

Diseño e implementación de un sistema de comunicación subacuática basado en la emisión y recepción de señales en el rango de frecuencias de ultrasonido.

Andrés Felipe Uribe Gómez, ✉ andrw@une.net.co

Javier Alberto Vélez Hurtado, ✉ javiervelezhurtado@gmail.com

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Asesor: Gustavo Meneses Benavides, Magíster (MSc) en ingeniería.



Universidad de San Buenaventura Colombia

Facultad de Ingenierías

Ingeniería Electrónica

Medellín, Colombia

2017

---

Citar/How to cite	[1]
Referencia/Reference	[1] A. F. Uribe Gómez, y J. A. Vélez Hurtado, “Diseño e implementación de un sistema de comunicación subacuática basado en la emisión y recepción de señales en el rango de frecuencias de ultrasonido.”, Trabajo de grado Ingeniería Electrónica, Universidad de San Buenaventura Medellín, Facultad de Ingenierías, 2017.
Estilo/Style: IEEE (2014)	

---



Grupo de Investigación (GIMSC).

Línea de investigación en Robótica Sistemas de Control y de Telecomunicaciones.

### Bibliotecas Universidad de San Buenaventura



Biblioteca Digital (Repositorio)  
<http://bibliotecadigital.usb.edu.co>

- Biblioteca Fray Alberto Montealegre OFM - Bogotá.
- Biblioteca Fray Arturo Calle Restrepo OFM - Medellín, Bello, Armenia, Ibagué.
- Departamento de Biblioteca - Cali.
- Biblioteca Central Fray Antonio de Marchena – Cartagena.

### Universidad de San Buenaventura Colombia

Universidad de San Buenaventura Colombia - <http://www.usb.edu.co/>

Bogotá - <http://www.usbbog.edu.co>

Medellín - <http://www.usbmed.edu.co>

Cali - <http://www.usbcali.edu.co>

Cartagena - <http://www.usbctg.edu.co>

Editorial Bonaventuriana - <http://www.editorialbonaventuriana.usb.edu.co/>

Revistas - <http://revistas.usb.edu.co/>

### **Dedicatoria**

A mis amados **Padres** Jaime Darío Uribe Montoya y Mary Isabel Gómez Orozco por toda una vida de esfuerzos y sacrificios para con sus hijos, solo ustedes saben cuánto ha costado llegar hasta acá.

A mi esposa **Marilin** Castaño Sierra por creer en mí, por creer que podía lograrlo, por ese amor, sacrificio y apoyo incondicional de principio a fin, no hubiese escrito estas líneas si no fuese por ti.

A mis **Hermanos** Juan David Uribe Gómez y Carlos Alberto Uribe Gómez por toda la ayuda que me ofrecieron de principio a fin, pero por encima de todo está el ejemplo que me han dado.

### **Dedicatoria**

A mi gran **Padre** Alberto Vélez y a mi gran **Madre** adorada Lida Carmenza Hurtado quien partió de este mundo, por haberme dado la vida y estar siempre pendiente de mí, por sus luchas contantes y esfuerzo para que nunca me faltara nada.

A mi **Hermana** Astrid Carolina Vélez Hurtado por estar siempre para mí en los momentos difíciles y apoyarme cuando más lo he necesitado y darme esas palabras de aliento y cariño.  
“Nos Llevamos en la mente”.

A mis **Sobrinas** Laura Sofía Cadavid Vélez y Sara Cadavid Vélez (las Negras) que me robaron el corazón, para que siga mi norte son la inspiración y la magia.

A mi **Novia** Laura Cristina Serna por tus concejos, lucha y perseverancia y apoyo incondicional para que sea un profesional.

### **Agradecimientos**

Un sincero agradecimiento para nuestro asesor Gustavo Meneses quien fue la persona idónea y de gran ayuda en la realización de este trabajo como en gran parte de nuestra carrera.

A Elías Camilo Cabarcas quien fue de gran ayuda gracias a su formación en sonido y por su colaboración en las pruebas realizadas, a Andrés Ríos por su colaboración en las impresiones en 3D y a todos nuestros compañeros de la facultad que nos animaron y brindaron su apoyo.

**TABLA DE CONTENIDO**

RESUMEN.....	13
ABSTRACT .....	14
I. INTRODUCCIÓN .....	15
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
III. JUSTIFICACIÓN.....	17
IV. OBJETIVOS .....	18
A. Objetivo general .....	18
B. Objetivos específicos .....	18
V. MARCO TEÓRICO .....	19
A. Acústica submarina .....	19
B. Señales electromagnéticas en agua salada.....	20
C. Señales electromagnéticas en agua dulce .....	21
D. Señales ópticas .....	22
E. Señales acústicas.....	24
F. Velocidad del Sonido .....	26
G. Factores que afectan la propagación del sonido .....	30
1) Absorción.....	30
2) Atenuación.....	31
3) Dispersión .....	32
4) Ruido ambiental submarino.....	33
5) Relación señal a ruido.....	34
H. Usos de frecuencias acústicas.....	35
I. Transductor piezoeléctrico.....	36

J. Modulación .....	37
1) Modulación en amplitud.....	37
2) Modulación en frecuencia .....	38
VI. ESTADO DEL ARTE.....	40
VII. DESARROLLO DEL PROYECTO .....	47
A. Diseño electrónico.....	47
1) Diseño de Circuito Electrónico para Modulación FSK .....	47
2) Diseño de Circuito electrónico para Demodulación FSK .....	49
3) Prueba de velocidad ideal para la transmisión de datos .....	52
B. Pruebas de circuito de electrónicos de las técnicas FSK Y ASK por medio cableado.....	53
1) Primera etapa de construcción de los circuitos electrónicos .....	53
2) Segunda etapa de construcción de los circuitos electrónicos .....	54
3) Tercera etapa de construcción de los circuitos electrónicos.....	55
4) Cuarta etapa de construcción de los circuitos electrónicos .....	56
C. Fabricación de la carcasa mediante impresión 3D .....	57
D. Transmisión utilizando modulación FSK.....	60
1) Microcontrolador .....	60
2) Etapa del amplificador de potencia.....	62
3) Transductor piezoeléctrico .....	64
E. Detección de la señal FSK.....	66
1) Captación de la señal desde el hidrófono Reson TC4032 .....	66
2) Especificaciones técnicas del Hidrófono.....	67
3) Interfaz de AudioUSBPre 2.....	68
4) Diseño del filtro tipo notch.....	69
5) Amplificador de instrumentación .....	69

6) Diseño Filtro de pasa bandas .....70

7) Diseño Amplificador .....71

8) Amplificador comparador.....72

9) Reconfiguración de los pulsos con circuito schmitt trigger .....73

10) Microcontrolador .....73

11) Medios de visualización: Módulo LCD e interfaz por puerto serial. ....74

F. Transmisión utilizando modulación ASK.....75

1) Detección de la señal ASK .....76

G. Resultados Experimentales.....76

H. Desarrollo del prototipo.....84

XI. CONCLUSIONES .....87

VIII. TRABAJOS A FUTURO .....88

REFERENCIAS .....89

ANEXOS.....92



## LISTA DE TABLAS

Tabla I. Comparación de algunos módems acústico submarino .....	16
Tabla II. Longitudes de onda.....	26
Tabla III. Variación del sonido asociado a temperatura, salinidad y profundidad.....	28
Tabla IV. Comparación de algunas de velocidades. ....	52
Tabla V. Comparación de algunos de velocidades y tiempos para los bits y para los caracteres ..	53
Tabla VI. Especificaciones técnicas hidrófono reson TC4032. ....	67

**LISTA DE FIGURAS**

Fig. 1. Atenuación de las señales electromagnéticas en agua salada. ....	20
Fig. 2. Velocidad de propagación.....	21
Fig. 3. Coeficiente de absorción.....	22
Fig. 4. Coeficiente de absorción del agua del mar. ....	23
Fig. 5. Efecto de dispersión.....	23
Fig. 6. Onda longitudinal.....	24
Fig. 7. Onda transversal.....	24
Fig. 8. Longitud de onda. ....	25
Fig. 9. Perfil de velocidad sonoro. ....	30
Fig. 10. Coeficiente de absorción.....	31
Fig. 11. Atenuación. ....	32
Fig. 12. Curvas de ruido. ....	34
Fig. 13. Curva de frecuencia óptima. ....	35
Fig. 14. Modos de resonancia.....	36
Fig. 15. Modos de resonancia.....	37
Fig. 16. Modulación digital de amplitud en técnica ASK.....	38
Fig. 17. Modulación digital de frecuencia en técnica ASK. ....	39
Fig. 18. Arquitectura modem acústico. ....	43
Fig. 19. Prototipo modem ITACA. ....	44
Fig. 20. Diagrama de arquitectura e implementación física.....	45
Fig. 21. Diagrama de arquitectura e implementación física.....	45
Fig. 22. Diagrama electrónico modulador FSK. ....	48
Fig. 23. Señal generada a partir del modulador FSK. ....	49
Fig. 24. Diagrama electrónico Demodulador FSK.....	50
Fig. 25. Señal demodulador.....	52
Fig. 26. Primera etapa generador osciloscopio. ....	54
Fig. 27. Primera etapa comparación de señal entre la generada y la salida. ....	54
Fig. 28. Envío desde computador y recepción por computador.....	55
Fig. 29. Envío desde microcontrolador y un sensor y recepción por computador.....	55

Fig. 30. Envío desde microcontrolador y un sensor y recepción por computador. ....	55
Fig. 31. Envío serial con microcontrolador de los datos captados por el sensor, recepción con microcontrolador y visualización en un módulo LCD. ....	56
Fig. 32. Envío serial con microcontrolador de los datos captados por el sensor, recepción con microcontrolador y visualización en un módulo LCD. ....	56
Fig. 33. Primera versión de las tarjetas electrónicas para el modulador y demodulador FSK. ....	57
Fig. 34. Primera versión de las tarjetas electrónicas para el modulador y demodulador ASK. ....	57
Fig. 35. Software para la impresora 3D Repetier, Housing o carcasa. ....	58
Fig. 36. Impresión del Housing o carcasa con la impresora 3D. ....	59
Fig. 37. Housing o carcasa en 3D. ....	59
Fig. 38. Diagrama de bloques acondicionamiento de señal. ....	60
Fig. 39. Diagrama de programación de lectura del sensor y transmisión del valor captado por parte del microcontrolador. ....	61
Fig. 40. Distribución de pines y asignación de conexiones para el microcontrolador que realiza la lectura del sensor. ....	61
Fig. 41. Salida del osciloscopio de la señal digital de transmisión serial del microcontrolador con el valor codificado del voltaje capturado por el puerto A/D. ....	62
Fig. 42. Esquema de circuito amplificador TDA2003. ....	63
Fig. 43. Prueba en medio acuático, alineación entre el transmisor y receptor. ....	64
Fig. 44. Transductor cerámico piezoeléctrico SMC3831T25111. ....	65
Fig. 45. Identificación de los electrodos en el cilindro cerámico piezoeléctrico. ....	65
Fig. 46. Diagrama de bloques acondicionamiento de señal. ....	66
Fig. 47. Diagrama eléctrico hidrófono ResonTC4032. ....	68
Fig. 48. Interfaz de audioUSBPre 2. ....	68
Fig. 49. Amplificador Operacional LF153. ....	69
Fig. 50. Amplificador INA 128. ....	70
Fig. 51. Circuito configuración de filtro de paso de banda. ....	71
Fig. 52. Amplificador de audio LM386 configurado para una ganancia de 200. ....	72
Fig. 53. Comparador de voltaje implementado con el circuito integrado lm324. ....	72
Fig. 54. Schmitt-trigger implementado con el circuito integrado 74LS14. ....	73

Fig. 55. Diagrama flujo para el receptor con las funciones de decodificación digital y visualización.	74
Fig. 56. Display LCD (16x2) con visualización de datos recibidos.	75
Fig. 57. Diagrama de bloques acondicionamiento de señal.	75
Fig. 58. Diagrama de bloques acondicionamiento de señal.	76
Fig. 59. Pruebas en contenedor.	77
Fig. 60. Señal de datos transmitidos y recibidos.	77
Fig. 61. Señal modulada.	78
Fig. 62. Espectro de armónicos de la señal transmitida.	78
Fig. 63. Vista en detalle de un conjunto de armónicos de la señal transmitida.	79
Fig. 64. Espectro de la señal recibida luego de los procesos de filtrado.	79
Fig. 65. Fluctuación del componente espectral de la señal recibida.	80
Fig. 66. Pruebas en canaleta del laboratorio de mecánica de fluidos.	80
Fig. 67. Pruebas de transmisión en piscina (distancia de 25 metros).	81
Fig. 68. Pruebas de transmisión en piscina (distancia de 50 metros).	82
Fig. 69. Componentes espectrales para la prueba de 25 metros. Técnica de FSK.	82
Fig. 70. Componentes espectrales para la prueba de 50 metros. Técnica de ASK.	83
Fig. 71. Componentes espectrales para la prueba de 50 metros. Técnica de FSK.	83
Fig. 72. Componente espectral del ruido de fondo de la piscina.	84
Fig. 73. Tarjeta de circuito impreso del receptor FSK y despliegue de mensajes.	84
Fig. 74. Tarjetas de circuito impreso definitivas para el transmisor y receptor ASK.	85
Fig. 75. Detalles de las tarjetas definitivas para el transmisor y receptor FSK.	85
Fig. 76. Modulador ASK ensamblado.	86

## RESUMEN

Las comunicaciones en entornos marinos representan un caso especial dentro de los sistemas de transmisión y recepción de información, esto dado las características del medio que, evidentemente, afectan la propagación de las señales radioeléctricas, lo que resulta en una predominancia, al menos en implementaciones submarinas, de comunicaciones por onda acústica o basadas en enlaces ópticos. Se propone la implementación de un sistema de comunicaciones subacuático que esté basado en ondas ultrasónicas y que pueda ser utilizado en aplicaciones de telemetría o similares, que tengan una tasa de transmisión relativamente baja. Con el fin de verificar la efectividad y rendimiento de dichos sistemas se realizará el diseño e implementación de una fuente acústica subacuática que será controlada por circuitos electrónicos para la transmisión de información. La recepción se realizará con la ayuda de un arreglo de hidrófonos y circuitos electrónicos de demodulación-decodificación. Alternativamente se puede recurrir a equipos de cómputo, tarjetas de adquisición de datos, plataformas de desarrollo que utilizan procesadores de 32 o más bits, o dispositivos similares para ayudar en la etapa de recepción cuando el esquema de transmisión así lo exija. Se espera contribuir con este trabajo a un área que posee pocos registros de estudio y experimentación a nivel local, asimismo se busca encontrar nuevas posibilidades para sistemas de telemetría en entornos marinos que puedan ser adaptados a diferentes escenarios que requieran de comunicación subacuática. Los campos de aplicación y de experimentación para soluciones de comunicación subacuática van desde el control y monitoreo de vehículos submarinos operados remotamente hasta las redes subacuáticas de sensores, por mencionar algunas.

**Palabras clave:** Comunicación subacuática, Ultrasonido, Transductor piezoeléctrico.

## ABSTRACT

Communications in marine environments represent a special case within information transmission and reception systems, given the characteristics of the medium that obviously affect the propagation of radio signals, resulting in a predominance, at least in submarine implementations, Acoustic wave or optical link based communications. It is proposed to implement an underwater communications system which is based on ultrasonic waves and which can be used in telemetry applications or the like, having a relatively low transmission rate. In order to verify the effectiveness and performance of such systems, the design and implementation of an acoustic source underwater will be carried out and controlled by electronic circuits for the transmission of information. The reception will be carried out with the aid of an arrangement of hydrophones and electronic demodulation-decoding circuits. Alternatively, you can use computer equipment, data acquisition cards, development platforms that use processors of 32 or more bits, or similar devices to assist in the reception stage when the transmission scheme so requires. It is hoped to contribute with this work to an area that has few registers of study and experimentation at local level, also looks for to find new possibilities for systems of telemetry in marine environments that can be adapted to different scenarios that require of underwater communication. The fields of application and experimentation for underwater communication solutions range from the control and monitoring of remotely operated submarine vehicles to underwater sensor networks, to name a few.

**Keywords:** Underwater communication, Ultrasound, Piezoelectric transducer.

## I. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones subacuáticas constituyen un área de gran interés para el desarrollo de aplicaciones debido a la complejidad intrínseca que ofrece el medio para la propagación de señales no guiadas. Los módems acústicos son dispositivos de gran utilidad en campos como la telemetría, las redes de sensores y las comunicaciones de vehículos operados remotamente, entre otros. Se plantea un proyecto de investigación que gira en torno al desarrollo de un sistema de comunicación subacuática que puede ser usado para la transmisión de datos en aplicaciones de telemetría en entornos marinos.

Para el desarrollo del proyecto se abordará la fase de construcción de un emisor acústico subacuático, basado en un circuito que modula un transductor piezo-cerámico que opera en frecuencias de ultrasonido. Aparte de los circuitos electrónicos de modulación/demodulación y codificación/decodificación, el sistema de comunicaciones planteado se apoya en un hidrófono y herramientas complementarias para el acondicionamiento, adquisición y análisis de señales para la recuperación de los datos transmitidos.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente la instrumentación utilizada para realizar actividades de localización y comunicación bajo el agua, por ejemplo, los transpondedores y módems acústicos, se basan en la emisión de ondas acústicas debido a que son la mejor opción y las que mejor respuesta presentan para el envío y recepción de información en lo que a términos de propagación se refiere [1] y [2].

Si bien el uso de señales acústicas para sistemas de transmisión bajo el agua ofrece desempeños favorables, los módems acústicos deben tener la capacidad de ser confiables además de soportar altos índices de estrés mecánico. Es por eso, que su desarrollo y fabricación se realiza de forma especializada y avanzada por lo que es normal encontrar en estos instrumentos que sus circuitos electrónicos se desarrollen bajo arquitecturas cerradas impidiendo así, que se realice cualquier tipo de intervención o mejora en su interior. Como consecuencia, se tiene un mercado muy reducido a pesar de que dichos instrumentos se comercialicen mundialmente. Además, por tratarse de dispositivos muy particulares que tienen un uso específico en labores militares, de pesca e investigación, poseen un costo elevado en el orden de los miles de dólares (ver Tabla 1) reduciéndose así, la aplicación en proyectos y siendo accesible solo a proyectos con un alto presupuesto, sumándole el costo que se puede llegar a tener al perder un dispositivo de estas características.

**TABLA I. COMPARACIÓN DE ALGUNOS MÓDEMS ACÚSTICO SUBMARINO**

	Tasa de datos	Distancia de transmisión	Potencia de transmisión y recepción	Costo	Diseño de Firmware y software
Teledyne Benthos	2400 bps	2-6 km	12 W 0.4 W	\$10,000	Propietario
LinkQuest	9600 bps	1500 m	4 W 0.8 W	\$8,000	Propietario
WHOI Micro-Modem	80 bps (FH-FSK) 300-5400 (PSK)	1-10 km	10-100 W 200 mW – 2W	\$8,000	Información de diseño disponible en línea.
UCSD Modem	200 bps	2 km	1 – 40 W 1W	\$600	Información de diseño de disponible en línea.

**Nota:** [3].



### **III. JUSTIFICACIÓN**

Por medio de esta propuesta se pretende diseñar y construir un sistema de transmisión basado en un transmisor y receptor de señales acústicas a partir de sistemas propios y arquitectura abierta, fabricado con componentes de un costo moderado y los cuales se encuentren disponibles en el mercado. Esto permitiría realizar modificaciones y mejoras sobre sus características y sus componentes sin mayores restricciones para el usuario.

También se busca incursionar mediante el diseño e implementación de este sistema, en una temática poco desarrollada en las diferentes academias del país, a tal punto que, luego de la revisión de literatura realizada, no se han encontrado a nivel local trabajos y prototipos importantes para soluciones de competencia ingenieril, también que no se cuente con información suficiente y desarrollos que permitan resolver necesidades puntuales en el medio marino. Debido a esto, se contribuye con la fabricación de este sistema, a la investigación de dispositivos electrónicos aplicada a la acústica submarina en Colombia.

## IV. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Diseñar e implementar un sistema de comunicación para el envío de señales acústicas bajo el agua en el rango de frecuencias de ultrasonido.

### *B. Objetivos específicos*

- Implementar circuitos electrónicos de modulación y demodulación, para señales en frecuencias del ultrasonido, utilizando las técnicas de propagación FSK y ASK.
- Diseñar y construir un *housing* o carcasa para un emisor acústico subacuático utilizando la modalidad de impresión en 3D.
- Implementar los circuitos de acople y de potencia para la emisión de señales acústicas subacuáticas en el rango de frecuencias de ultrasonido, y recepción utilizando un hidrófono.
- Realizar pruebas de comunicación acústica submarina en estanques y piscinas para diferentes configuraciones de distancia, separación y profundidad para emisor-receptor.

## V. MARCO TEÓRICO

### A. Acústica submarina

Para profundizar en la acústica submarina es necesario tener conocimiento de ciertos datos, conceptos y definiciones que a través de los años expertos e investigadores han descubierto y que son necesarias para entender otros principios e investigaciones que han desencadenado en el origen de muchas tecnologías.

