coeficiente $s \in [0,1]$; siendo 0 un bajo nivel de tráfico, y 1 el máximo nivel. El ruido provocado por el *oleaje* presente en la superficie del mar se modela mediante (8). Este movimiento del agua ocasiona agitación y burbujas que se traduce en ruido acústico que está presente en un rango amplio de frecuencias (véase Tabla I) y el cual depende de la velocidad del viento de superficie w . Por último, (9) modela el ruido introducido por la *agitación molecular térmica* de las moléculas de agua. El mismo cobra relevancia a partir de los 100 kHz. La Tabla I resume el rango de frecuencias en el que aparece cada uno de los fenómenos descritos.

TABLA I.

FUENTES DE RUIDO PREDOMINANTES SEGÚN RANGO DE FRECUENCIAS.

Rango de frecuencias	Fuente
0.1–10 Hz	Turbulencia.
50–300 Hz	Tráfico marítimo.
0.5–50 kHz	Oleaje (viento).
>100 kHz	Ruido térmico molecular.

Considerando la propiedad aditiva del ruido, es posible combinar todas las fuentes de ruido para obtener la densidad espectral de potencia de ruido total en función de la frecuencia:

$$D(f) = D_t(f) + D_s(f) + D_w(f) + D_{th}(f) \quad (10)$$

La Figura 4 presenta el ruido total en función de la frecuencia de transmisión donde se observa un mínimo en la densidad espectral de ruido, en el rango de 40 kHz a 110 kHz. Por encima de esta frecuencia, la densidad espectral de ruido comienza a incrementarse debido al efecto de la agitación térmica de las moléculas de agua. Para determinar la potencia de ruido, $N(f)$, en un ancho de banda Bw , alrededor de la frecuencia de portadora f_c , debe hallarse el área bajo la curva de la densidad espectral de potencia, $D(f)$. Si $Bw \ll f_c$ entonces podemos aproximar la potencia de ruido oceánico como:

$$N(f) \cong D(f) \cdot Bw \quad (11)$$

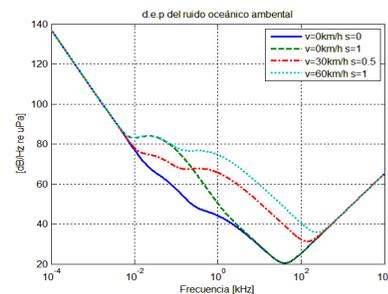


Figura 4. Densidad espectral de ruido acústico oceánico ambiental.

De esta manera, es posible calcular la potencia de transmisión que se requiere para obtener la *SNR* (*Signal-to-Noise-Ratio*) necesaria en el receptor [16]. En dB re μPa , esta se calculará como:

$$SNR = S - N = (SL - TL) - N \quad (12)$$

donde SL es el nivel de transmisión, TL las pérdidas de transmisión y N la potencia de ruido acústico del canal en el ancho de banda utilizado.

III. MODELADO DEL CANAL VERTICAL A EMPLEAR

El modelo estudiado en la sección anterior se utilizará para el diseño de un enlace de comunicaciones acústico entre una boya estacionaria en la superficie del mar y un sistema de adquisición de datos ubicado en el lecho marino, frente a las costas de la ciudad de Comodoro Rivadavia de acuerdo al esquema propuesto en la Figura 1. La separación vertical entre ambos puntos se considera de 50 m. Para la transmisión de datos se empleará una modulación digital BPSK (*Binary Phase Shift Keying*).

A. Simplificaciones en el sistema bajo estudio

1) Multicaminos

En este caso, al tratarse de un enlace vertical, el efecto de caminos múltiples de la señal es mínimo en comparación con un canal horizontal [13]. Sin embargo, es probable que al receptor lleguen rayos que hayan rebotado entre el lecho marino y la superficie del mar. Por lo tanto será de esperar una degradación en la señal recibida debido al desvanecimiento por multicamino. Para minimizar esto, se codificarán las señales a transmitir mediante técnicas de ensanchado de espectro por secuencia directa.

2) Ruido ambiental

A partir del modelo empírico desarrollado se estimará la potencia de ruido presente en el ancho de banda de interés. Este es un valor promedio del ruido ambiental de fondo. En la realidad, es probable existan fuentes de ruido acústico adicionales (i.e. embarcaciones que circule en las cercanías de la boya-sensor). Debido a la naturaleza aleatoria de este tipo de ruido, no es posible cuantificarlo por lo cual el sistema debe tolerar una pérdida del enlace por degradación de la SNR durante el lapso de tiempo que dure la fuente de ruido temporal.

3) Variaciones de los parámetros del medio

Los parámetros del medio intervienen en el tiempo de propagación de las señales acústicas, a través de la velocidad del sonido; y en las pérdidas de transmisión por absorción. Si los parámetros del medio cambian, alterarán el modelo del canal.

En consecuencia, es de interés conocer cómo varían estos parámetros tanto espacial como temporalmente. Como la profundidad del golfo San Jorge no supera los 80 m, la capa de trabajo es la superficial. En ella, los cambios de temperatura con la profundidad son despreciables. Sobre la variabilidad estacional de este parámetro (véase Tabla II), se ha analizado la dispersión que las estaciones introducen en las pérdidas de transmisión y el retardo, encontrándose que resultan despreciables. En cuanto a la salinidad, la base de datos WOA'09 [17] revela que ésta varía muy poco con la

profundidad. La variabilidad estacional también es despreciable. Por otra parte, en lo que respecta a la presión, a la profundidad que se trabaja, su influencia es despreciable.

Por tanto, debido a la escasa profundidad del golfo, resulta razonable considerar que todos los parámetros del medio permanecen constantes con la profundidad y el tiempo.

4) Reverberación

La reverberación es la dispersión de la onda de presión debido a la interacción con la superficie del mar o el lecho marino (reverberación superficial) o por burbujas, partículas en suspensión o fauna marina presentes en el medio (reverberación volumétrica). Esta dispersión de las ondas sonoras implica una desviación de parte de la energía que transmite esa onda, siendo dirigida esta energía en direcciones distintas. Si la onda vuelve hacia el emisor, se denomina *backscattering*, lo cual ocasiona la aparición de pulsos irregulares que irán decayendo en el tiempo, aunque pueden surgir picos de intensidad en determinados instantes [13]. Bajo la justificación de que el enlace será vertical y corto, no se considerarán los efectos que pueda tener la reverberación en las señales transmitidas.

5) Efecto Doppler

Aunque el conjunto boya/sensor se encuentra estacionario, el desplazamiento vertical de la boya provocado por el oleaje puede originar un corrimiento de la frecuencia de portadora por efecto Doppler. En este estudio se considerará despreciable debido a que en las costas del golfo San Jorge, el grado de exposición a oleaje es bajo.

B. Parámetros del enlace subacuático

Como se ha mencionado en la sección II, tanto el coeficiente de absorción, así como la velocidad del sonido, dependen de la temperatura y la salinidad del medio. Al tratarse de un modelo simplificado, no es necesario conocer con precisión estos parámetros, pero sí un valor aproximado. Así, en este caso, se ha utilizado la base de datos de WOA del año 2009 [17]. En el caso de la temperatura, el golfo San Jorge está influenciado por dos corrientes marinas: una cálida, proveniente del sur de Brasil, y otra fría, proveniente de las aguas subantárticas. Ésta última corriente, denominada Malvinas, tiene una influencia considerable en todo el litoral patagónico, ocasionando temperaturas del mar más bajas de las que podría esperarse para la latitud. El promedio anual de temperatura en superficie según la base de datos de WOA es 11,1°C. En la Tabla II se resume esta información.

TABLA II.
TEMPERATURAS EN SUPERFICIE PARA EL GOLFO SAN JORGE.