Ramírez [4] define la acústica submarina como “el uso activo o pasivo del sonido para el estudio de procesos o parámetro físicos del mar, y que además se utiliza en el estudio de las especies submarinas y su comportamiento”.

Según [5] citado por [6, p. 35], “la acústica submarina es la ciencia del uso de ondas acústicas en el medio submarino como un método de detección, comunicación, navegación y medición de parámetros oceanográficos”.

Para comenzar los inicios de esta ciencia se desarrollan debido a la tragedia por hundimiento del transatlántico Titanic ocurrida en 1912 de la cual se derivó en utilizar el sonido como herramienta para detectar o encontrar objetos bajo el mar y en investigaciones aplicadas al sonido para sistemas de navegación en las embarcaciones [4].

Para la ubicación de objetos en el agua el método que más se utiliza es la retrodispersión acústica o *backscatter* que a modo de ejemplo utilizada comúnmente en dispositivos sonares [7]. La retrodispersión acústica se basa en el análisis de la intensidad acústica que se refleja y se recibe de nuevo a un transductor para ser comparada con la señal emitida. Dicho transductor se desempeña como emisor-receptor y realiza las conversiones de señal eléctrica a acústica y de acústica a eléctrica. Bajo este principio cuando un transductor emite una señal acústica esta se propaga en el medio y por las características del medio, la cantidad de agentes marinos, oleaje, parte de la señal se refleja al transductor y por el retardo de la señal emitida y la reflejada es posible calcular la distancia entre el transductor y el objeto a encontrar [6].

Para poder comunicarse bajo el agua también se utilizan enlaces basados en señales electromagnéticas y señales ópticas pero el uso de estas presenta características demasiado complejas y difíciles de implementar que las ponen en desventaja para la propagación debido a las características fisicoquímicas del medio. Argumento en el que coincide [1] y [8].

### ***B. Señales electromagnéticas en agua salada***

Según [9] las señales electromagnéticas se propagan como ondas de radiofrecuencia que tienen una frecuencia inferior a los 300 GHz, y su principal limitante al aplicarse en el ámbito marino es la conductividad del agua salada ya que, por sus partículas especialmente sales, la convierten en un conductor de corriente eléctrica. Por lo tanto, al haber mayor conductividad de un material en este caso el agua, mayor es la atenuación de las señales de radiofrecuencia. A través de la siguiente ecuación se detalla lo antes expuesto

$$\alpha = 0,0173\sqrt{f\sigma} \quad (1)$$

Donde  $\sigma$  es la conductividad del material en S/m,  $\alpha$  la atenuación del campo magnético en dB/m y  $f$  la frecuencia de la señal portadora. Cuanto mayor sea la conductividad, mayor es la atenuación que se produce del campo magnético y por tanto de la onda que se propaga. A continuación, se muestra las pérdidas por atenuación en dependencia de la frecuencia.

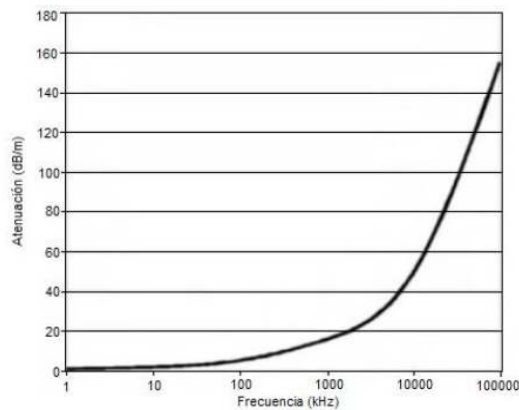


Fig. 1. Atenuación de las señales electromagnéticas en agua salada.

Tomado de: [10].

### *C. Señales electromagnéticas en agua dulce*

A diferencia del agua salada el agua dulce se caracteriza por ser un medio que posee bajas pérdidas.

La velocidad de propagación  $c$  de las señales es dada por la expresión:

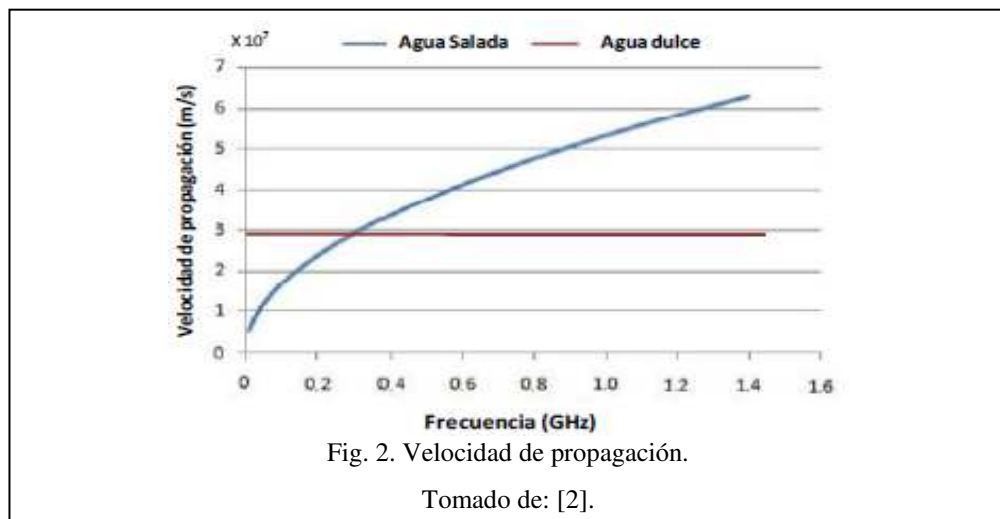
$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu}} \quad (2)$$

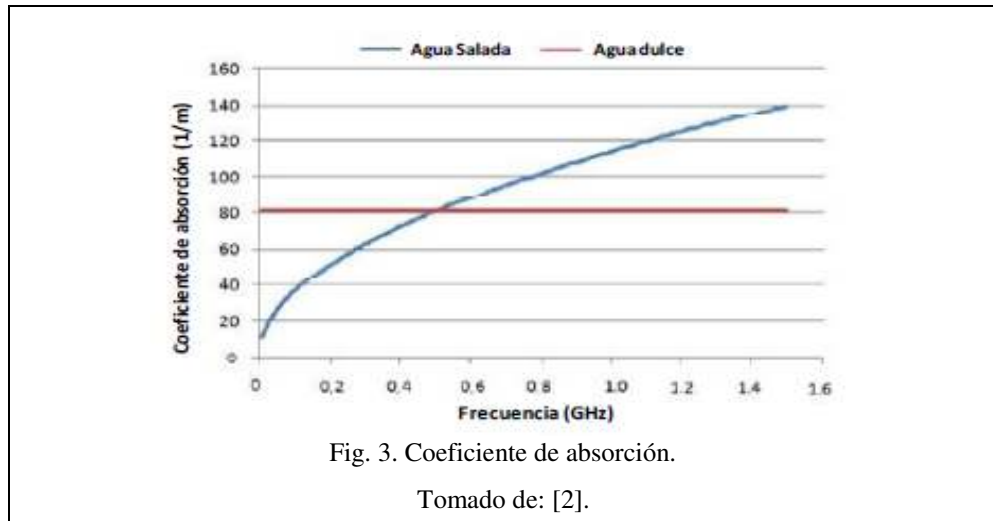
Donde  $\mu$  se refiere a la permeabilidad magnética del agua.

El coeficiente de absorción  $\alpha$  para la propagación de señales electromagnéticas en el agua dulce se puede expresar de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3)$$

Donde  $\sigma$  es la conductividad eléctrica,  $\epsilon$  es la permitividad material y  $\mu$  la permitividad magnética del material. Podemos deducir entonces que la velocidad de propagación y coeficiente de absorción de agua dulce son independientes de la frecuencia de trabajo de las señales transmitidas. A continuación, las Figuras 2 y 3 muestran la variación de la velocidad de propagación y coeficiente de absorción para el agua dulce y el agua salada, respecto a la frecuencia.

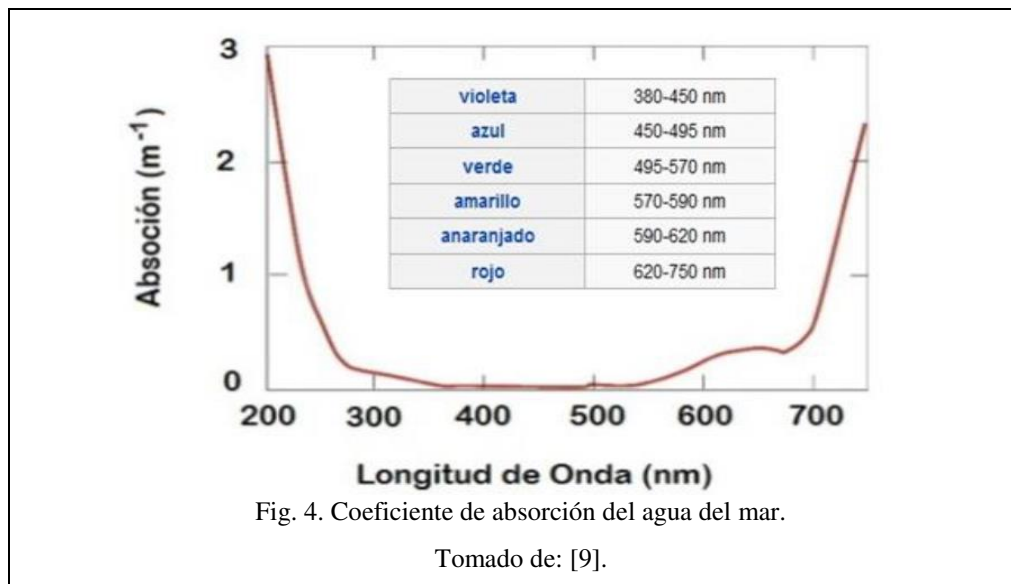




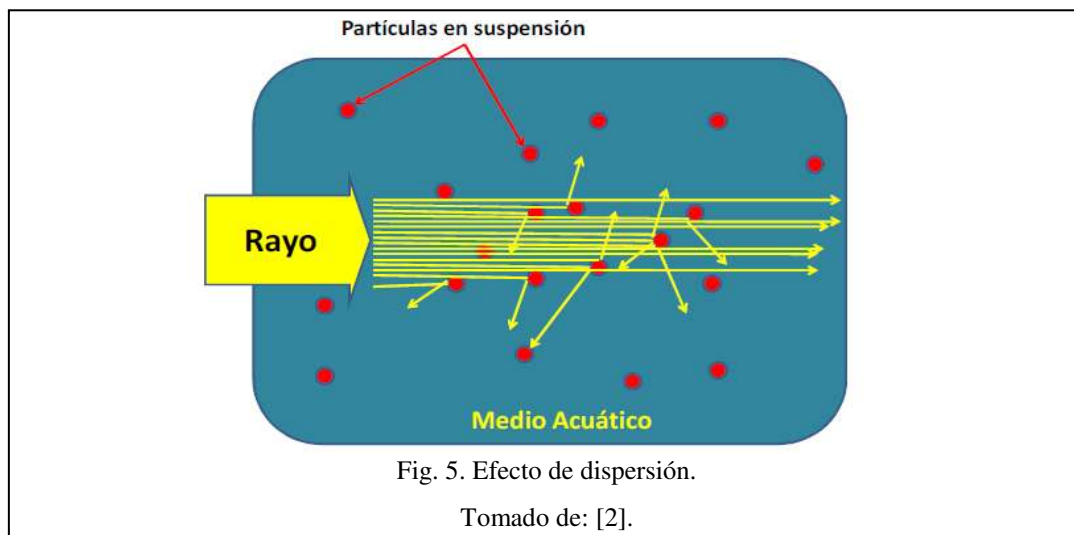
Se puede ver que para frecuencias altas el coeficiente de absorción es más alto, siendo entonces más recomendable trabajar a frecuencias bajas. Y para frecuencias altas si bien la velocidad de propagación es también alta, el índice de absorción también lo es. Podemos decir entonces que el uso de ondas electromagnéticas para tal fin no es el adecuado por la atenuación que presenta debido a la característica de conductor que posee el agua del mar, requiriendo así el uso de una mayor potencia y el uso de repetidoras de señal.

#### ***D. Señales ópticas***

Las comunicaciones ópticas se basan en la transmisión de señales con longitudes de onda entre 400 y 700nm. semejante a las señales electromagnéticas, por la alta frecuencia de las señales ópticas, es posible obtener tasas altas de transmisión a baja potencia, pero se limitan generalmente a distancias cortas debido al factor de absorción tan alto que tiene el agua en la banda frecuencias ópticas, por lo que alcanzar distancias mayores obligaría utilizar mayor potencia de transmisión [10]. A continuación, se muestra las pérdidas por absorción en dependencia de la longitud de onda.



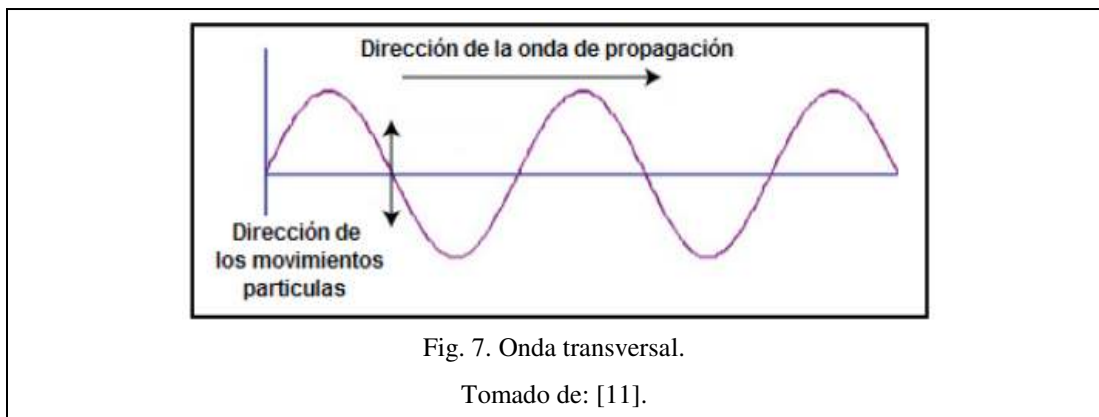
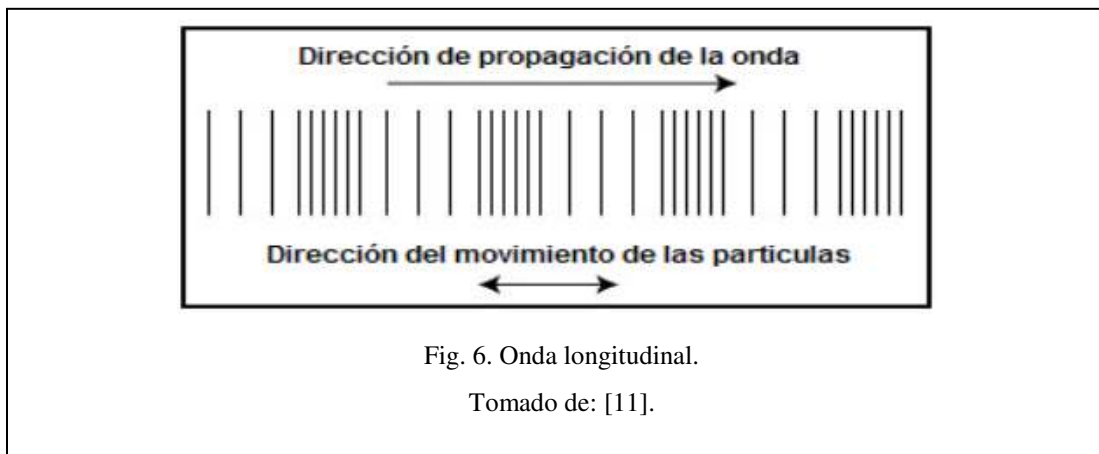
Se puede observar que no todas las frecuencias ópticas se ven afectadas de la misma manera, por lo que algunos colores tienden a desaparecer más rápido que otros. En general la propagación de la luz depende del medio, razón por la cual la luz que viaja en el aire no viaja a la misma velocidad que en el agua. Cuando viaja por el medio acuático, su intensidad disminuye gradualmente debido a causas especiales como la absorción, donde la energía se convierte en otro tipo de energía como el calor y la dispersión donde los haces de luz colisionan con partículas en suspensión generando múltiples reflexiones. En la figura 5 se muestra el efecto de dispersión de la luz en el agua, que contiene partículas en suspensión.



### *E. Señales acústicas*

Una onda mecánica es una perturbación que necesita un medio para propagarse, al viajar por un medio las partículas que se encuentran en el medio experimentan desplazamientos de diferentes tipos dependiendo del origen de la onda.

Las ondas pueden tomar diferentes formas, entre ellas hay dos tipos, longitudinales donde las partículas se desplazan de forma paralela a la dirección de propagación de la onda y transversales donde las partículas del medio se mueven perpendicular a la dirección de propagación de la onda.





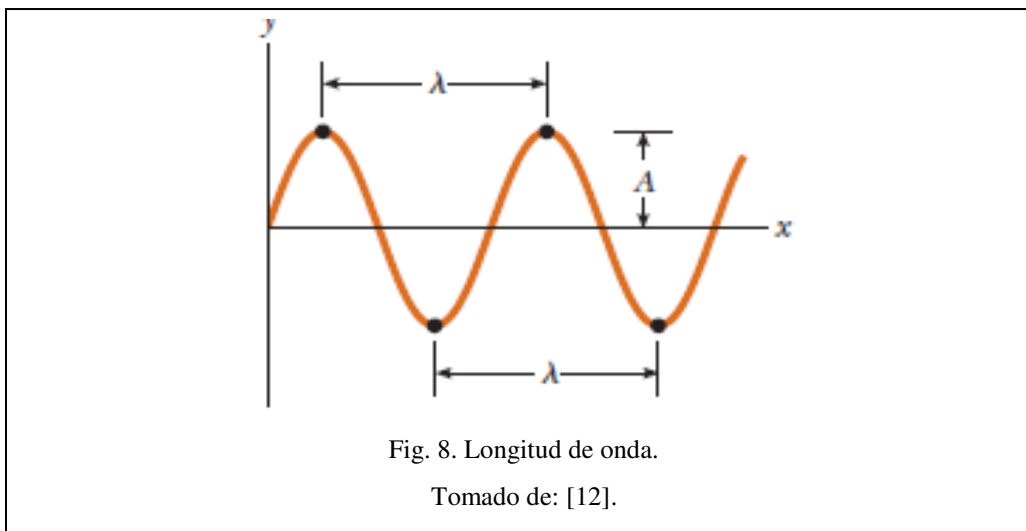
Las ondas acústicas son ondas mecánicas que su propagación se da por la vibración de partículas en el medio subacuático (moléculas de aire), tales ondas se consideran ondas longitudinales ya que su propagación se da paralela a la vibración de esas partículas [12].

Ahora bien, el sonido es un fenómeno físico producido por la vibración de un objeto que genera determinado número de ondas, las cuales hacen que las moléculas por las que pasan, en nuestro caso el agua, presenten compresión (áreas donde las partículas están cercas unas de las otras) y rarefacción (áreas donde las partículas están separadas una de las otras).

Las ondas de sonido están divididas en tres categorías cada una con un intervalo de frecuencias diferentes:

- Las ondas audibles por el oído humano, estas se encuentran aproximadamente entre 20 Hz y 20kHz.
- Las ondas infra sónicas que están por debajo del espectro audible del oído humano.
- Las ultrasónicas que están por encima de la capacidad de audición del oído humano.

Uno de los parámetros que determina una onda es la longitud de onda que se expresa como  $\lambda$ . La longitud de onda es la distancia real entre dos máximos consecutivos. La unidad de medida para la longitud de onda es el metro.



Existe una relación entre la frecuencia y la longitud de una onda, donde su producto es igual a la velocidad con que se propaga la onda  $c$  y se expresa de la siguiente manera:

$$c = f\lambda \quad (4)$$

Donde la frecuencia  $f$  es el número de ciclos que se repite en un segundo su unidad son los Hertz (Hz). En vista de que la velocidad de propagación  $c$  en determinado medio es constante, si aumenta la frecuencia, para que el producto de la ecuación anterior sea constante, la longitud de onda debe disminuir y viceversa. Por lo tanto, si asumimos que en el océano la velocidad el sonido es 1400 m/s, las longitudes de onda para sonido submarino son:

**TABLA II. LONGITUDES DE ONDA**

<i>Frecuencia (Hz)</i>	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$
<i>Longitud de onda</i>	14 m	1.4 m	14 cm	1.4cm

Entendido el concepto de onda sonora y cómo se comporta una onda es necesario entender como viaja en el agua, para esto es importante conocer factores que influyen en su propagación.

### ***F. Velocidad del Sonido***

A partir de la ecuación de onda es posible hallar la velocidad del sonido y su valor está dado por:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido en m/s,  $E$  es el módulo de elasticidad y  $\rho$  la densidad el medio. Según esta expresión la velocidad de propagación es una constante y valor depende del medio donde se propague.

El sonido se propaga más rápido en el agua que en el aire y con una menor pérdida de energía, por lo que se transmite a una velocidad entre 1400 y 1600 m/s lo que es aproximadamente cinco veces más rápido que la velocidad del sonido en el aire que es de 340 m/s. La velocidad del sonido aumenta debido a factores como la temperatura, la presión del agua y si se considera salada depende también de la salinidad [13].

También existen ecuaciones empíricas si se quiere determinar la velocidad del sonido la siguiente ecuación es válida para el agua destilada.

$$c(P, t) = 1402.7 + 488t - 482t^2 + 135t^3 + (15.9 + 2.8t + 2.4t^2) \left( \frac{P_G}{100} \right) \quad (6)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido en m/s,  $t=T/100$ , donde  $T$  es la temperatura en grados Celsius, y  $P_G$  es la presión de gauge expresada en bares, un valor de cero bares indica una presión de equilibrio de 1.01325 bar. Esta ecuación corresponde para temperaturas entre  $0^\circ C$  y  $100^\circ C$  y para presiones entre 0 y 200 bar.

Como el agua de mar es diferente en cuanto a las variables que determinan la velocidad del sonido debido a su salinidad comparada con la destilada, las velocidades en ambos medios son diferentes.

Otra expresión es la ecuación empírica determinada por Del Grosso

$$c(S, T, P) = 1402.392 + \Delta C_S + \Delta C_T + \Delta C_P + \Delta C_{STP} \quad (7)$$

Donde  $\Delta C$  son coeficientes en función de la temperatura, presión y la salinidad. Esta ecuación corresponde a temperaturas entre  $0^\circ C$  y  $30^\circ C$ , con un porcentaje de salinidad entre el 30% y 40%, y una presión entre 0 y 100  $kg \cdot cm^2$ . Esta ecuación fue perfeccionada y expresada de la siguiente manera.

$$c = 1448.96 + 4.591T - 0.05304T^2 + 0.0163D + 1.34(S - 35) \quad (8)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido,  $T$  la temperatura entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $D$  la profundidad entre 0 y 8000 metros y  $S$  la salinidad entre 30 y 40 partes por mil.

Otra fórmula para determinar la velocidad del sonido en el mar es la ecuación empírica desarrollada por Lovett, quien a partir de una serie mediciones de la velocidad del sonido en el agua con diferentes salinidades, temperaturas y presiones, postuló la siguiente ecuación:

$$c(\mathcal{L}, s, t) = 1449.05 + 45.7t - 5.21t^2 + 0.23t^3 + (1.33 - 0.126 + 0.009t^2)(s - 35) + \Delta\mathcal{L} \quad (9)$$

Donde  $\Delta\mathcal{L} \approx 1.63\mathcal{L} + 0.18\mathcal{L}^2$

Esto es válido para una latitud de  $45^{\circ}$ , para latitudes diferentes  $\mathcal{L}$  se reemplaza con  $\mathcal{L}(1 - 0.00026 \cos\varphi)$  donde,  $\varphi$  es la latitud en grados,  $s$  la salinidad,  $\mathcal{L}$  la profundidad en kilómetros y  $t$  es igual a  $T/10$  donde  $T$  está en grados Celsius, obteniéndose una desviación normal de 0.06m/s con respecto a la ecuación 10 aplicada hasta una profundidad de 4 km [11].

Si analizamos las ecuaciones propuestas hasta ahora, vemos que la temperatura, la densidad y la salinidad son parámetros asociados al agua que son intrínsecos y que influyen directamente en la propagación del sonido haciendo que la velocidad sea mayor en ella cuando dichas variaciones sean altas. A continuación, se muestra la variación del sonido en el agua respecto a sus parámetros asociados.

**TABLA III. VARIACIÓN DEL SONIDO ASOCIADO A TEMPERATURA, SALINIDAD Y PROFUNDIDAD**

<b>Factor</b>	<b>Por cada aumento de:</b>	<b>Velocidad sonido aumenta aprox</b>
<b>temperatura</b>	<b>1°C</b>	<b>2.5 m/s</b>
<b>salinidad</b>	<b>1 parte por mil</b>	<b>1.4 m/s</b>
<b>profundidad</b>	<b>100 metros</b>	<b>1.8 m/s</b>

Nota: [11].

Se debe tener en cuenta que el efecto de la temperatura es superior al de la salinidad y la presión en agua a niveles poco profundas, ya que esta se aproxima a sus valores más altos por lo que es factible que se presenten variaciones ligeras. Podemos decir que los efectos asociados a la temperatura están relacionados con la profundidad y a profundidades mayores la presión es alta y la temperatura se hace despreciable por lo que la velocidad del sonido aumentará. Sobre distancias debajo de los 50 metros hasta los 300 metros, la velocidad disminuye rápidamente ya que la temperatura es constante y la presión es poca, pero a profundidades mayores a los 300 metros la temperatura no es influyente por el aumento de presión y de salinidad lo que hace que la velocidad aumente proporcionalmente.

Teniendo en cuenta los efectos nombrados se muestra en la figura 9 la forma para lo que se denomina el perfil de velocidad del sonido para latitudes medias. Se destacan los cambios de velocidad por la presión asociada a la profundidad. A distancias cercanas a la superficie la velocidad disminuye en los primeros 1000 metros aquí se produce un mínimo en el valor de la velocidad del sonido lo cual se llama eje de canal sonoro profundo; para valores menores a esta profundidad comienza a notarse el efecto de la temperatura aumentando cada vez más a lo que se acerca a la superficie del mar hasta una profundidad de 200 metros llamada termoclina principal donde los cambios estacionales son despreciables. Por encima de este se encuentra la termoclina estacional que responde a cambios estacionarios. Por último, está la capa superficial que depende de las variaciones atmosféricas respecto al día, la hora, el movimiento de las aguas que crean una mezcla que puede considerarse como isotérmica. La región desde el fondo profundo hasta el mínimo se llama capa isotérmica profunda y allí la temperatura se encuentra entre  $-1^{\circ}C$  y  $5^{\circ}C$  dependiendo de la profundidad del mar.

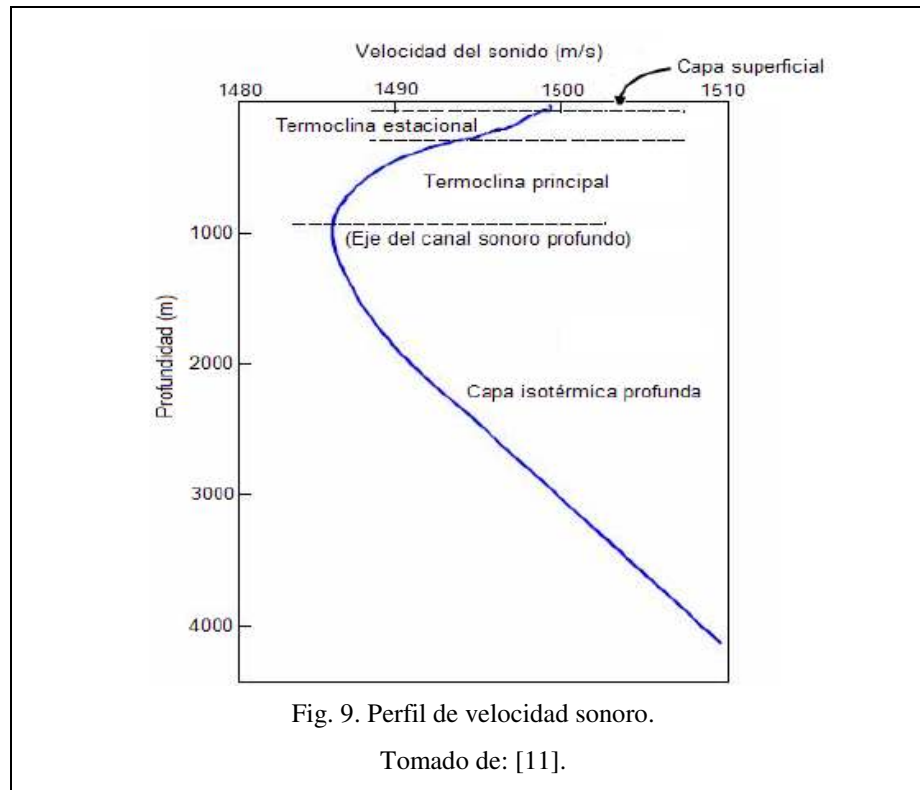


Fig. 9. Perfil de velocidad sonora.

Tomado de: [11].

### ***G. Factores que afectan la propagación del sonido***

El estudio de la velocidad del sonido es importante ya que se puede entender como el sonido se transmite de un lugar a otro al propagarse en el agua, así como los fenómenos asociados que se pueden presentar al experimentar dicha propagación. Estos fenómenos son la atenuación, absorción, reflexión, dispersión.

#### ***1) Absorción***

Cuando el mar se encuentra agitado el medio absorbe la energía de las olas, por lo tanto, las señales acústicas que se propagan en el agua sufren el mismo efecto, disminuyendo así su energía inicial. En la figura 8 se puede observar que el fenómeno de absorción es más agudo en un rango de frecuencias que en otro. por lo que se podemos decir que la absorción depende directamente de la frecuencia.

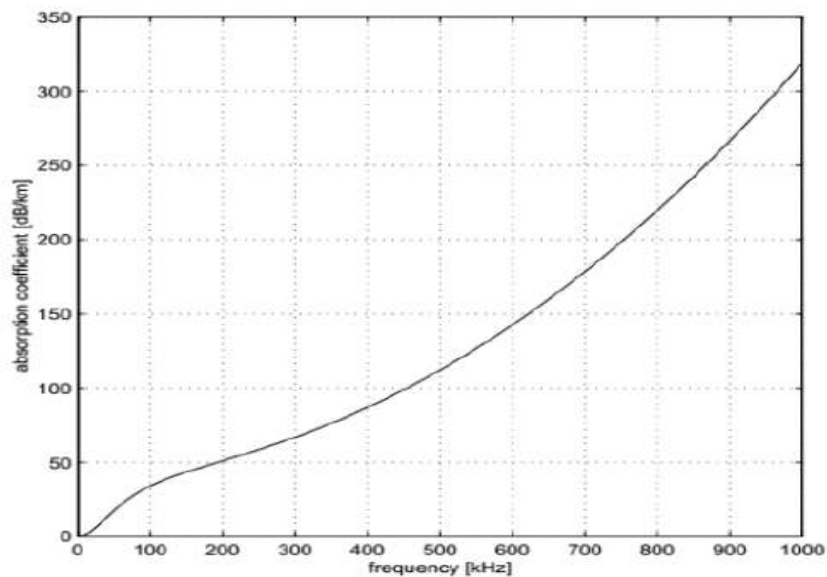


Fig. 10. Coeficiente de absorción.

Tomado de: [6].

Esta dependencia limita rigurosamente el ancho de banda disponible, por lo que a distancias más cortas el ancho de banda es mayor, pero en la práctica este se encuentra limitado según el transductor que se utilice [10].

## 2) Atenuación

Principalmente, la causa por la que se presenta atenuación bajo el agua es debido al fenómeno de la absorción, ya que se presenta una conversión de la energía acústica en calor. La profundidad del agua determina también un papel clave en la determinación de la atenuación debido a la dispersión y la reverberación, y en las zonas de la superficie la refracción y la dispersión. Además, la atenuación tiende a incrementarse con la distancia y la frecuencia [2].

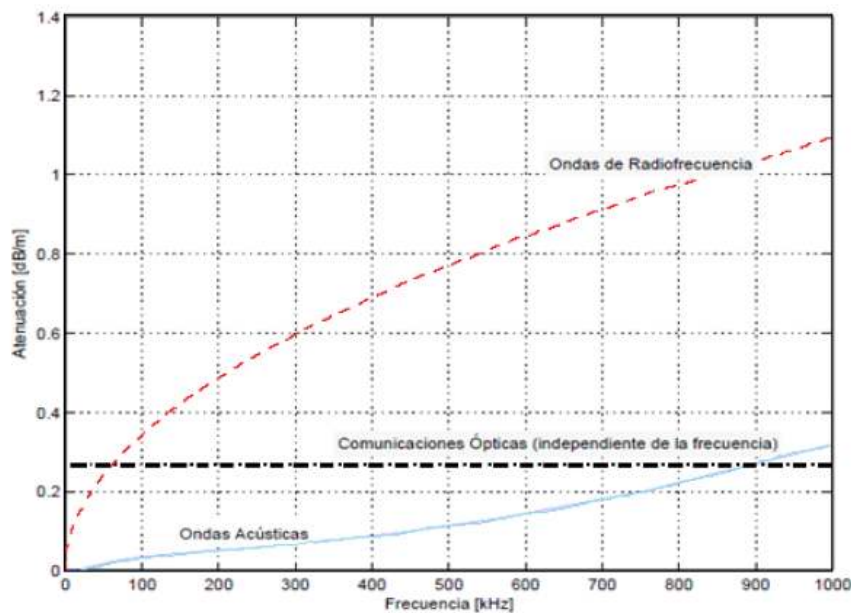


Fig. 11. Atenuación.

Tomado de: [9].

La figura 11 presenta una comparación de la atenuación en función de la frecuencia para las tecnologías de comunicación inalámbrica subacuáticas utilizadas, a excepción de las ópticas. Esta comparación lo que nos da es una idea del porqué la elección de ondas acústicas para este medio, es el método más adecuado respecto a las otras tecnologías utilizadas.

### 3) *Dispersión*

Las pérdidas por el fenómeno de dispersión se atribuyen principalmente a partículas, cuerpos u organismos marinos presentes en el agua. Si el sonido se encuentra un obstáculo en la dirección de su propagación lo más probable que suceda es que las ondas acústicas se reflejen o se dispersen en todas direcciones. Esto depende en relación al tamaño del objeto (dispersor), es decir, para que el sonido se refleje el objeto deberá ser igual o mayor que la longitud de onda del sonido, de lo contrario el sonido se dispersará [11].

A continuación, nombraremos otros factores como el ruido que también pueden dificultar la comunicación bajo el agua.



#### ***4) Ruido ambiental submarino***

En el océano existen varias fuentes que producen ruido de fondo, el cual es llamado ruido ambiental, de estas fuentes de ruido las principales son:

- Las mareas. Son una pequeña contribución al ruido ambiental que puede originar cambios grandes en la presión ambiental en el océano. Dichos cambios serán significativos, pero a bajas frecuencias menores a los 100 Hz pero que menguarán con la profundidad.
- La actividad sísmica. Es una fuente de ruido con frecuencias menores a los 10 Hz, de igual forma que las mareas estas fuentes no son significantes en los cálculos de ruido ambiental submarino.
- Turbulencia. Es una fuente significativa para los niveles de ruido ambiental submarino a frecuencias menores a los 100 Hz.
- Trafico de barcos. este ruido proveniente por la marcha de embarcaciones, puede viajar distancias alrededor de los 1000 Km en frecuencias de 10 Hz hasta 100 Hz.
- Estado del mar. Asociado a la velocidad del viento que llega a la superficie del mar generando ondas y turbulencia. Es utilizado para cálculos de ruido a frecuencias por encima de los 500 Hz

La figura 10 describe los niveles de ruido de algunas de las fuentes nombradas con diferentes valores de actividad. Luego de realizar un análisis de la gráfica podemos concluir que el nivel de ruido disminuye con el aumento de la frecuencia y a mayores profundidades ya que en la superficie predomina la mayoría de fuentes de sonido.

Un factor importante que muestra la figura 12 es el ruido térmico ya que este predomina cuando se trabaja a alta frecuencia. Este ruido es importante ya que este ruido afecta a los sistemas electrónicos [6].

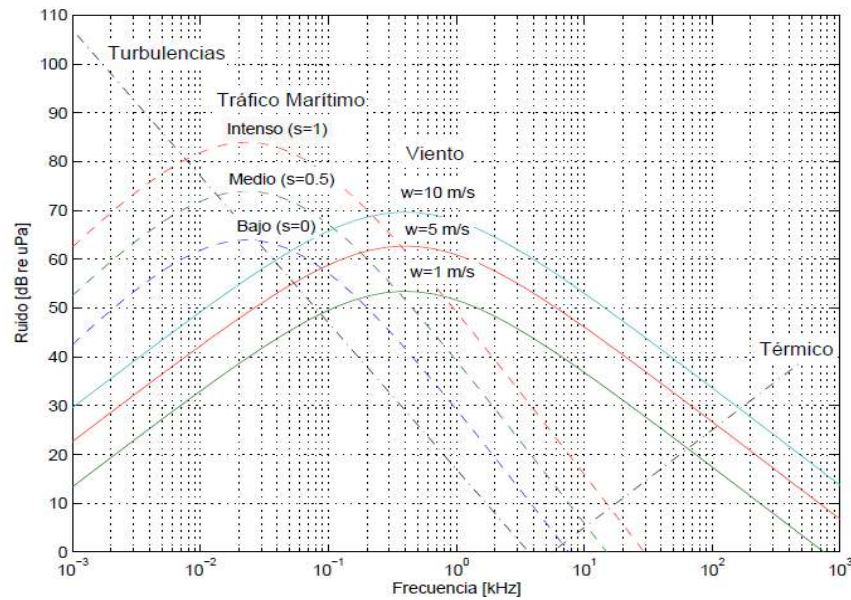


Fig. 12. Curvas de ruido.

Tomado de: [9].

### 5) Relación señal a ruido

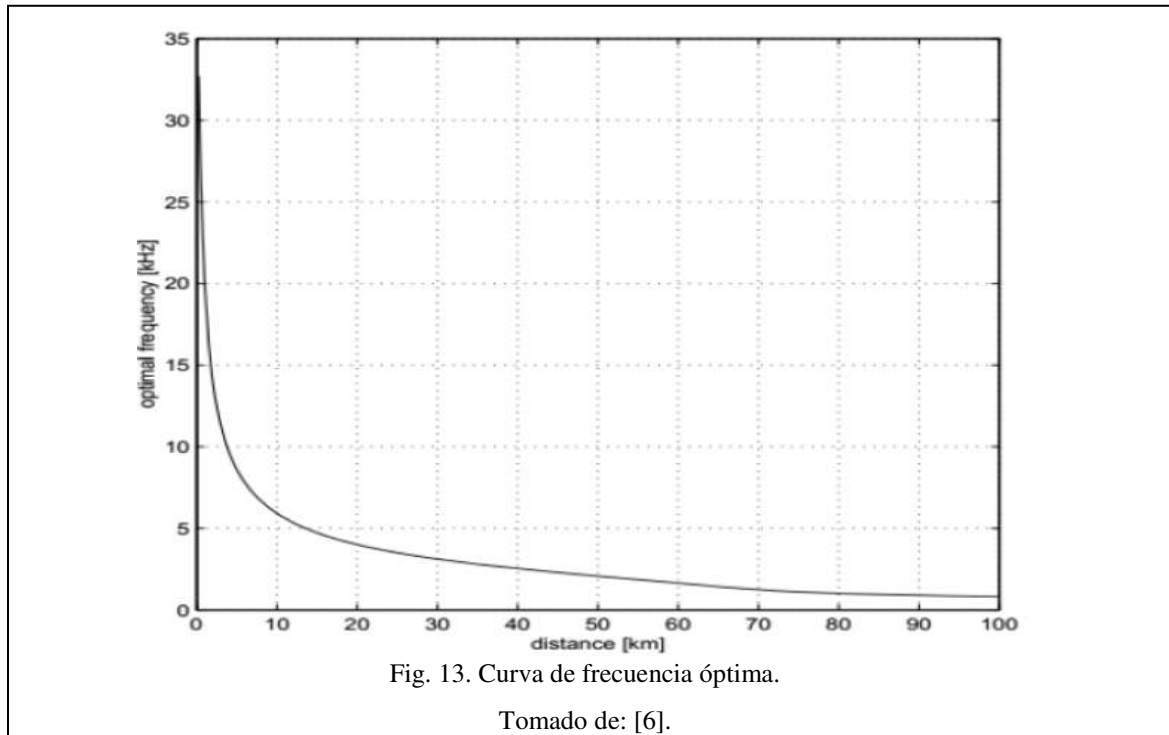
El término señal -ruido ( $S/N$ ), se utiliza para cuantificar el grado de contaminación por ruido que corrompe una señal de entrada o salida de un circuito de transmisión-recepción y se define como:

$$\frac{S}{N} = \frac{S(f)}{N(f)} \quad (10)$$

Donde  $S(f)$  es el valor de la tensión de señal y  $N(f)$  el valor de la tensión de ruido. para la señal como para el ruido esta relación suele expresarse en potencia o densidad de potencia y las unidades son los decibels (dB).

Según [14] citado por [6, p. 71], en un estudio realizado a partir de las pérdidas de propagación, encontró una relación de señal ruido de una señal acústica emitida en el mar donde utilizó la atenuación y el ruido ambiental submarino. Lo importante de esta relación es que existe un factor que expresa que para cada distancia de transmisión existe una óptima frecuencia para la cual la

relación señal ruido es máxima por lo que la afectación por el ruido es menor. La figura 13 nos lo muestra con detalle.