Parámetro	Valor [°C]
Promedio anual	11,1
Invierno	9,7
Verano	14,8

En cuanto a la salinidad, su valor es de 33 ppt que, en comparación con iguales latitudes en el hemisferio Norte, es

baja. Esto se debe a la influencia de aguas subantárticas diluidas por descarga continental que se originan en el sudeste del océano Pacífico e ingresan a través del estrecho de Magallanes. Esto, sumado a la corriente de Malvinas, justifica la baja salinidad observada.

Por otro lado, se consideraran transductores acústicos comerciales que operan en el rango de frecuencias de 40 kHz a 100 kHz con un ancho de banda de 20 kHz y cuyos niveles de emisión de potencia de transmisión es de 120 dB re 1 μ Pa. Por ejemplo el transductor 200LM450 de Pro-Wave [18] cumple con estos requisitos. En cuanto al modelo del ruido ambiental, se han considerado las condiciones promedio en el golfo, tomando la velocidad del viento w igual a 30 km/h y el coeficiente de tráfico marítimo s igual a 0.5. La Tabla III resume las características principales del canal a modelar.

TABLA III.
PARÁMETROS DE ENTRADA DEL MODELO.

Parámetro	Valor
Temperatura	11.1 °C
Salinidad	33 ppt
Distancia del enlace	50 m
Frecuencia de portadora	100 kHz
Ancho de banda	20 kHz
Nivel de transmisión	120 dB
Velocidad del viento	30 km/h
Tráfico marítimo	Moderado ($s=0.5$)

De acuerdo a la Tabla III, y considerando las ecuaciones (1) a (12) se calculan las pérdidas de transmisión, el nivel de ruido, SNR en receptor y el retardo. Esta información se resume en la Tabla IV.

TABLA IV.
PARÁMETROS DE SALIDA DEL MODELO.

Parámetro	Valor
Pérdidas de transmisión geométricas	25.48 dB
Pérdidas de transmisión por absorción	1.82 dB
Pérdidas totales	27.3 dB
Potencia de ruido en ancho de banda	75.45 dB
SNR en receptor	17.24 dB
Retardo	33.5 ms

IV. ESQUEMA DE CODIFICACIÓN

En este caso, a la señal a transmitir se le asigna un código o secuencia característica. Estas señales son distinguidas en un receptor dado a través de un filtrado óptimo o de correlación. Esencialmente consiste en transmitir una señal con una codificación particular mediante una modulación por cambio de fase [19], tal que su función de auto-correlación (AC) aperiódica sea lo más próxima posible a una función delta de Kronecker. De este modo se facilita la detección de las emisiones en el receptor y que dos emisiones realizadas, una muy próxima de la otra, puedan ser resolubles por el sistema. Esta técnica también se conoce como ensanchado de espectro por secuencia directa (DSSS, *Direct Sequence Spread*

Spectrum) y supone un aumento en la complejidad del procesamiento o tratamiento de la señal [19]. Por tanto, hay que tener especial cuidado en los algoritmos utilizados para la implementación de estas codificaciones para que su complejidad sea mínima y se puedan ejecutar en tiempo real.

Así mismo, es necesario que los valores de correlación cruzada (CC) entre los diferentes códigos sean lo más próximos a cero.

En este caso, para codificar las emisiones se han empleado secuencias Golay [20]. En este esquema de codificación se emiten dos secuencias de longitud $L=2^a \cdot 10^b \cdot 26^c$ con $a, b, c \in \mathbb{Z}$. Si se realiza la suma de las funciones de auto-correlación de cada una de las secuencias del conjunto (ΣAC) esta presenta idealmente valores nulos en los lóbulos laterales de dicha función. Estas propiedades hacen atractivo su uso en sistemas donde se realizan varias emisiones simultáneas desde diferentes fuentes, en condiciones pobres de relación señal-a-ruido.