### ***H. Usos de frecuencias acústicas***

Ahora que se ha expuesto las ventajas de utilizar señales acústicas frente a las otras tecnologías utilizadas, es conveniente nombrar algunas de las frecuencias utilizadas y para qué son utilizadas. Tenemos entonces según [5] citado por [6, p. 38] que:

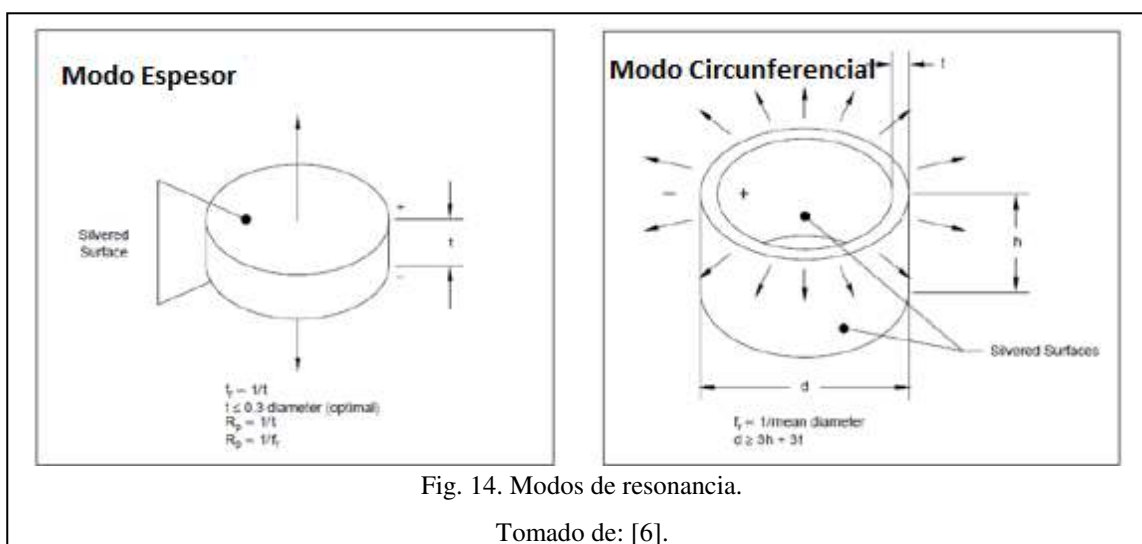
- Frecuencias entre 20 Hz y un poco menos de 1 kHz se utilizan para el estudio de los movimientos oceánicos.
- Frecuencias de 1 kHz hasta 10 kHz se utilizan para sonares activos y el estudio de especies marinas.

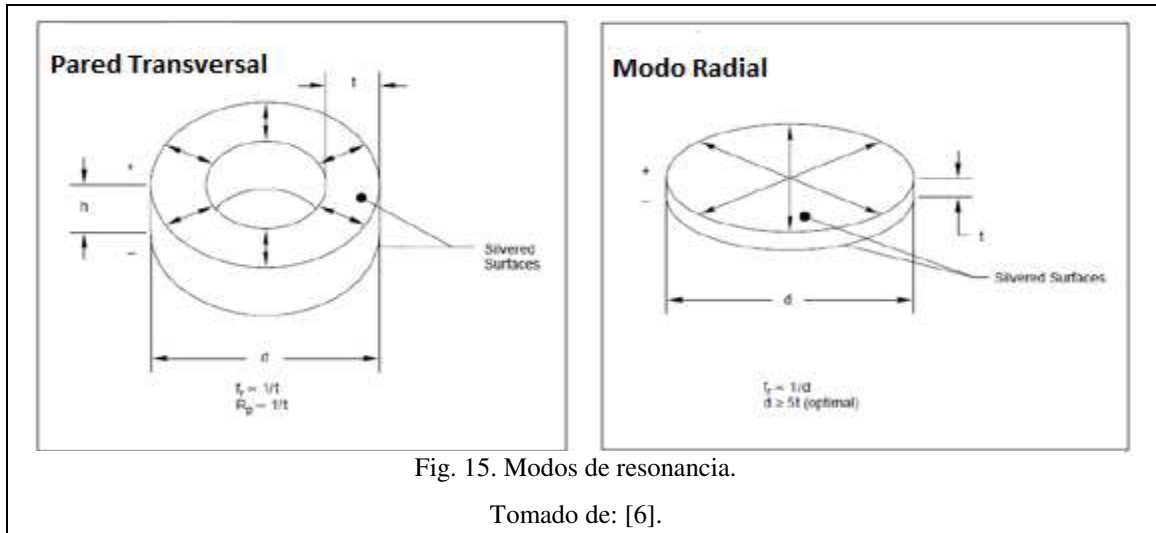
- Frecuencias mayores a los 10 kHz son habituales para sistemas de comunicación, localizar objetos, búsqueda de peces.
- Frecuencias por mayores a los 100 kHz se utilizan para medir partículas pequeñas.

### ***I. Transductor piezoeléctrico***

En la gran mayoría de aplicaciones submarinas es común utilizar transductores piezoeléctricos para la generación y recepción de sonido. El transductor piezoeléctrico, es un material ferro eléctrico que convierte la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Comúnmente están fabricados con cerámicas polarizadas y cortadas de varias maneras para generar diferentes formas de onda. Las cerámicas más utilizadas son las cerámicas piezoeléctricas o PZT (Titanato Zirconato de Plomo) debido a su alta eficiencia de conversión.

Usualmente las cerámicas se utilizan para resonar en una frecuencia específica, no obstante, poseen diversas resonancias que dependen de la geometría y el tipo de material piezocerámico. Estos pueden tener diferentes modos de resonancia por lo que para cada modo de resonancia y tipo de material existe una frecuencia constante dada en kHz/mm y un determinado coeficiente de acoplamiento. A continuación, las figuras 14 y 15 nos muestra los diferentes modos de resonancia circunferencial, espesor, radial, o pared transversal.





Los piezoeléctricos más utilizados en aplicaciones submarinas son los de resonancia en modo circunferencial y con frecuencias de resonancia menores a los 75 kHz.

### ***J. Modulación***

Se define como el proceso de transformar las propiedades de la señal o información, de su forma original en el modo adecuado para su transmisión mediante un circuito modulador. Al utilizar esta técnica el espectro de frecuencias de la señal moduladora o información a transmitir se adapta según las características del medio.

Las técnicas de modulación se clasifican en función de si se requiere sincronismo de fase con la señal portadora o si no se requiere, llamándose estas modulaciones como modulaciones coherentes y no coherentes [9]. Los primeros ensayos en comunicaciones acústicas se realizaron mediante modulaciones no coherentes entre estas tenemos:

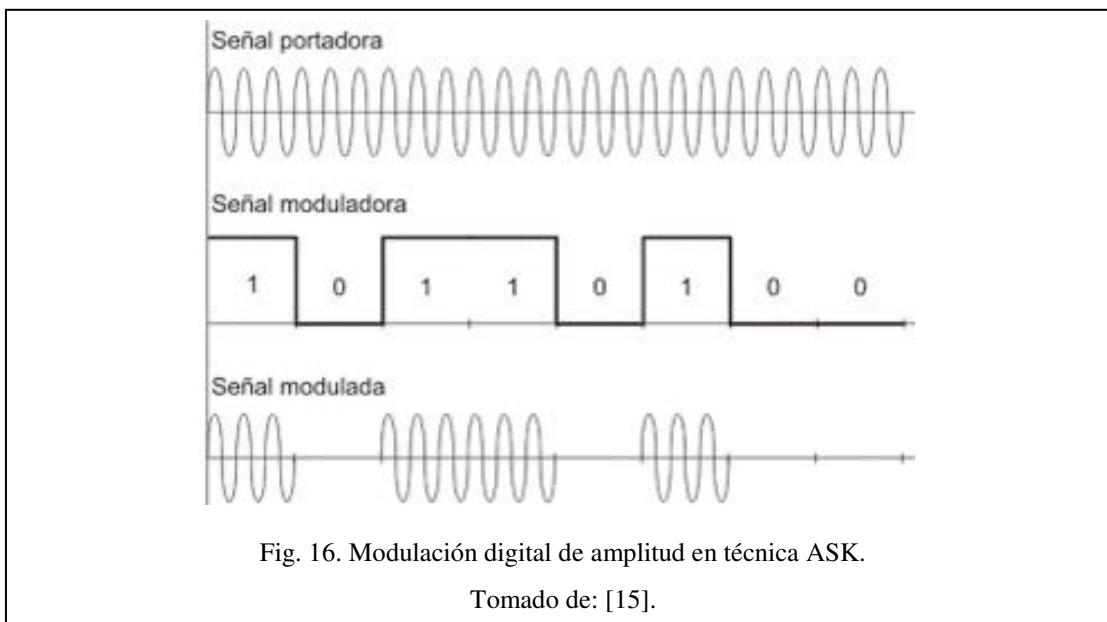
#### ***1) Modulación en amplitud***

Para esta técnica tendremos la frecuencia y la fase constantes en el tiempo. Según se muestra en la figura 16, si la señal de información es digital y su amplitud varía proporcionalmente a la señal de información se produce la modulación por conmutación de amplitud (ASK).

La ecuación que describe la modulación digital de amplitud a través de una señal binaria es:

$$V_{am}(t) = [1 + V_m(t)] \left[ \frac{A}{2} \cos(\omega_c t) \right] \quad (11)$$

Donde  $V_{am}(t)$  es el voltaje de la señal de amplitud modulada,  $\frac{A}{2}$  es la amplitud de la portadora no modulada en voltios,  $V_m(t)$  es la señal binaria moduladora y  $\omega_c$  es la frecuencia de la portadora en radianes por segundo.



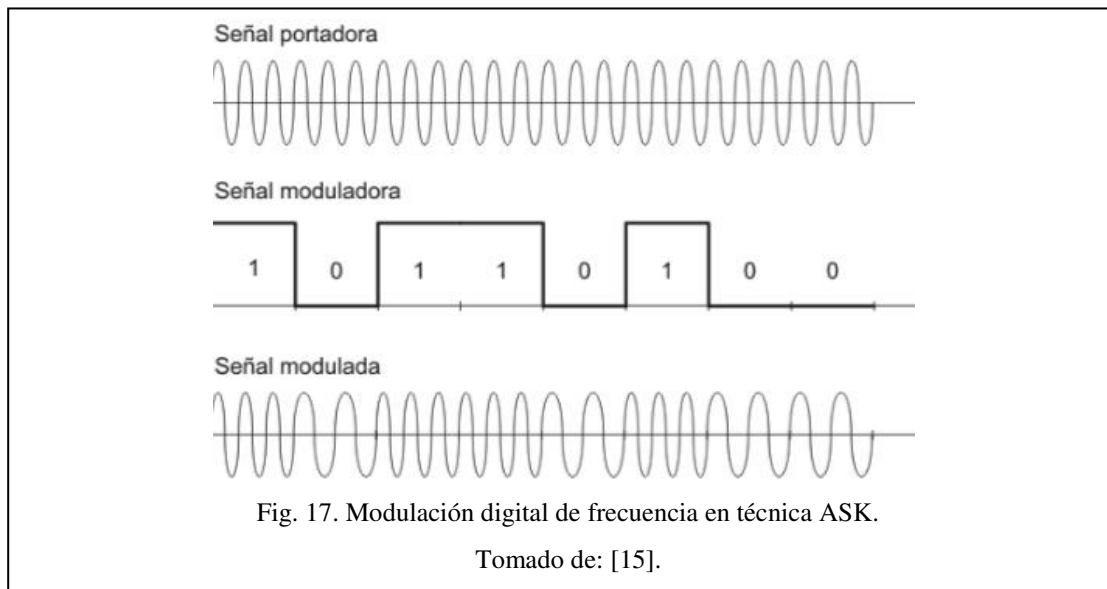
## 2) Modulación en frecuencia

Para este caso la frecuencia variará en la señal portadora en forma proporcional a la amplitud de la señal de información, según la figura 17, en el caso de que la señal de información sea digital se produce la modulación por conmutación de frecuencia (FSK).

La ecuación que describe la modulación por conmutación de frecuencia a través de una señal binaria es:

$$V_{fsk}(t) = V_c \cos\{2\pi[f_c + V_m(t) \Delta f]t\} \quad (12)$$

Donde  $V_{fsk}(t)$  es la forma de onda binaria,  $V_c$  es la amplitud de la portadora en voltios,  $f_c$  la frecuencia central de la portadora,  $\Delta f$  la desviación máxima de frecuencia y  $V_m(t)$  la señal moduladora de entrada.



Una de las principales ventajas de estas técnicas de modulación es su facilidad de implementación, debido a esto los circuitos que utilizan estas técnicas de modulación no necesitan de sistemas o unidades de procesamiento o tareas de cálculo demasiado complejas, y por lo tanto no tendrán un consumo de potencia elevado [9].

## VI. ESTADO DEL ARTE

En las últimas décadas la importancia del entorno submarino relacionado con el uso de comunicaciones acústicas, ha aumentado en gran manera debido a la necesidad de estimar alteraciones en los fenómenos naturales, el estudio de vida submarina, realizar tareas de búsqueda o localización de objetivos, controlar y comunicar embarcaciones tripuladas y no tripuladas entre otros.

Aunque solo en las últimas décadas ha crecido significativamente el uso de señales acústicas, desde sus inicios los científicos siempre han sido curiosos acerca de los sonidos y de cómo estos viajan, o se propagan. Hace más de 2000 años Aristóteles fue uno de los primeros en percatarse que el sonido podía ser escuchado tanto en el agua como en el aire. Siglos más tarde, Leonardo da Vinci por medio de la investigación orientada a la propagación acústica hizo la misma observación, afirmando que los barcos se podían oír a distancias considerables bajo el agua [16].

En el año de 1826 el físico Jean-Daniel Colladon y el matemático Charles-François Sturm, estimaron la velocidad del sonido en el agua. Este experimento se llevó a cabo en el lago de Ginebra en Suiza y para ello utilizaron dos señales simultaneas, el sonido de una campana bajo el agua y el destello luminoso provocado por la activación de pólvora. Colladon y Sturm determinaron la velocidad del sonido en agua dulce a 1435 metros por segundo a una temperatura de 8 grados Celsius. Aproximadamente en esta misma época, los científicos empezaron a pensar en las aplicaciones prácticas del sonido submarino. Una de las primeras aplicaciones que los científicos exploraron fue determinar la profundidad del mar escuchando ecos.

En 1840 se produce el descubrimiento del efecto magnetostricción por James Joule, y en 1880 el efecto piezoeléctrico por Pierre y Jacques Curie. Estos efectos serían los que permitirían generar ondas acústicas y más adelante trascender en investigaciones en ambientes subacuáticos.

Durante la primera guerra mundial, en 1917, el físico Paul Langevin, utilizó el efecto piezoeléctrico para construir un sistema de detección de submarinos utilizando cristales de cuarzo colocados entre



dos placas de acero, generando así una onda acústica, y alrededor de 1918, por primera vez, se recibieron ecos de un submarino a 1500 metros [13].

Solo hasta la segunda guerra mundial se daría el comienzo de una extensa investigación en acústica submarina por lo que se obtendrían los primeros sistemas de comunicación subacuática enfocados principalmente a la detección y lucha antisubmarina. De estos sistemas se destacan principalmente el *SONAR* (Sound Navigation and Ranging) y se entiende como el método o el equipo necesario para determinar por medio de ondas sonoras la presencia, o localización de objetos en el mar. Existen básicamente dos tipos, activos y pasivos, en el Sonar Activo el sistema considera una fuente sonora que emite un pulso de sonido y utiliza las ondas acústicas reflejadas (ecos) para determinar la posición de objetivos. En el Sonar Pasivo, el sistema escucha los sonidos que emite el objeto que se está tratando de localizar [11].

Los Sistemas de comunicaciones submarinas se desarrollaron con el fin de establecer transmisiones de información barco a barco, y comunicaciones entre submarinos estando separados varios kilómetros. Finalizando la Segunda Guerra Mundial se implementó un sistema de comunicaciones subacuática que utilizaba una modulación de amplitud de banda lateral única con un ancho de banda de 8 a 11 kHz. Posteriormente con el desarrollo de tecnologías como VLSI (Very-large-Scale Integration) para circuitos integrados y el procesamiento digital de señales, estos sistemas se implementarían de manera más general y se comenzaron a llevar a cabo técnicas de ecualización y corrección de errores. El rápido avance de la acústica submarina continuó después de la Segunda Guerra Mundial a partir de entonces, la investigación posterior ha traído consigo el uso de técnicas digitales [1], [13].

En las últimas décadas la tecnología más usada para aplicaciones de monitoreo submarino se ha basado en sensores pasivos de presión sonora conocidos como hidrófonos [17].

Alrededor de 1950 se desarrolló en los Estados Unidos un sistema de monitoreo llamado SOSUS (*Sound Surveillance System*) para labores de vigilancia y rastreo de submarinos, formado por una serie de hidrófonos ubicados en el fondo del mar a una profundidad determinada. Este sistema

permitía realizar un monitoreo acústico de sonidos que viajaban dentro del canal de sonido profundo.

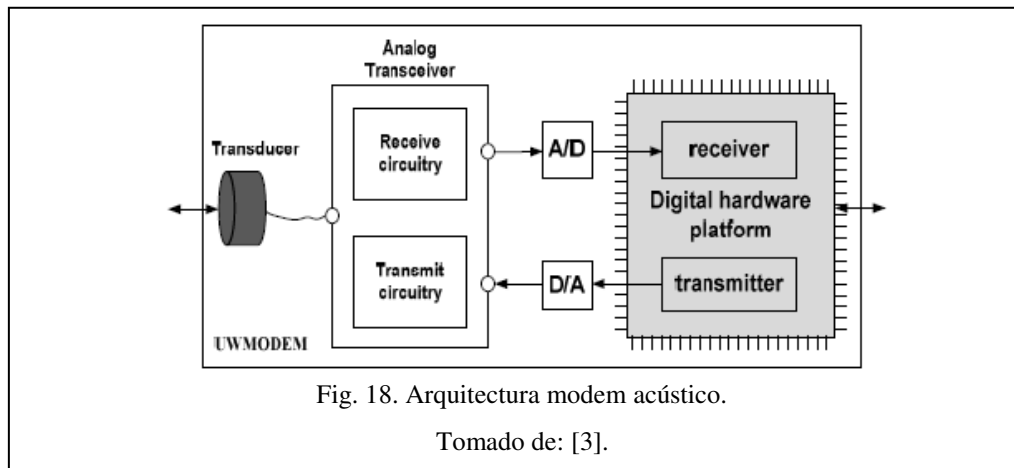
A mediados de los años 80, éste tipo de sensores fueron complementados por buques de vigilancia que operaban con un arreglo de dispositivos remolcados llamado SURTASS (*Surveillance Towed Array Sensor System Low Frequency Active*). Estos sensores enviaban información a través de comunicación satelital a las estaciones SOSUS para analizarlos conjuntamente con la información recolectada del sistema con igual nombre. Posteriormente, se desarrolló otro sistema de monitoreo con conexión a tierra llamado Sistema para Instalación Avanzada ADS, el cual es conformado por sensores acústicos pasivos instalados en el fondo del mar con fines de vigilancia litoral [18].

Otros sistemas de monitorización acústica submarina están diseñados con base a mecanismos sin conexión a tierra para sensores acústicos pasivos. Un dispositivo que opera con esta modalidad es la Sonoboya, la cual posee un hidrófono para captar la energía de las ondas acústicas y un radio transmisor para enviar la información recolectada a una unidad de comando. Otro sistema empleado para efectos de monitorización sin conexión a tierra es el Sistema Autónomo Distribuido DADS, el cual se creó para vigilar aguas someras y se compone de plataformas con hidrófonos fijos que mantienen comunicación entre sí a través de módems acústicos. Mediante estos dispositivos es posible recolectar la información completa de las estaciones de sensores y enviarlas a un centro de comando sin la necesidad de conexiones alámbricas. Otro prototipo de sensor es el AOSN para recolección de datos oceanográficos con propósitos de pronóstico oceánico, modelación numérica, etc. [19].

En la actualidad debido a los avances en telemetría submarina, tecnología vehicular, el desarrollo de redes de sensores y otras aplicaciones que requieren comunicación inalámbrica bajo el agua a grandes distancias, se utilizan frecuentemente los módems acústicos ya que estos instrumentos evitan la complejidad y el costo asociado a las líneas de transmisión [1].

Sin embargo, un impedimento para implementar redes de sensores submarinas es un modem acústico de bajo costo, ya que los módems submarinos comerciales que existen están diseñados para aplicaciones de larga distancia, por lo tanto, [3] diseño un módem acústico subacuático de

bajo costo para redes de sensores de corto alcance que oscilan alrededor de los 100 metros de distancia. Los componentes principales que posee el módem acústico son: un transductor subacuático o transductor piezoeléctrico, un transceptor analógico (preamplificador y amplificador), y una plataforma digital para el control y procesamiento de señales.

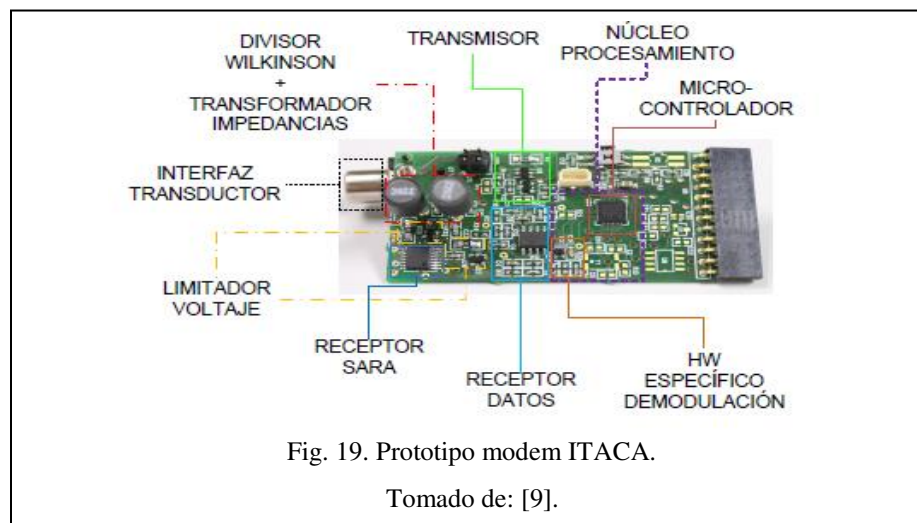


El transductor piezoeléctrico, se seleccionó teniendo en cuenta un patrón de haz omnidireccional y a una frecuencia de resonancia de  $43\text{kHz} \pm 1.5\text{kHz}$ . El transceptor analógico consiste en un transmisor de alta potencia y un receptor altamente sensible, ambos optimizados para operar en el rango de frecuencia de resonancia del transductor. El transmisor es responsable de amplificar la señal modulada desde la plataforma de hardware digital y enviarla al transductor para que pueda ser transmitida a través del agua. El receptor amplifica la señal que es detectada por el transductor para que la plataforma de hardware digital pueda demodular efectivamente la señal y analizar los datos transmitidos. La plataforma digital es la responsable de la comunicación implementando un sistema de procesamiento en banda base que incluye modulación, sincronización, ecualización y filtrado. El esquema de modulación utilizado fue el de la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK por sus siglas en inglés) debido a que es una modulación bastante simple que ha sido ampliamente utilizado en las comunicaciones submarinas debido a su respuesta frente a la propagación de tiempo y frecuencia del canal acústico subacuático.

Sánchez [9], presentó un sistema de transmisión y recepción acústica para redes de sensores inalámbricas subacuáticas en aguas poco profundas. El desarrollo del citado trabajo consiste en el

diseño de la capa física de un módem acústico (ITACA) capaz de integrarse en una Red Acústica Subacuática. Se propone una arquitectura que incluye, un Sistema de Activación de Forma Remota (SARA) logrando comunicación acústica de bajo consumo. De acuerdo con el receptor propuesto, este se activa por medio de una la señal de activación modulada con un desplazamiento en amplitud (ASK).

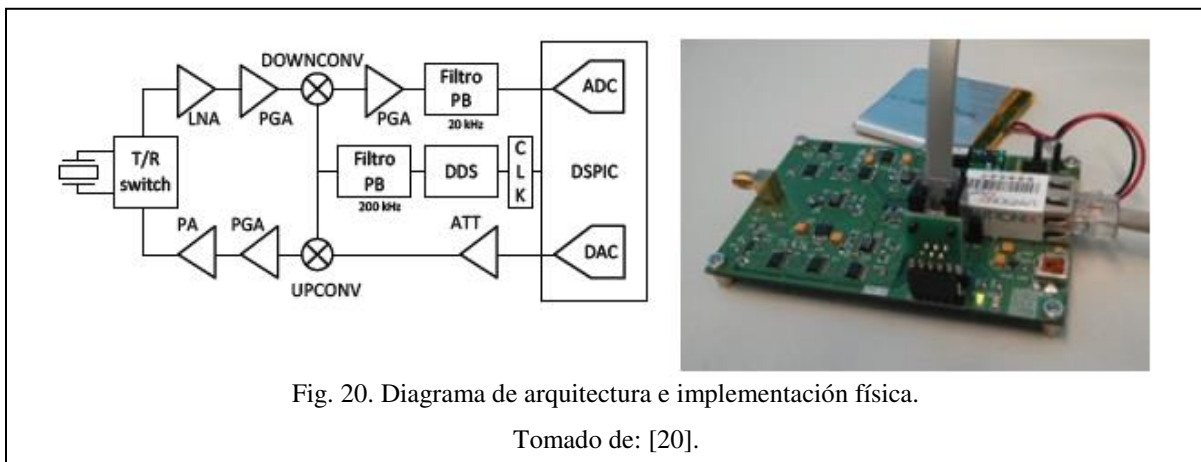
Posteriormente se implementó una metodología de trabajo para el modelado matemático, la simulación y pruebas de campo mediante el entorno de trabajo IUmote. Este entorno utiliza un módem con la arquitectura propuesta y herramientas de simulación y modelos para cada uno de los elementos relacionados con la comunicación como son: canal acústico, transductores, circuitos electrónicos, algoritmos. Por último, se realizó el diseño de los diferentes bloques de la arquitectura fundamental del modem presentado, tomando como base la modulación digital en frecuencia (FSK).



Sarriá [20] , desarrolló un módem acústico que se compone principalmente en su capa física por un microcontrolador que incorpora un procesador digital de señal (DSP) y un par de convertidores, análogo a digital (ADC) y digital a análogo (DAC) para la transmisión y recepción de señal en banda base, y respectivamente por un mezclador análogo que depende de un sintetizador de frecuencia digital, con el cual se obtienen frecuencias de trabajo entre 90 y 200 kHz. El desarrollo

permite ser reprogramado remotamente en dichas frecuencias y trabajar con múltiples modulaciones, soportando multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM).

La implementación de este método lo utilizaron para alcanzar mayores velocidades de comunicación con una menor tasa de error de bit.



Hernández [6], bajo la concepción de crear un prototipo de bajo costo realizó en su tesis de maestría, el diseño y construcción de un transmisor y receptor de señales ultrasónicas con capacidad de detectar bajo el agua señales con una frecuencia de 26 kHz para localización de equipos oceanográficos en profundidades menores a 30 metros.



El diseño se compone de circuitos electrónicos con capacidad de transmisión y recepción de pulsos acústicos, y la codificación de estos pulsos para calcular la distancia entre dos transceptores. Se destaca el uso de componentes electrónicos que se pueden encontrar fácilmente en el mercado. Para el transmisor se utilizó un microcontrolador que genera la señal en el ultrasonido y quien además gobierna tareas que requieren algoritmos de programación, un amplificador de alta ganancia y un transductor piezoeléctrico. Para el receptor, se utilizó igualmente un transductor piezoeléctrico para captar señales acústicas, un circuito amplificador de señales y un circuito de acondicionamiento señal que compara la señal de entrada con una señal de referencia. La señal comparada ingresa por último a un microcontrolador para transmitir una señal de respuesta.

El diseño estructural o carcasa para alojar y proteger los circuitos electrónicos y el transductor piezoeléctrico, se construyó utilizando policloruro de vinilo (PVC) ya que por su economía y la facilidad con que puede ser trabajado, se le suma el hecho de que resultó adecuado para soportar el rigor del medio y la profundidad de trabajo.

Se puede concluir a través del estado de arte presentado, que es posible desarrollar un sistema de comunicación subacuática de bajo costo basado en un emisor-receptor utilizando arquitecturas similares.

## **VII. DESARROLLO DEL PROYECTO**

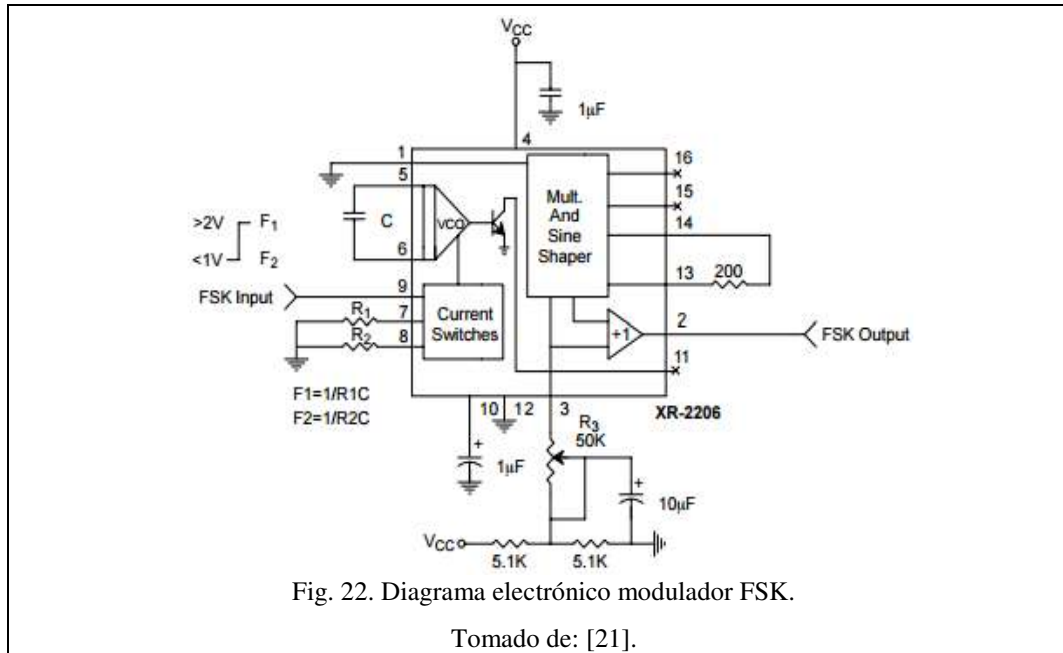
### ***A. Diseño electrónico***

Partiendo de las consideraciones para elaborar un módem acústico de costo moderado y teniendo como base el uso de un transductor piezoeléctrico, el cual será capaz de transmitir o más eficientemente alrededor de los 20 a 40 kHz (en el ultrasonido), se realizó la implementación de circuitos electrónicos para la modulación y respectiva demodulación para las técnicas de FSK y ASK. Para el caso particular de este proyecto se encontró que cada uno tiene diferentes etapas de procesamiento de señal.

#### ***1) Diseño de Circuito Electrónico para Modulación FSK***

Para este tipo de modulación se utilizó el circuito integrado XR2206, esta referencia se encuentra disponible en el mercado local a costo moderado y es utilizada en diferentes configuraciones en aplicaciones de comunicaciones. Las formas de onda de salida pueden ser de amplitud como de frecuencia moduladas por un voltaje externo. La frecuencia de operación se puede seleccionar en un rango de 0.001Hz hasta 1MHz.

Para implementar un circuito modulador mediante la técnica por desplazamiento de frecuencia (FSK) a través del circuito integrado XR2206, se necesita conocer en detalle el diagrama de conexión sugerido y proporcionado por el fabricante además de las características físicas del dispositivo. El dispositivo XR2206 se puede utilizar como un modulador de desplazamiento de frecuencia implementando el diagrama de conexión que se muestra continuación:



Las dos resistencias, R1 y R2 conectadas a los pines 7 y 8, definen junto al condensador C, las frecuencias de marca ( $f_m$ ) y de espacio ( $f_s$ ). El dispositivo XR 2206 puede ser operado mediante las resistencias de cronometraje R1 y R2 que se encuentran conectadas a los pines 7 y 8. Dependiendo de la polaridad de la señal digital de entrada en el pin 9 una de los dos pines 7 u 8 es activado. Es decir, si el pin 9 está en circuito abierto o se alimenta con un voltaje mayor o igual a 2 voltios, entonces solo R1 se activa. Así mismo si el pin 9 se alimenta con un voltaje menor o igual a 1 voltio entonces solo R2 se activa. De esta manera el dispositivo va a trabajar entre los valores de frecuencia ( $f_m$ ) y ( $f_s$ ) definidas como:

$$f_m = \frac{1}{R1 * C} \quad (13)$$

$$f_s = \frac{1}{R2 * C} \quad (14)$$

La figura 23 muestra la señal generada o modulada mediante el circuito modulador con el XR2206. Para nuestro caso de interés se eligió una frecuencia de trabajo de 30 KHz para la frecuencia de



marca y de 25 KHz para la frecuencia de espacio, inyectándole a la entrada del circuito una señal cuadrada de 12 Hz y un voltaje pico de 4.1 voltios por medio de un generador de señales.

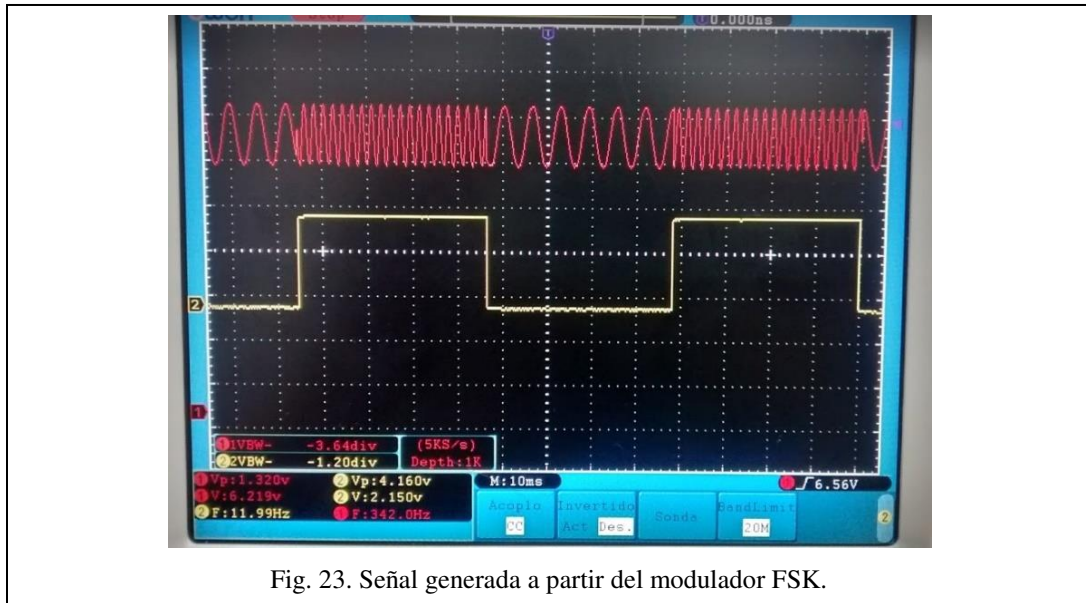
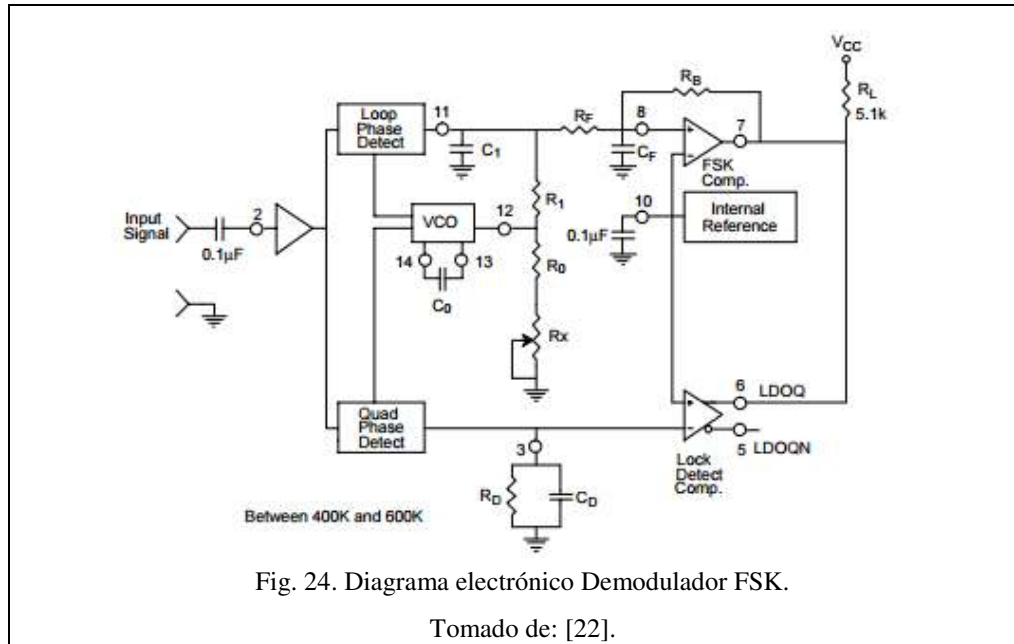


Fig. 23. Señal generada a partir del modulador FSK.

Principalmente se buscó, como punto de partida, simplemente modular y demodular una señal digital por un medio cableado de forma experimental, obteniendo buen resultado en las dos técnicas.

## 2) Diseño de Circuito electrónico para Demodulación FSK

La figura 24 muestra el diagrama de conexión para el demodulador FSK. Para este circuito electrónico se utilizó el circuito integrado XR 2211 el cual es un demodulador que cuenta con un sistema de bucle de enganche de fase (PLL) para rastrear una señal de entrada dentro de la banda de paso, un detector de fase en cuadratura que facilita la detección de portadora y un comparador de tensión FSK que facilita la demodulación FSK.



De acuerdo al diagrama anterior se presentan los parámetros de diseño establecidos por el fabricante, la resistencia  $R_0$  y el capacitor  $C_0$  ajustan la frecuencia central del PLL y se definen por:

$$f_0 = \sqrt{f_1 * f_2} \quad (15)$$

$$R_0 = R_0 + \frac{R_x}{2} \quad (16)$$

$$C_0 = \frac{1}{R_0 * f_0} \quad (17)$$

$R_0$  puede estar en el rango de 10  $K\Omega$  A 100  $K\Omega$ , pero el valor recomendado es 20  $K\Omega$ . El valor final de  $R_0$  es normalmente ajustado con el potenciómetro de la serie con  $R_X$ .

la resistencia  $R_1$  establece el ancho de banda del sistema y el capacitor  $C_1$  establece la constante de tiempo del filtro y el factor de amortiguación.

$$R1 = \frac{Ro * fo}{(f1 - f2)} * 2 \quad (18)$$

$$C1 = \frac{1250 * Co}{R1 * \varsigma^2} \quad (19)$$

Dónde:

$$\varsigma = \sqrt{\left(\frac{1250 * Co}{R1 * C1}\right)} \quad (20)$$

El capacitor CF y la resistencia RF forman un filtro de detección para la salida de datos FSK.

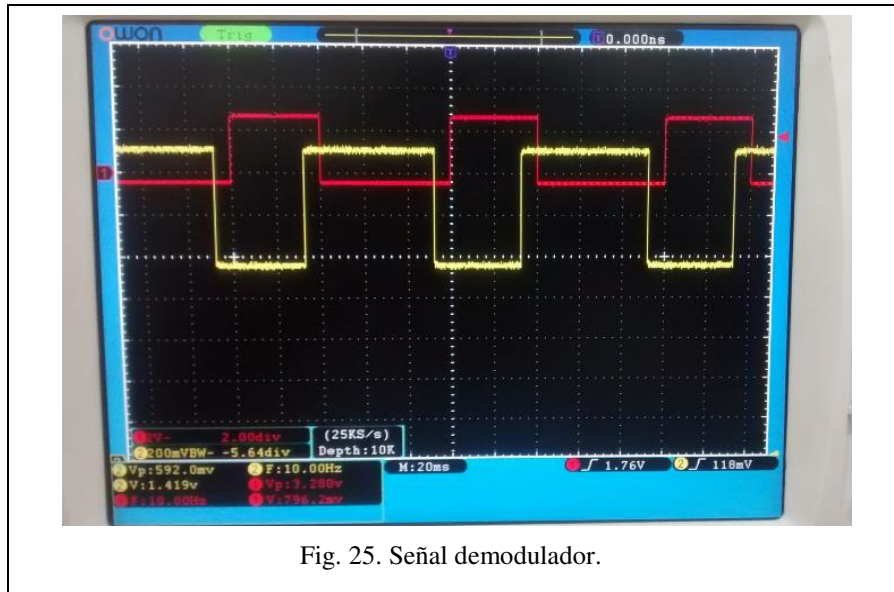
$$Rsum = \frac{(Rf + R2) * RB}{(R1 + RF + RB)} \quad (21)$$

$$CF = \frac{0.25}{(Rsum * Baud Rate)} \quad (22)$$

La resistencia RB inyecta una retroalimentación positiva a través del comparador FSK para facilitar la transición rápida entre estados lógicos de salida.

$$RB = 5 * R1 \quad (23)$$

La figura 25 muestra la señal demodulada mediante el circuito demodulador XR 2211 a el cual, se le inyectó en su entrada la señal modulada en frecuencia proveniente del circuito modulador FSK con el circuito integrado XR2206, con una señal modulante de 10 Hz y un voltaje pico de 3.2 voltios por medio de un generador de señales.



Podemos observar además que se detectó con éxito la señal origen o señal modulante al pasar o ser detectada por el circuito demodulador, conservándose la frecuencia, pero con un voltaje en el orden de los milivoltios y desfasada en el tiempo. resultado que es normal en este tipo de circuitos.

### 3) Prueba de velocidad ideal para la transmisión de datos

Para efectos de experimentación se exploraron algunas velocidades de transmisión y se verificó su resultado para las técnicas ASK y FSK.

**TABLA IV. COMPARACIÓN DE ALGUNAS DE VELOCIDADES.**

Técnica	Baud Rate	Resultados
FSK	1200	No satisfactorios
FSK	600	Satisfactorios con pérdidas de información
FSK	300	Satisfactorios
ASK	1200	Satisfactorios con pérdidas de información
ASK	600	Satisfactorios
ASK	300	Satisfactorios

Para las pruebas de laboratorio, desde la configuración del microcontrolador en su programación se cambiaron los registros correspondientes de manejar la velocidad de transmisión de datos de 300bps y 600bps, enviando el mismo carácter y tomando su tiempo de transmisión. Normalmente los sistemas que utilizan técnicas de demodulación no-coherente manejan tasas de transferencia baja, es así que consideramos hacer el envío de datos a 300 bps por hacer más fácil la detección de las señales en el receptor.