A diferencia de los esquemas de codificación habitualmente empleados, cuando se codifican las emisiones acústicas mediante secuencias Golay, más de una secuencia es asignada. Así, los recursos hardware requeridos para su procesamiento se incrementan por lo que se han desarrollado algoritmos que permiten minimizar los mismos para el caso de $L=2^a$ [20] y de $L=10^b$ [21]. Además, en [22] se han analizado cuales son las técnicas más eficientes que permiten transmitir los bits de las secuencias que se utilizan para codificar a cada usuario. Uno de los métodos consiste en establecer un orden de transmisión de las secuencias que componen el *par de secuencias* generado una secuencia de transmisión que se ha denominado macrosecuencia (M_s). Posteriormente, se emplea una modulación en fase BPSK para su transmisión.

V. RESULTADOS EN SIMULACIÓN

A fin de comprobar la robustez del modelo utilizado, se han realizado simulaciones en Matlab® donde, se han empleado los datos de la Tabla III y Tabla IV. Se ha simulado el envío de una señal codificada mediante un tren de tres pares de secuencias Golay con una modulación BPSK cuya frecuencia de portadora es $f_c=100$ kHz. De acuerdo a la descripción del modelo que se ha realizado, la señal que llegará al receptor estará atenuada y contaminada con un ruido que se ha considerado como ruido blanco [15].

En la Figura 5 y Figura 6 se muestran los resultados en la detección de los pares Golay de longitud $L=100$ $TL=0,05$ y para $SNR=6$ dB y $SNR=3$ dB respectivamente. La función de correlación muestra una buena relación entre lóbulo lateral a principal, denominado bound [23], lo que permite inferir una fácil detección en el sistema receptor de las secuencias emitidas.

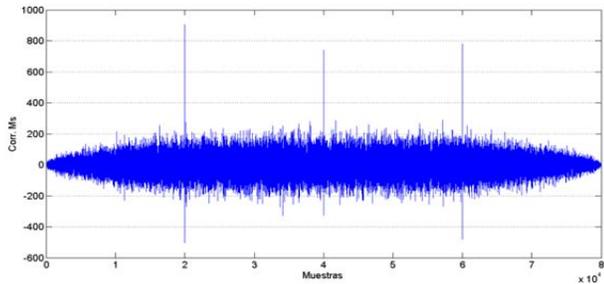


Figura 5. Detección de un tren de secuencias Golay de $L=100$ con $\text{SNR}=6\text{dB}$

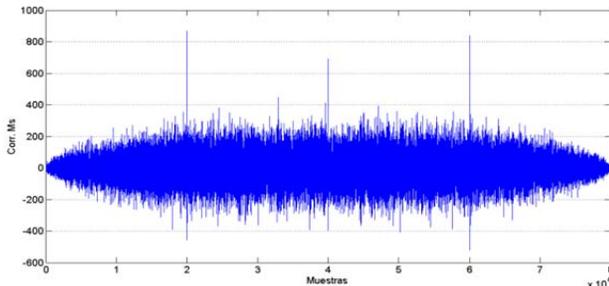


Figura 6. Detección de un tren de secuencias Golay de $L=100$ con $\text{SNR}=3\text{dB}$

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado un modelo simplificado del canal acústico subacuático para el desarrollo de un enlace de transmisión de datos a superficie. El mismo considera los parámetros básicos de atenuación y ruido para el caso de las costas del golfo San Jorge. Los resultados obtenidos en la simulación muestran que es posible obtener una fácil detección de señales acústicas codificadas mediante secuencias Golay. El empleo de este esquema de codificación permite trabajar en condiciones de SNR bajas, a fin de reducir los niveles de potencia de emisión. Esto contribuye a prolongar el tiempo de operación de la red de sensores inalámbricos para el monitoreo costero, reduciendo los costos de mantenimiento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al Consejo Interuniversitario Nacional a través de las Becas de Vocación Científica, la ANPCyT a través del proyecto PICT2007-531 y la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, a través del Proyecto PI782. Los autores agradecen la colaboración y asesoramiento brindada por Dr. Jesús Ureña, profesor Catedrático y Joaquín Aparicio Sosa becario FPI del departamento de electrónica de la Universidad de Alcalá.