**TABLA V. COMPARACIÓN DE ALGUNOS DE VELOCIDADES Y TIEMPOS PARA LOS BITS Y PARA LOS CARACTERES**

<b>Tasa de transmisión</b>	<b>600 bps</b>	<b>300bps</b>
Longitud del carácter: 8 bits (codificación ASCII)	Tiempo bit =1.68ms Tiempo carácter=15.12ms Caracteres= 9 un bit de inicio	Tiempo de bit=3.3ms Tiempo carácter=26.4ms Caracteres= 8 un bit de inicio

### ***B. Pruebas de circuito de electrónicos de las técnicas FSK Y ASK por medio cableado***

En las pruebas de laboratorio hechos en la tarjeta de prueba (protoboard) se pasó por varias etapas para llegar al circuito final, el circuito debe ser capaz de detectar señales con frecuencias de 25 y 30 kHz enviadas por emisor. A continuación, explicaremos cada una de las etapas, los resultados del diseño y la construcción de los circuitos electrónicos finales.

#### ***1) Primera etapa de construcción de los circuitos electrónicos***

Como una primera prueba de laboratorio, se tomó una señal cuadrada desde un generador para ingresarla al modulador, después se pasa directamente por medio cableado por el demodulador y, finalmente, la señal es observada con el osciloscopio para compararla con la señal generada.

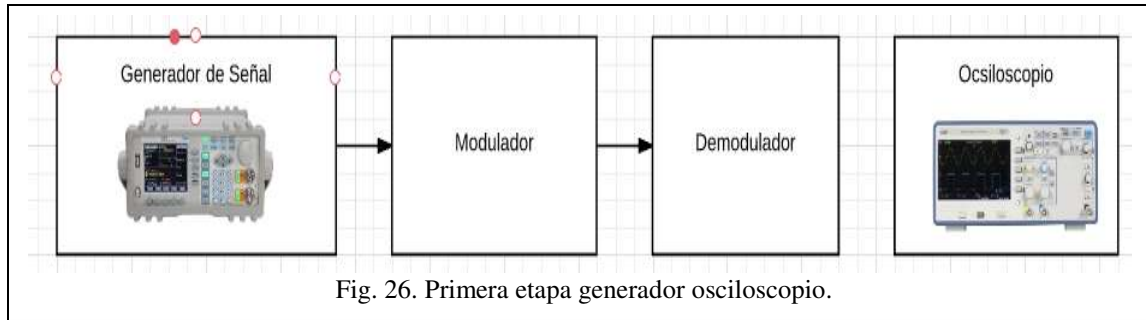


Fig. 26. Primera etapa generador osciloscopio.

En la figura 27 se muestra la señal enviada por el modulador y recuperada por el demodulador, al tratarse de una prueba se envió una señal periódica que correspondería a una secuencia fija de unos y ceros.

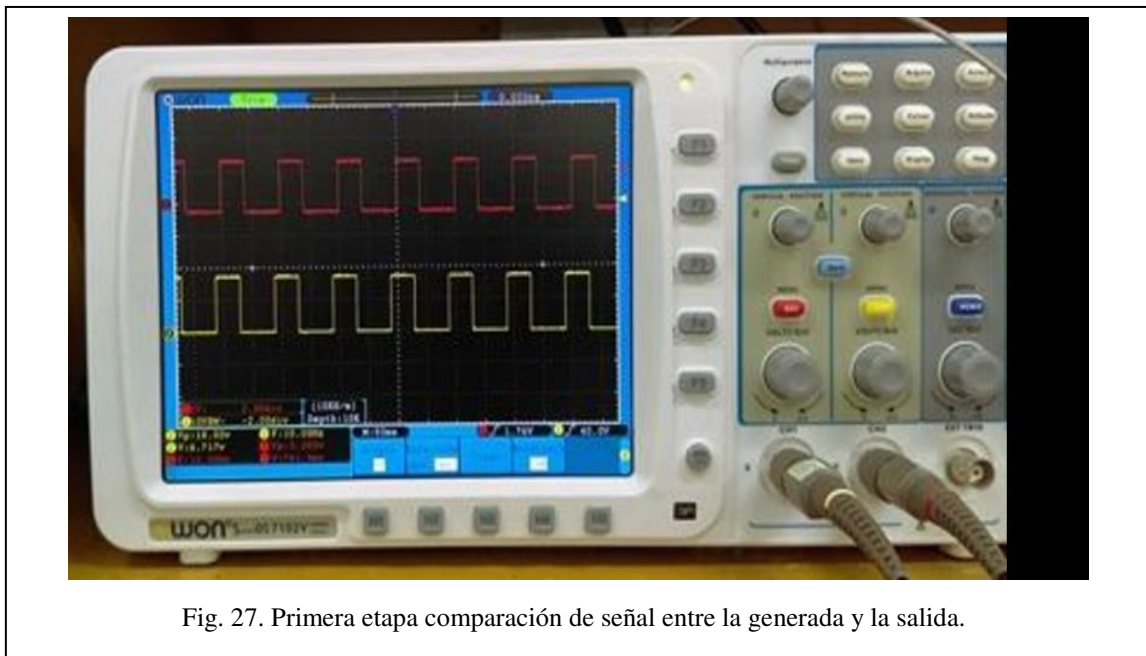
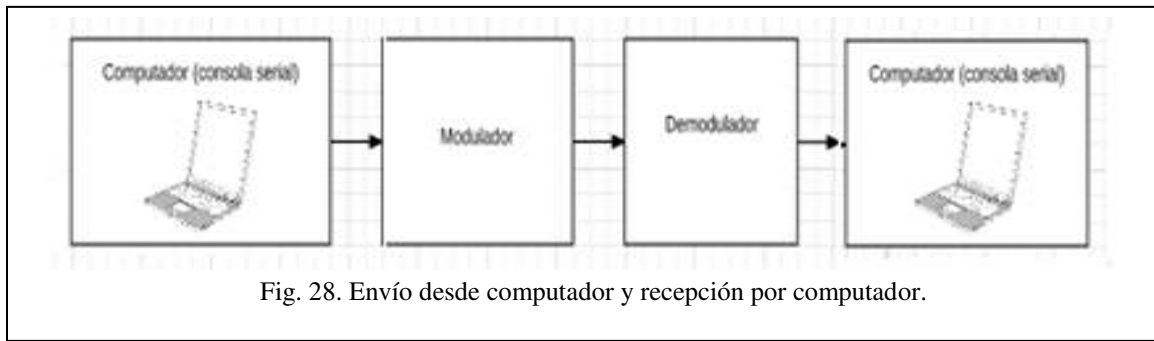


Fig. 27. Primera etapa comparación de señal entre la generada y la salida.

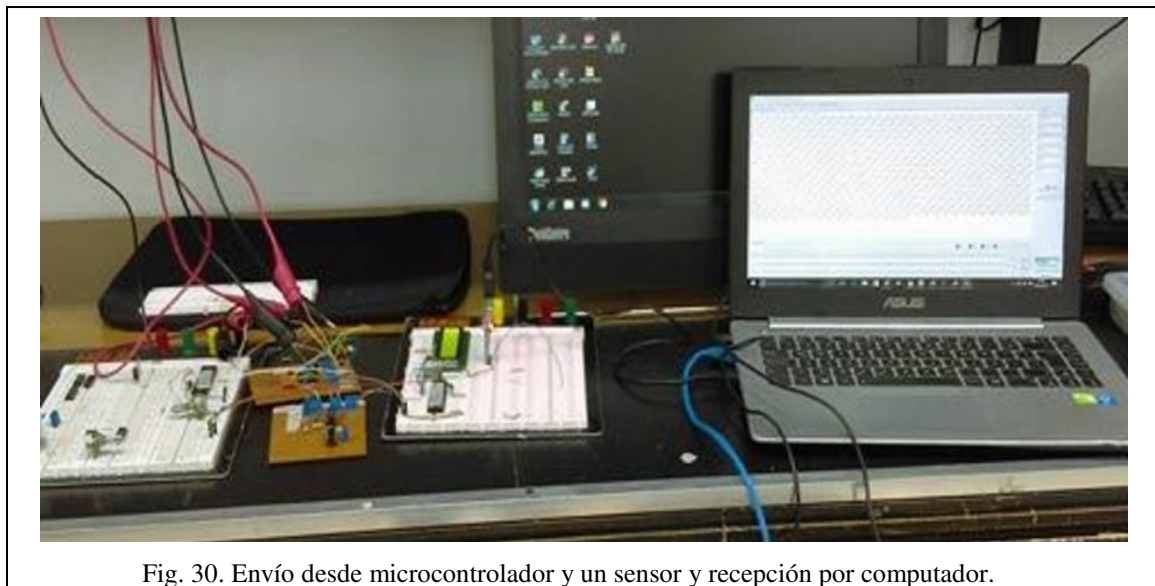
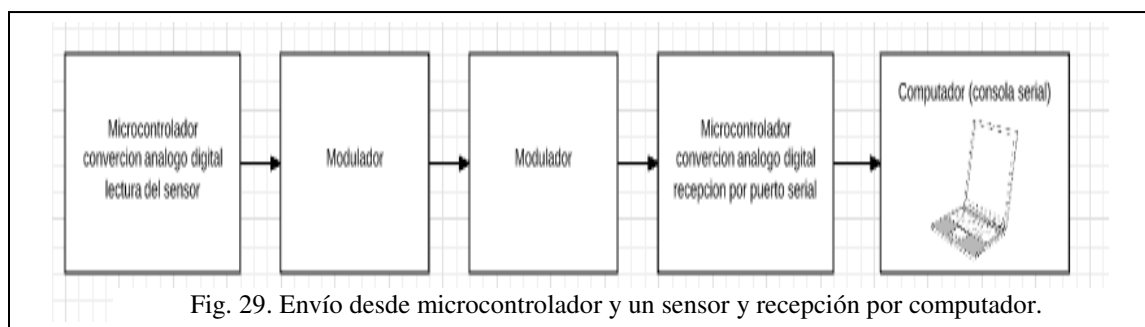
## 2) Segunda etapa de construcción de los circuitos electrónicos

Con el fin de suprimir el generador de señales, para esta etapa se integró un computador en el lado de la transmisión, los datos seriales se ingresaron al modulador utilizando un conversor serial-USB, en el lado de la recepción los datos se pasaron a otro computador, nuevamente con un módulo serial-USB para visualizarlos en un puerto virtual en un software llamado Hércules que funciona como consola serial.



### 3) Tercera etapa de construcción de los circuitos electrónicos

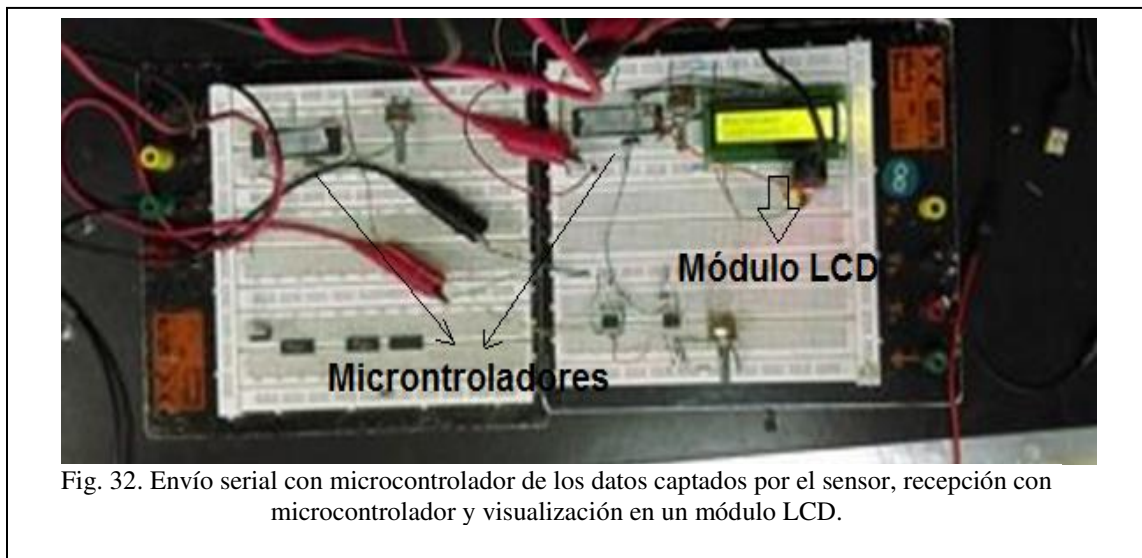
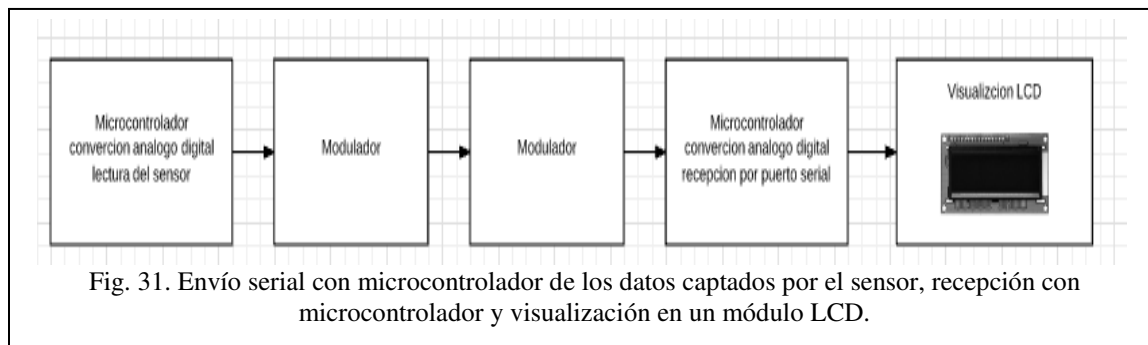
Para esta etapa se integró un sensor en el lado del transmisor, un microcontrolador realiza la conversión análoga-digital y la transmisión serial del voltaje, los datos se pasan al modulador, luego al demodulador y finalmente la visualización se realiza nuevamente en un computador como se describió anteriormente.





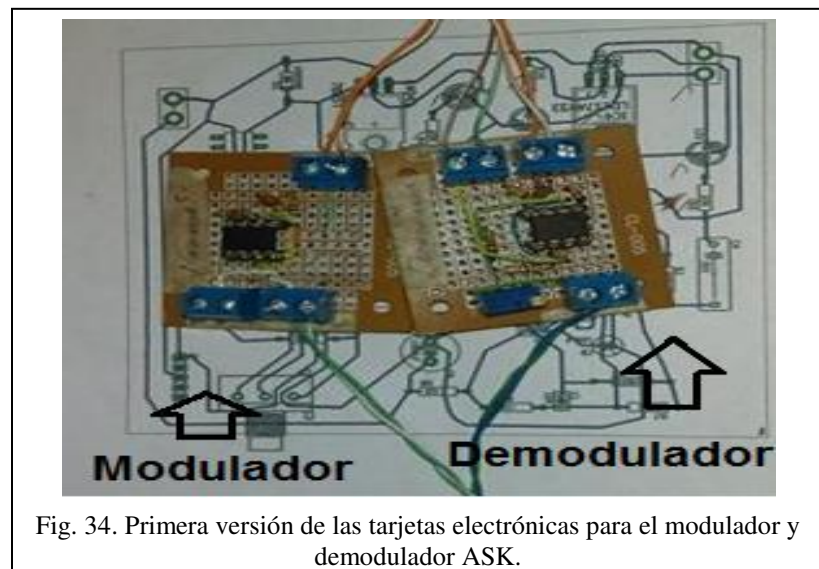
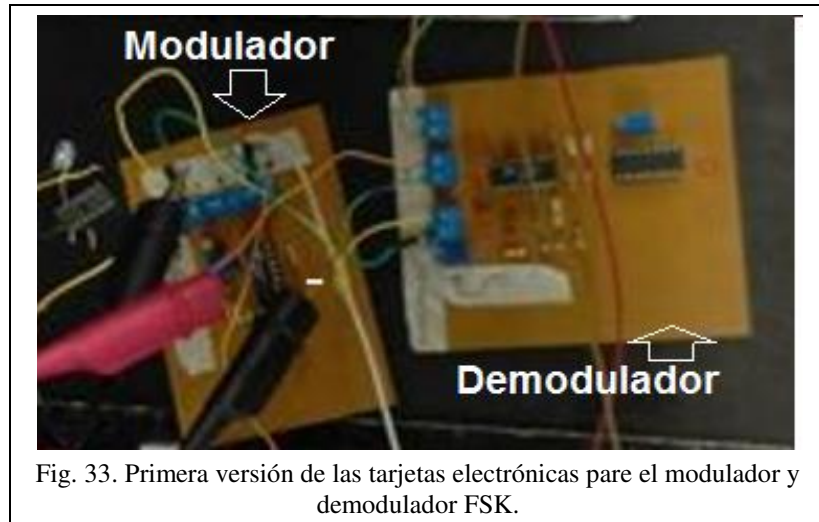
#### 4) Cuarta etapa de construcción de los circuitos electrónicos

Luego, con el fin de suprimir el uso de computadores durante las pruebas, en el lado del receptor se incorporó un módulo LCD para tener un poco de autonomía en la visualización de cara al desarrollo de un prototipo que permita fácil desplazamiento. También se incorporó alimentación con baterías para el circuito electrónico.



Después de probar las etapas de modulación y demodulación funcionando, tanto para la técnica de FSK como la de ASK, se procedió a pasar los circuitos a tarjetas electrónicas impresas (PCB: *Printed Circuit Boards*), esto con el fin de avanzar hacia la construcción de un prototipo y favorecer el desplazamiento con dichos elementos para realizar pruebas.





### ***C. Fabricación de la carcasa mediante impresión 3D***

Para continuar con las etapas planteadas para realizar este proyecto, y buscando mantener un costo moderado, con ayuda del estudiante Andrés Ríos del Semillero de Investigación en Sistemas de Comunicaciones y Desarrollo de Dispositivos Electrónicos SCYDDE, se imprimió la carcasa en una impresora 3D (de referencia Prusa-Tairona) que posee la Universidad.

Como se describió anteriormente, hacer una *housing* o carcasa es necesario para sumergir el piezoeléctrico de nuestro emisor acústico y también para explorar su hermeticidad. Después de realizar varias pruebas, se evidenció que algunas veces se filtraba agua, para contrarrestar esto se procedió a recubrirlo con un esmalte para piezas 3D.

La impresora utiliza el software llamado *Repetier* para cargar los modelos y comandar la impresión. El material de impresión es Acrilonitrilo Butadieno Estireno -ABS. Este material es de un costo razonable y se encuentra disponible en el mercado local. La figura 28 muestra una vista del modelo de impresión de la carcasa.

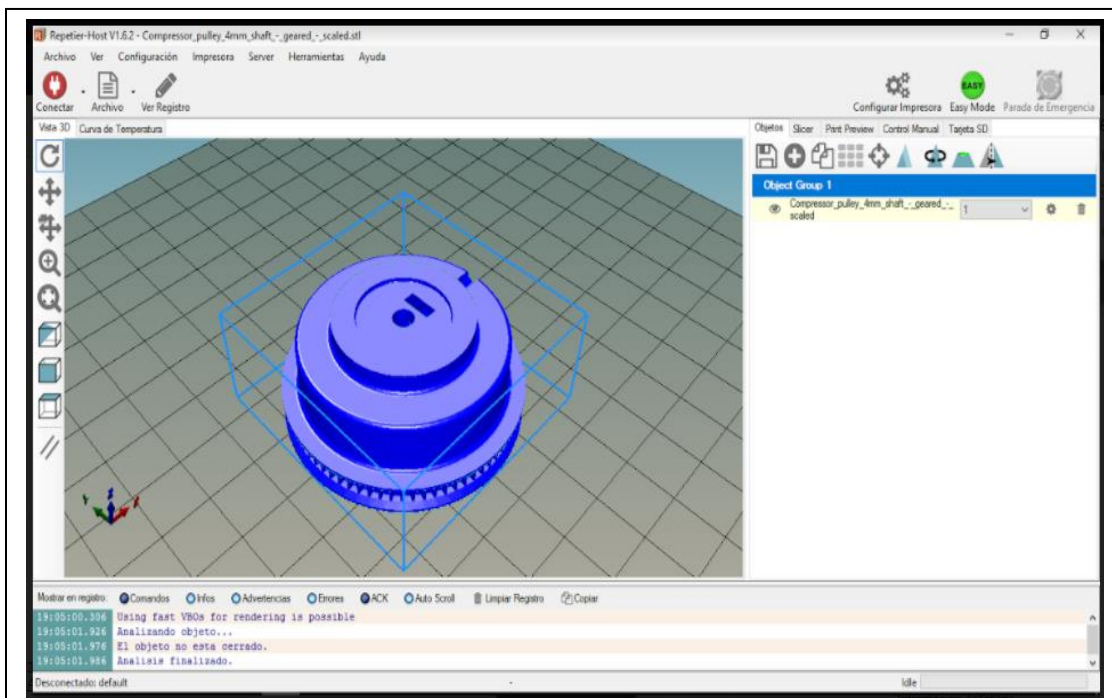


Fig. 35. Software para la impresora 3D Repetier, Housing o carcasa.

Por la necesidad que sea una pieza hermética, se imprime con alta calidad en velocidad baja, esto requiere de mucho tiempo de construcción, para el caso específico el tiempo fue de aproximadamente 10 horas.

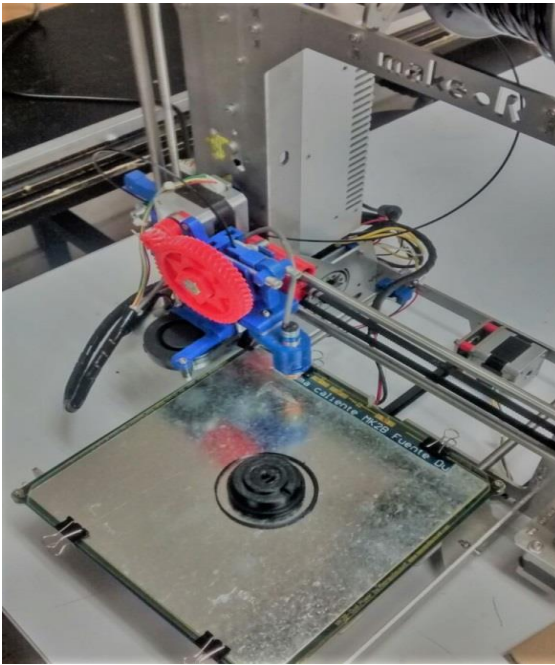


Fig. 36. Impresión del Housing o carcasa con la impresora 3D.

La pieza final tiene una parte acrílica transparente, llamada ventana acústica. Todas las partes son ensambladas con tornillos de unión para facilitar el acceso al transductor piezoeléctrico.



Fig. 37. Housing o carcasa en 3D.

### ***D. Transmisión utilizando modulación FSK***

En esta forma de modulación la portadora sinusoidal toma dos valores de frecuencia, para este proyecto utilizamos 25 y 30 KHz determinados directamente por la señal de datos binaria.

A continuación, se describe en un diagrama de bloques, todo el acondicionamiento de la señal enviada al medio acuático.

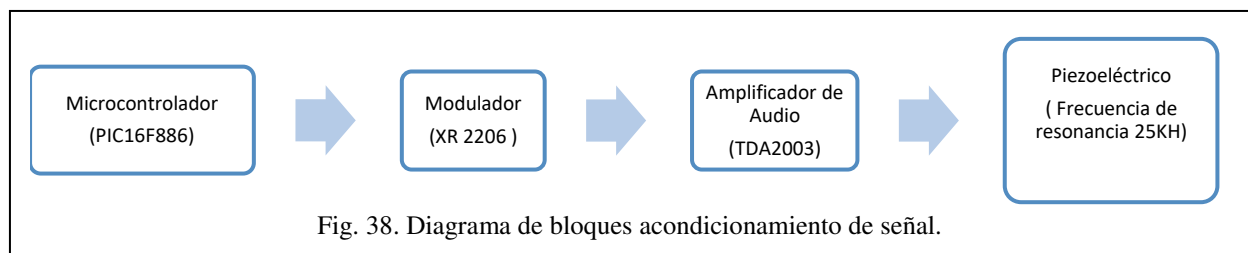
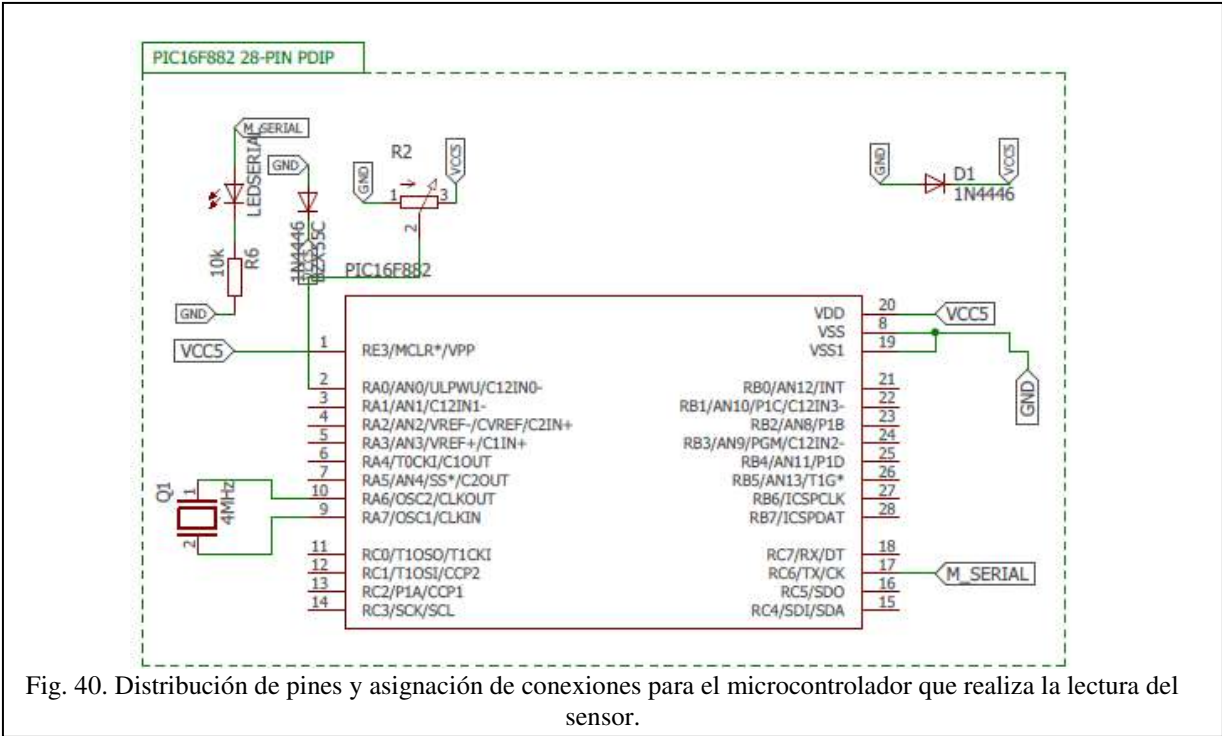
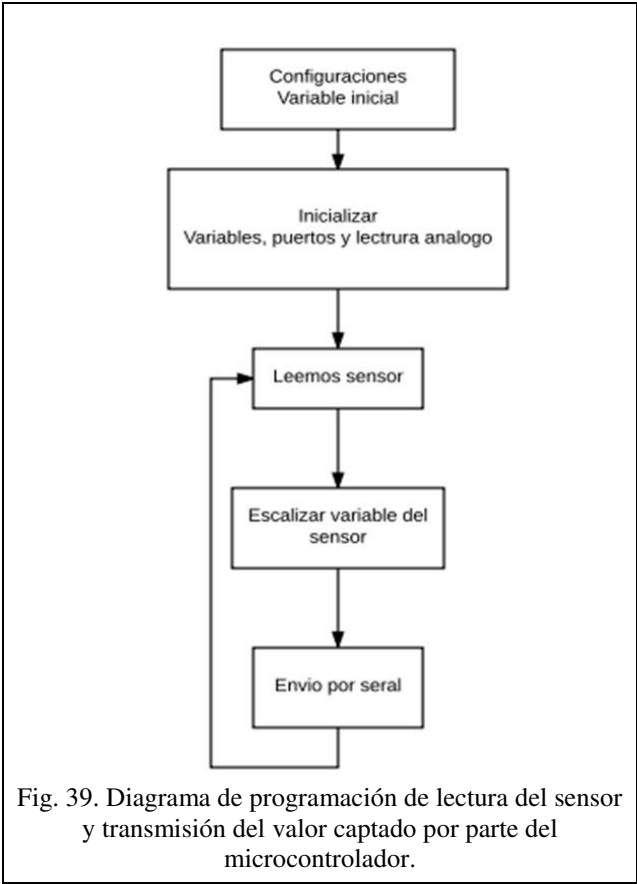


Fig. 38. Diagrama de bloques acondicionamiento de señal.

#### ***1) Microcontrolador***

El microcontrolador seleccionado para este trabajo es el PIC16f886 del fabricante Microchip. Este microcontrolador de 8 bits, cuenta con 256 bytes de memoria EEPROM de datos, 2 comparadores, 28 pines de conexión, 11 canales de 10 bits de analógico a digital (A / D), entre otras características.

Para las pruebas con el modulador, se requiere una señal experimental para la cual se configura el microcontrolador pic16F886 como un conversor analógico digital para leer las variables de un potenciómetro, con el que se obtienen variaciones de voltaje de cero a cinco voltios. Como resultado se obtuvo la generación de una señal cuadrada (TTL) en un pin de puerto de salida del microcontrolador. como se muestra en la Figura 41.



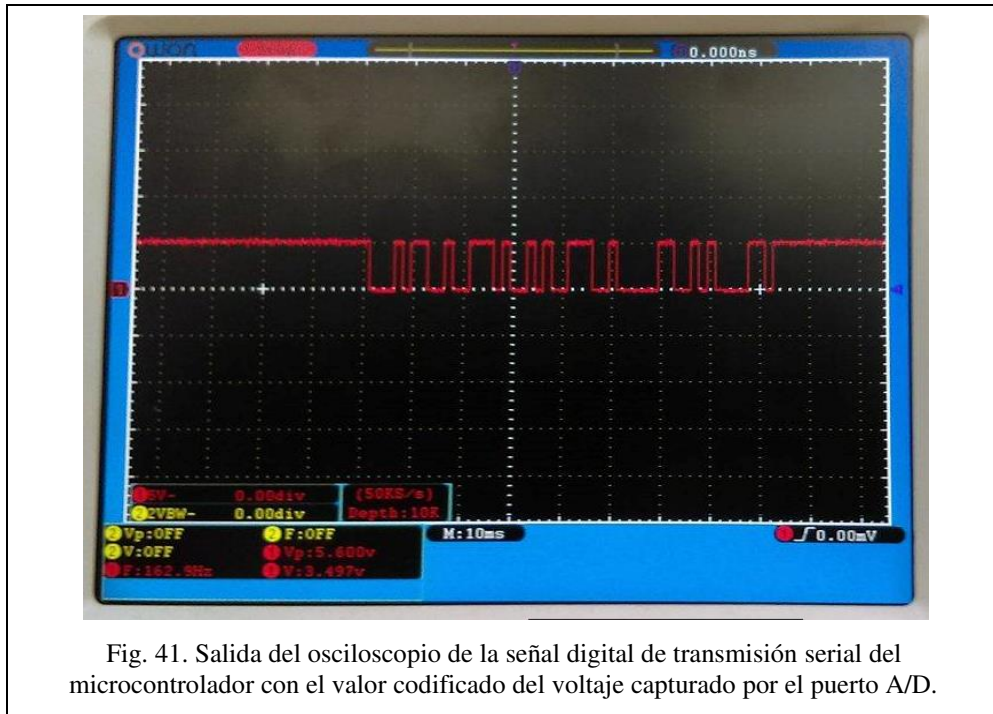


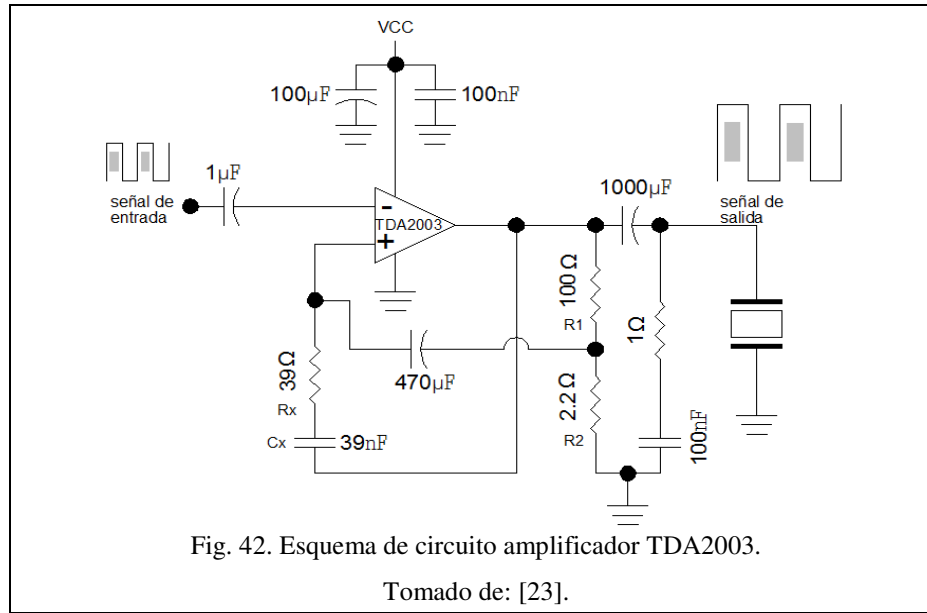
Fig. 41. Salida del osciloscopio de la señal digital de transmisión serial del microcontrolador con el valor codificado del voltaje capturado por el puerto A/D.

## 2) Etapa del amplificador de potencia.

Una vez que se logró transmitir la señal ultrasónica, pasándola por el modulador, el paso siguiente es darle una mayor distancia, dado que la señal inicialmente es de pequeña corriente. La solución es amplificar la potencia, esto se hace comúnmente en modem acústicos subacuáticos. Teniendo en cuenta que las ondas sonoras y de ultrasonido se propagan con mayor rapidez y menor pérdida de energía en el agua que en el aire, con una amplificación se puede lograr una mayor distancia de transmisión.

Se buscó un circuito de potencia que fuera eficiente y adecuado para este proyecto. En este sentido, con base en la revisión de la literatura, se encontró un circuito que se ajustaba a nuestras necesidades que está basado en el circuito integrado de referencia TDA 2003 (figura 42). Este amplificador puede proporcionar una potencia de salida nominal de 6W eficaces con un ancho de banda de hasta 15000 Hz, sin embargo, ha mostrado desempeñarse bien en proyectos similares al nuestro. El TDA2003 viene en un encapsulado llamado *Pentawatt* y está diseñado para funcionar con una alimentación simple.





La tensión de alimentación (VCC) del TDA2003 es de 12 V, aunque puede funcionar con una alimentación de 8 a 18 V. La componente de corriente continua de la señal de entrada se filtra a través del capacitor de 1μF, luego se ingresa al amplificador operacional por la entrada no inversora. En la salida del TDA2003, se toma una parte de la señal a través del capacitor de 470μF y la resistencia de 100 Ω para realimentar el sistema por medio de la entrada inversora. A la señal de salida también se le quita la componente de corriente continua, pero por medio del capacitor de 1000μF. Los valores de  $C_x$  pueden variar de acuerdo a la Ecuación (24). El valor de  $C_x$  es importante porque depende del ancho de banda de frecuencia para el amplificador, B. Los valores de  $R_2$  y  $R_1$  se muestran en el diagrama de la Figura 42.

$$R_x = 20 * R_2; C_x = \frac{1}{2\pi * B * R_1} \quad (24)$$

Para  $R_2 = 2.2\Omega$ ,  $R_x = 20(2.2) = 44\Omega$ , un valor comercial cercano es de 39 Ω. En este trabajo se utilizó este valor comercial. En el cálculo de  $C_x$  se empleó  $B = 40\text{kHz}$ , por lo tanto,  $C_x = 39\text{nF}$ .

La utilización del amplificador de potencia TDA 2003 en el circuito integrado requiere colocar un disipador de calor, de lo contrario se puede quemar. El armado del circuito también requiere distribuir los

componentes cuidadosamente, de manera que la salida no esté muy cerca de la entrada para evitar ruido electrónico.

El circuito de la figura 42 se montó en una *protoboard* y se midió la señal de salida por medio del osciloscopio. Se encontró que, dependiendo de la alimentación, la amplitud de salida de la señal varía de 9 a 12 V pico. La señal presentó una ligera distorsión debido a la amplitud de la señal de entrada del microcontrolador; sin embargo, no interfiere con la operación del circuito. Se midió el consumo de corriente cuando transmite, el cual fue de 2 mA. En contraste, el consumo de corriente cuando no transmite es de 120 mA. Se verificó que cuando no hay señal de entrada en el circuito tampoco hay señal en la salida del amplificador, por lo que no se presentó consumo de energía durante el lapso en que no se genera señal. En el diseño final de la tarjeta de circuitos se utilizó el amplificador de potencia TDA 2003.

### 3) *Transductor piezoeléctrico*

Tenemos el traductor, tal vez es la parte más crítica e importante en la construcción del trasmisor acústico. La frecuencia de la señal acústica, el patrón de la señal de emisión y la potencia a emplear dependen de parámetros que se definen de acuerdo a las características del transductor.

Nuestro piezoeléctrico a emplear es de 25 kHz, es decir, en el rango del ultrasonido. Se utiliza un patrón direccional entre el trasmisor y el hidrófono, buscando que estén alineados para mayor eficiencia como lo muestra la figura 43.

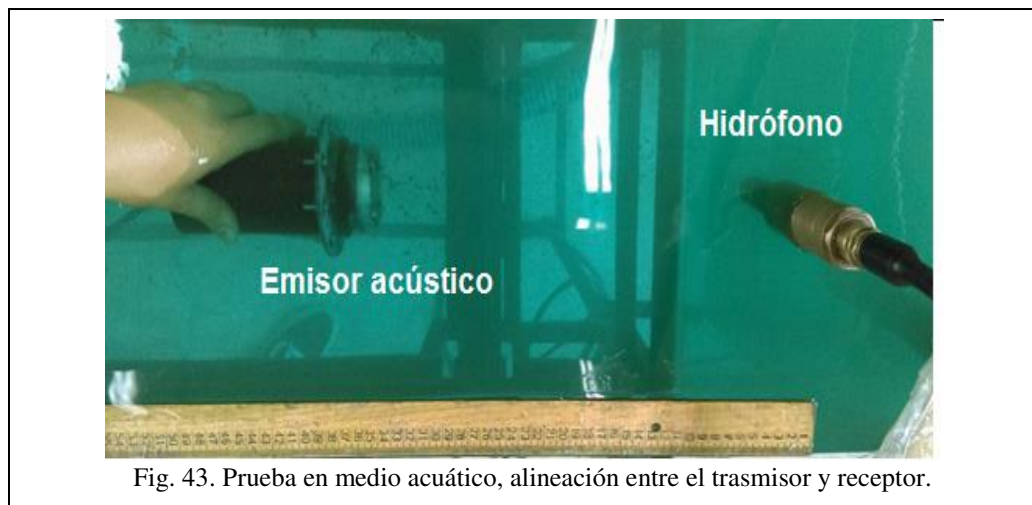
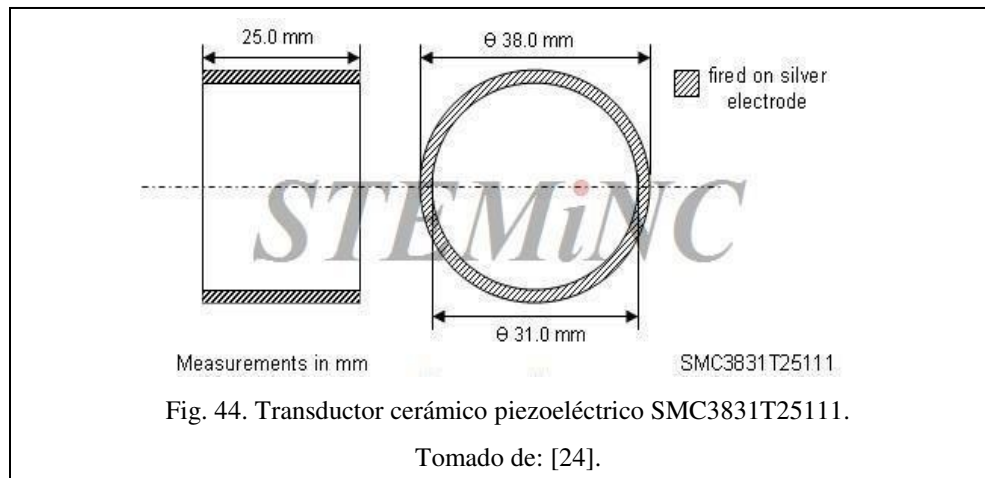


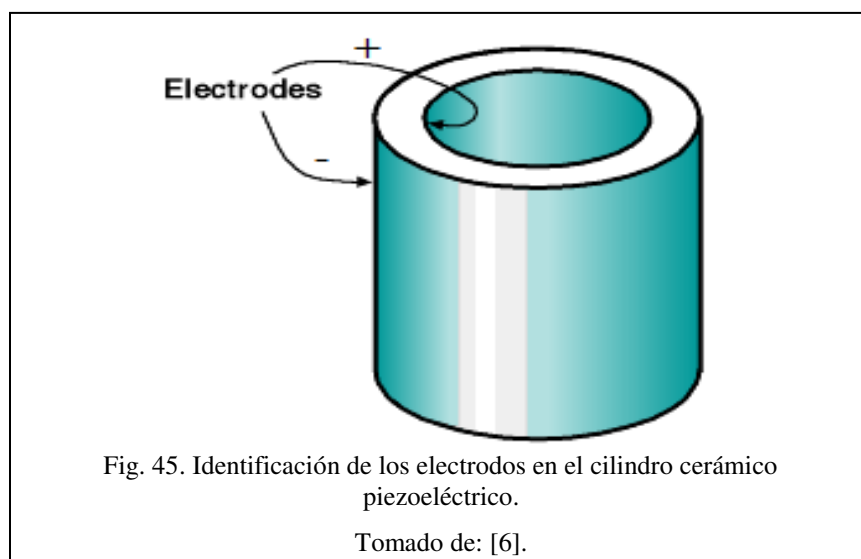
Fig. 43. Prueba en medio acuático, alineación entre el trasmisor y receptor.