REFERENCIAS

[1] L. Freitag, M. Grund, C. v. Alt, R. Stokey, and T. Austin, "A Shallow Water Acoustic Network for Mine Countermeasures Operations with Autonomous Underwater Vehicles," *Underwater Defense Technology (UDT)*, 2005.

[2] J. Hightower and G. Borriello, "Location systems for ubiquitous computing," *IEEE Computer*, vol. 34, pp. 57-66, August 2001.

[3] N. N. Soreide, C. E. Woody, and S. M. Holt, "Overview of ocean based buoys and drifters: Present applications and future needs," presented at the 16th International Conference on Interactive

Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, Long Beach, CA, USA, 2004.

[4] M. Suzuki, T. Sasaki, and T. Tsuchiya, "Digital Acoustic Image Transmission System for Deep-Sea Research Submersible," presented at the OCEANS' 92. 'Mastering the Ocean Through Technology', 1992.

[5] H. Hemond, J. Cheung, A. Mueller, J. Wong, M. Hemond, D. Mueller, and J. Eskesen. (2008) The NEREUS in-lake wireless/acoustic chemical data network. *Limnology and Oceanography: Methods*. 10.

[6] B. Zhang, G. S. Sukhatme, and A. A. G. Requicha, "Adaptive Sampling for Marine Microorganism Monitoring," presented at the Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). , 2005.

[7] C. De Marziani, R. Alcoleas, F. Colombo, N. Costa, F. Pujana, A. Colombo, J. Aparicio, F. J. Alvarez, A. Jimenez, J. Urena, and A. Hernandez, "A low cost reconfigurable sensor network for coastal monitoring," in *OCEANS, 2011 IEEE - Spain*, 2011, pp. 1-6.

[8] L. Freitag, M. Grund, S. Singh, J. Partan, P. Koski, and K. Ball, "The WHOI Micro-Modem: An Acoustic Communications and Navigation System for Multipler Platforms."

[9] P. A. d. S. Jr., G. Timms, A. Davie, B. Howell, and S. Giugni, "Marine Monitoring using Fixed and Mobile Sensor Nodes," *IEEE*, 2010.

[10] A. Kaya and S. Yauchi, "An Acoustic Communication System for Subsea Robot," *OCEANS' 89*, pp. 765-770, 1989.

[11] P. A. Energy, (2009). *Puesta en marcha de las tareas exploratorias de sismica 3D en el mar del golfo San Jorge*. Available: http://www.panamericanenergy.com/hm/es_main_oficinadeprensa_ver.php?idnoticia=3

[12] Z. Jiang, "Underwater Acoustic Networks - Issues and Solutions," *International Journal of Intelligent Control and Systems*, vol. 13, p. 9, September 2008 2008.

[13] J. Aparicio, "Estudio de modelos de canal para comunicaciones subacuáticas," Master oficial en sistemas electrónicos avanzados. Sistemas inteligentes, Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá.

[14] M. Schulkin and H. W. Marsh, "Absorption of sound in sea-water," *Radio and Electronic Engineer*, vol. 25, pp. 493-500, 1963.

[15] M. Stojanovic, "On the Relationship Between Capacity and Distance in an Underwater Acoustic Communication Channel," *Proceedings of the First ACM International Workshop on UWN*, 2007.

[16] R. F. W. Coates, "A deep-ocean penetrator telemetry system," *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, vol. 13, pp. 55-63, 1988.

[17] N. O. D. Center. (2012). *Access to World Ocean Atlas 2009 on-line Objective Analyses and Statistics*. Available: <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/wao09data.html>

[18] P.-W. E. C. (2005). *Underwater Ultrasonic Ceramic Transducers 200LM450 Spec*. Available: <http://www.prowave.com.tw/chinese/products/ut/uwtx/cuwtx.htm>

[19] J. Proakis and M. Salehi, *Communications Systems Engineering*, International Edition, Second Edition ed. Upper Saddle River Nueva Jersey.: Prentice Hall Inc., 2002.

[20] C. De Marziani, J. Ureña, A. Hernandez, M. Mazo, F. J. Alvarez, J. J. Garcia, and P. Donato, "Modular Architecture for Efficient Generation and Correlation of Complementary Set of Sequences," *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 55, pp. 2323-2337, 2007.

[21] S. Z. Budisin, "Golay kernel 10 decomposition," *ELECTRONICS LETTERS*, vol. 47, pp. 853-855, 2011.

[22] C. De Marziani, J. Ureña, Á. Hernandez, M. Mazo, J. J. Garcia, A. Jimenez, J. M. Villadangos, M. C. Perez, A. Ochoa, and F. Alvarez, "Inter-symbol interference reduction on macro-sequences generated from complementary set of sequences," presented at the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06), Paris, 2006.

[23] M. Stular and S. Tomazic, "Maximum periodic correlation of pseudo-random sequences in CDMA," in *Electrotechnical Conference, 2000. MELECON 2000. 10th Mediterranean*, 2000, pp. 420-423 vol.1.



Jorge Andrés Pires nació en Comodoro Rivadavia, Argentina en 1987. Es estudiante de Ingeniería Electrónica en la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB), Argentina, donde se encuentra desarrollando su proyecto final de carrera "*Comunicaciones Acústicas Subacuáticas*". Actualmente es beneficiario de la beca de estímulo a la vocación científica del Consejo Interuniversitario Nacional (CIN) de Argentina. Además se desempeña como Ayudante de Docencia en la cátedra Física III- Facultad Ingeniería- UNPSJB. Sus principales campos de interés son comunicaciones acústicas subacuáticas y redes de sensores.



Martín Alejandro Colombo nació en Comodoro Rivadavia en 1990. Es estudiante de Ingeniería Electrónica en la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB), Argentina. Actualmente es beneficiario de la beca de estímulo a la vocación científica del Consejo Interuniversitario Nacional (CIN) de Argentina. Además se desempeña como Ayudante de Docencia en la cátedra Programación Básica y Métodos Numéricos- Facultad Ingeniería- UNPSJB. Sus principales campos de interés son procesamiento digital de señales y redes de sensores.



José Isidoro Gallardo (M'98) nació en Paraná, Argentina, en 1957. Obtuvo su título de Ingeniero Electrónico de la Universidad Nacional Rosario, Argentina en 1981. Cuenta con un Postgrado de Ingeniería en Telecomunicaciones - Escuela Superior Técnica Gral.Savio (IESE), Bs Aires en 1983 y otro de Ingeniería en Comunicaciones Digitales en Inictel- J.I.C.A., Lima, Perú en 1986. Actualmente cursa Maestría Redes Datos en Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Ha desempeñado funciones técnicas en proyectos de obras en ENTEL/Telefónica Argentina, por más de 15 años, en distintas zonas del país. Asesor en proyectos teleinformáticas, redes videoconferencia y educación a distancia en empresas y universidades de la región. Profesor Titular Regular e Investigador en Fac.Ingeniería- Univ. Nacional Patagonia "S.J.Bosco", donde se desempeña desde 1985. Sus principales campos de interés son comunicaciones digitales, redes de computadoras/sensores y tecnología informática aplicada en educación.



Carlos De Marziani obtuvo, en el año 2001, el título de Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (Argentina). En el año 2007, obtuvo el título de Doctor en el Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá (España). Actualmente se desempeña como Profesor Adjunto en el área de Sistemas Digitales en el Departamento de Electrónica de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Además es Investigador Asistente en el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Sus áreas de investigación son redes de sensores, integración multisensorial, sistemas electrónicos para robots y procesamiento digital de señales.



Rómulo A. Alcoleas (S'98) nació en Comodoro Rivadavia, Argentina, en 1975. Obtuvo su título de Ingeniero Electrónico de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB), Argentina en 2005. Se encuentra cursando la Maestría en Sistemas Electrónicos Avanzados del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá de Henares (UAH). Actualmente se desempeña como Profesor Adjunto e Investigador en el área de Sistemas digitales del Departamento de Electrónica de la UNPSJB. Sus principales líneas de investigación son procesamiento digital de señales, redes de sensores y comunicaciones digitales.