El transductor piezoeléctrico utilizado tiene como referencia SMC3831T25111 tal y como se muestra en la figura 44. Las dimensiones del transductor son 38x31x25 mm y su frecuencia de resonancia es de  $25 \text{ KHz} \pm 1 \text{ KHz}$ .

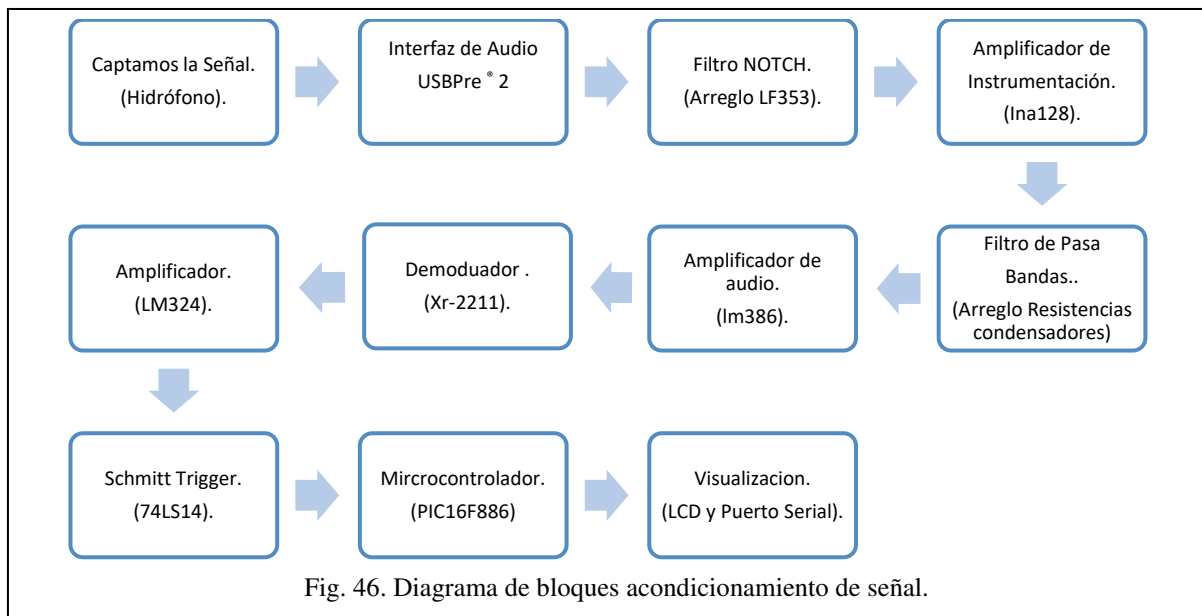


Las aplicaciones potenciales de dicho transductor son: comunicación submarina, sensor de vibraciones, sensor de presión, generador de vibraciones, y repelente de animales ultrasónico entre otras. El transductor cuenta con un modo de vibración radial y para utilizarlo se tienen que conectar dos cables: uno para su terminal positivo y uno para el negativo. Dichas terminales se denominan electrodos, los cuales son plateados y el interior corresponde al positivo (Figura 45).



### ***E. Detección de la señal FSK***

A continuación, se describe en un diagrama de bloques todo el acondicionamiento de señal recibida después de enviarla por el medio acuático.



#### ***1) Captación de la señal desde el hidrófono Reson TC4032***

Con la necesidad de tener una buena recepción de nuestra señal emitida usamos un hidrófono, que es un transductor de sonido a electricidad para ser usado en agua o en otro líquido, de forma análoga al uso de un micrófono en el aire.

En nuestro caso particular, usamos el hidrófono ResonTC4032 con el cual cuenta la universidad de San Buenaventura sede Medellín, este dispositivo ofrece una alta sensibilidad, bajo ruido y una respuesta de frecuencia plana en un amplio ancho de banda. Sus características (Tabla 6) de operación se ajustan a nuestro requerimiento, ya que el traductor piezoeléctrico utilizado tiene su punto de operación ideal alrededor de los 30KHz.

## 2) Especificaciones técnicas del Hidrófono.

De acuerdo con los datos del fabricante, el hidrófono tiene estas características:

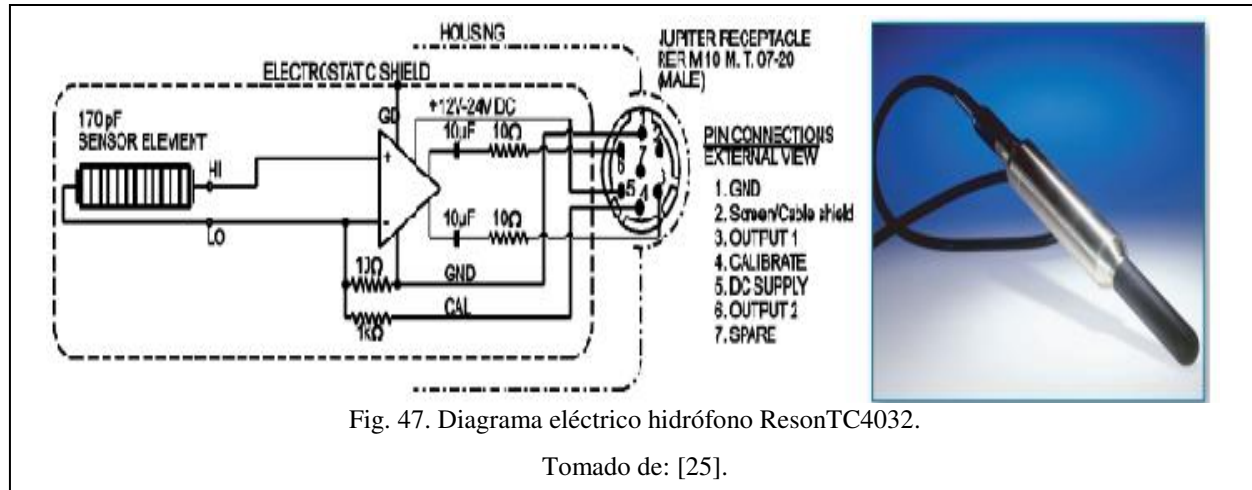
- Bajo rendimiento de ruido
- Alta sensibilidad
- Amplio rango de frecuencias
- Respuesta de frecuencia plana
- Estabilidad a largo plazo
- Calibrado individualmente

La tabla muestra con mayor detalle las especificaciones técnicas.

**TABLA VI. ESPECIFICACIONES TECNICAS HIDRÓFONO RESON TC4032.**

Usable Frequency range:	5Hz to 120kHz
Linear Frequency range:	15Hz to 40kHz $\pm 2$ dB 10Hz to 80kHz $\pm 2.5$ dB
Receiving Sensitivity:	-170dB re 1V/ $\mu$ Pa (-164dB with differential output)
Horizontal directivity:	Omnidirectional $\pm 2$ dB at 100kHz
Vertical directivity:	270° $\pm 2$ dB at 15kHz
Operating depth:	600m
Survival depth:	700m
Operating temperature range:	-2°C to +55°C
Storage temperature range:	-30°C to +70°C
Weight (in air):	720g without cable
Max. output voltage:	$\geq 3.5$ Vrms (at 12VDC)
Preamplifier gain:	10dB
Supply voltage:	12 to 24VDC
High pass filter:	7Hz -3dB
Quiescent supply current:	$\leq 19$ mA at 12VDC $\leq 22$ mA at 24VDC
Encapsulating material:	Special formulated NBR
Housing material:	Alu Bronze AlCu10Ni5Fe4

Nota: [25].



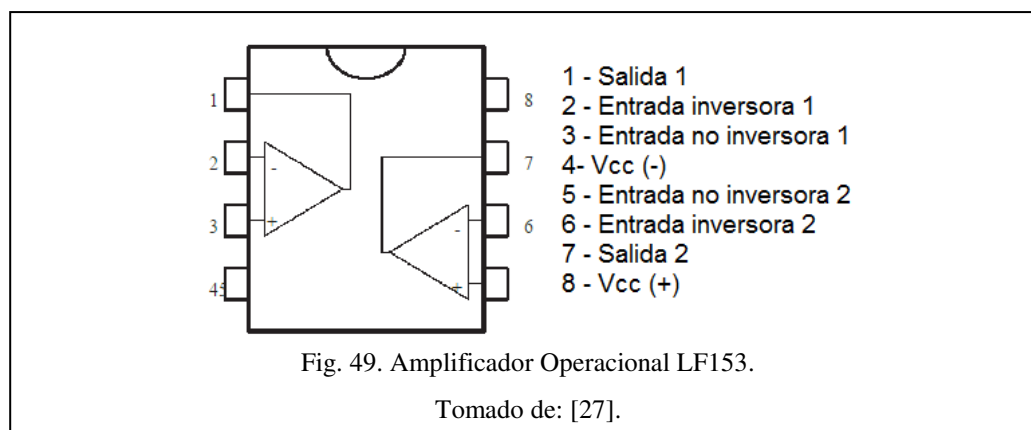
### 3) Interfaz de AudioUSBPre 2

Para acondicionar la señal entregada por el hidrófono, se utilizó un dispositivo de sonido de referencia USBPre 2 que posee una alta resolución, interfaz de hardware portátil para Mac y audio digital basado en Windows. El USBPre 2 permite conectar micrófonos profesionales, fuentes de nivel de línea, electrónica de consumo de audio, y las fuentes digitales S/PDIF con computadores Mac OS y Windows a través de USB.



#### 4) Diseño del filtro tipo notch

En diferentes pruebas de laboratorio, se observó la interferencia de una componente de 60Hz sobre las señales captadas, por lo tanto, se optó por la implementación de un filtro para rechazar específicamente esta frecuencia. Para esta etapa se utilizó el amplificador operacional LF353 que es dual, de bajo consumo de energía, tiene compensación de frecuencia interna, alta impedancia a la entrada J-FET, velocidad de respuesta. La configuración interna se muestra en la Figura 49.



#### 5) Amplificador de instrumentación

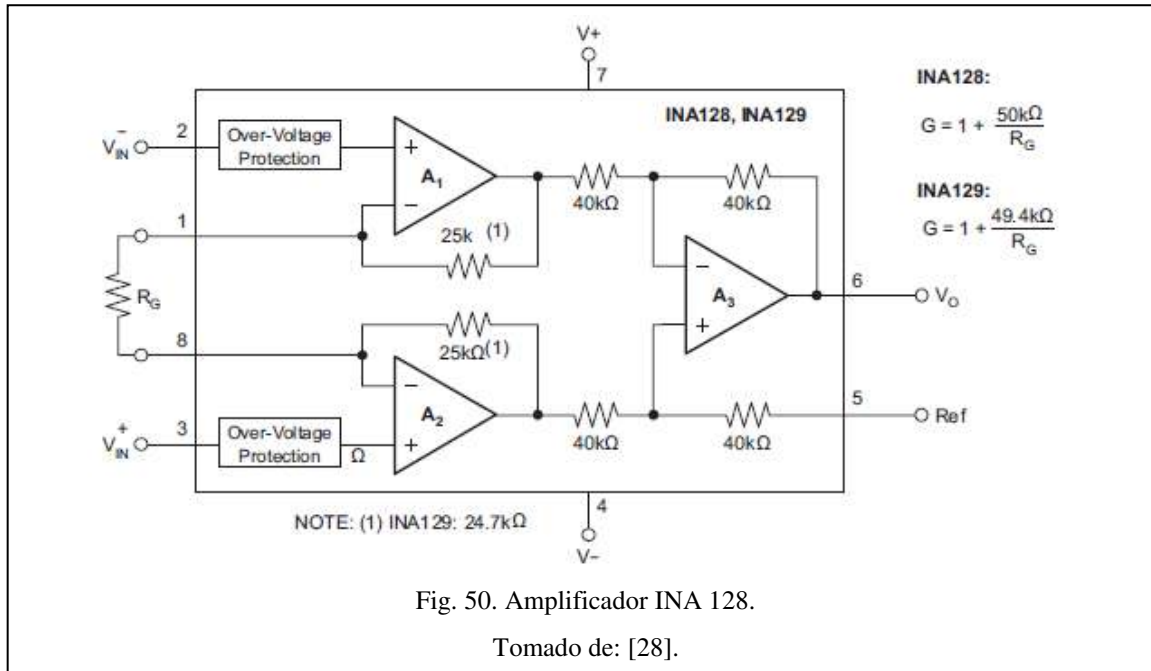
Con el fin de obtener una amplificación de alta ganancia y buenas características de impedancia de entrada, para esta etapa se utilizó el amplificador de referencia INA128. La configuración interna de este componente se muestra en la figura 50.

La ganancia de voltaje en la banda de paso del amplificador INA 128 está regida por la siguiente expresión presente en la hoja de datos del integrado:

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \quad (25)$$

Se configuró una ganancia de voltaje máxima que nos permite el amplificador igual a  $G = 10001$ ; y para tal fin la resistencia  $R_G$  será igual a:

$$R_G = \frac{50k\Omega}{G - 1} = 5[\Omega] \quad (26)$$



## 6) Diseño Filtro de pasa bandas

Con el fin de mejorar la selectividad del circuito de recepción y reducir el efecto de los armónicos introducidos por el canal se agregó un circuito de filtro de pasa-banda. En este caso es un filtro de paso de banda pasivo compuesto de resistencias y condensadores como se muestra en la figura 51.

Donde las frecuencias de corte requeridas para nuestro caso de interés se eligieron una frecuencia de trabajo de 31 KHz para la frecuencia alta y de 24 KHz para la frecuencia baja. Se muestra en detalle con las siguientes expresiones.

$$Frecuencia\ baja = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} = 24[kHz] \quad (27)$$

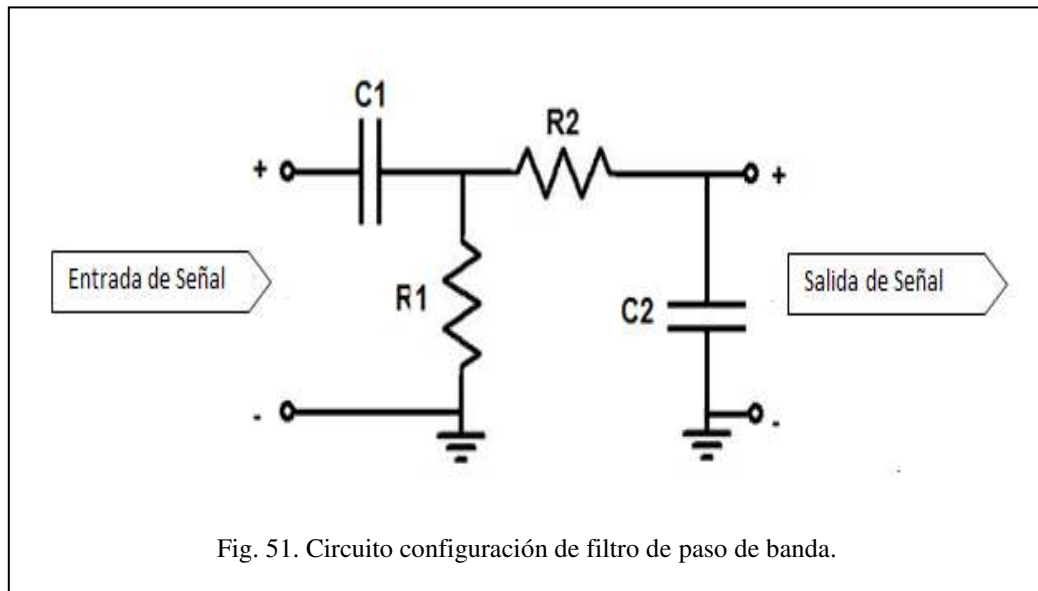
$$R_2 = 5.1 [k\Omega] \quad (28)$$

$$C_2 = 1 [nF] \quad (29)$$

$$Frecuencia\ alta = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (30)$$

$$R_1 = 55 [\Omega] \quad (31)$$

$$C_1 = 100 [nF] \quad (32)$$



## 7) Diseño Amplificador

Finalmente, con el fin de llevar a unos límites fijos la amplitud y así evitar disparidades de amplitud que perjudicaran el proceso de demodulación, se usó también el amplificador de potencia de audio

de referencia LM386. Este es un amplificador versátil, de baja potencia. La ganancia se puede ajustar para valores entre 20 y 200. La configuración interna de este circuito integrado se muestra en la figura 52.

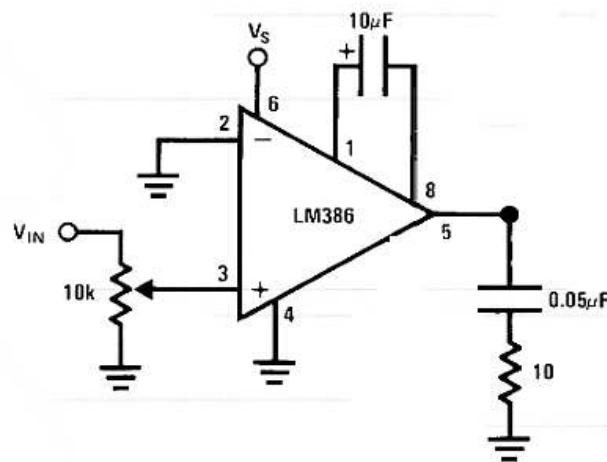


Fig. 52. Amplificador de audio LM386 configurado para una ganancia de 200.

Tomado de: [29].

### 8) Amplificador comparador

Para obtener cambios de nivel bien marcados, se procedió a implementar un circuito comparador con el circuito integrado o amplificador LM324.

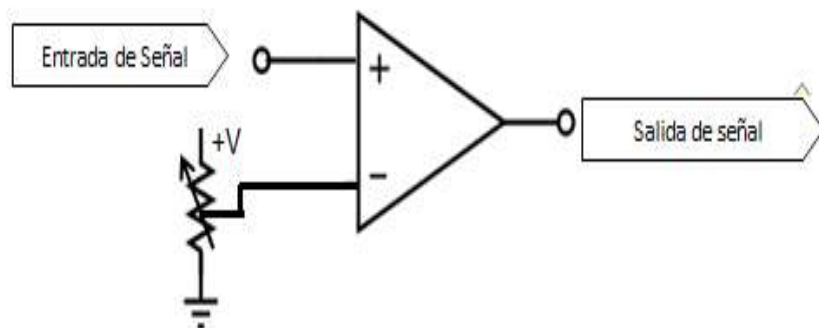
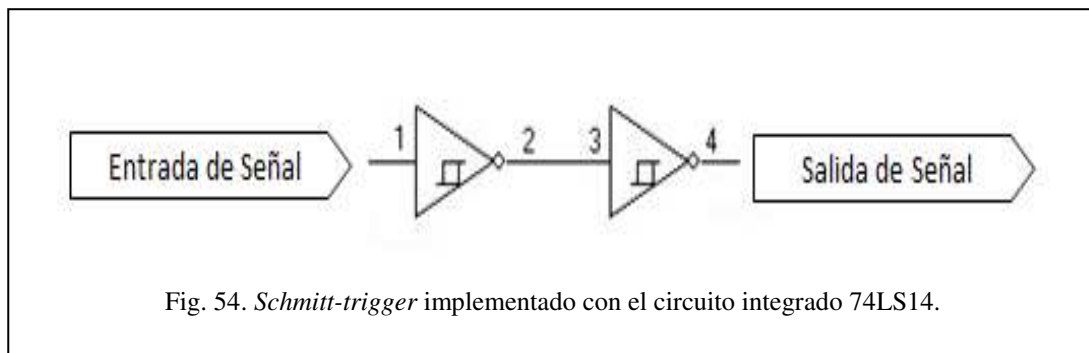


Fig. 53. Comparador de voltaje implementado con el circuito integrado LM324.



### 9) Reconfiguración de los pulsos con circuito *schmitt trigger*

Con el fin de reconfigurar la forma de los pulsos y manejar algunos efectos de atenuación se adicionó un circuito *schmitt trigger* 74LS14, este contiene puertas lógicas / inversoras que aceptan entradas de señales TTL estándar y proporciona una salida TTL también con niveles estándar. Estos dispositivos son capaces de transformar cambios en la señal lentamente en la entrada y definirlos claramente en la salida, en nuestro caso lo hacemos pasar una vez más para invertir la señal recuperándola en fase como se muestra en la Figura 54.



### 10) Microcontrolador

Para implementar el demodulador, se requiere decodificar la señal experimental, para la cual se configura el microcontrolador pic16F886 en modo de recepción serial por UART para leer la señal que ingresa por el pin RX, luego se muestra por una pantalla LCD o también por puerto serial. Al decodificar la señal, pasándola de ASCII se tienen los caracteres alfanuméricos que provienen de la señal de datos que llega al microcontrolador. Su configuración se muestra figura 55.

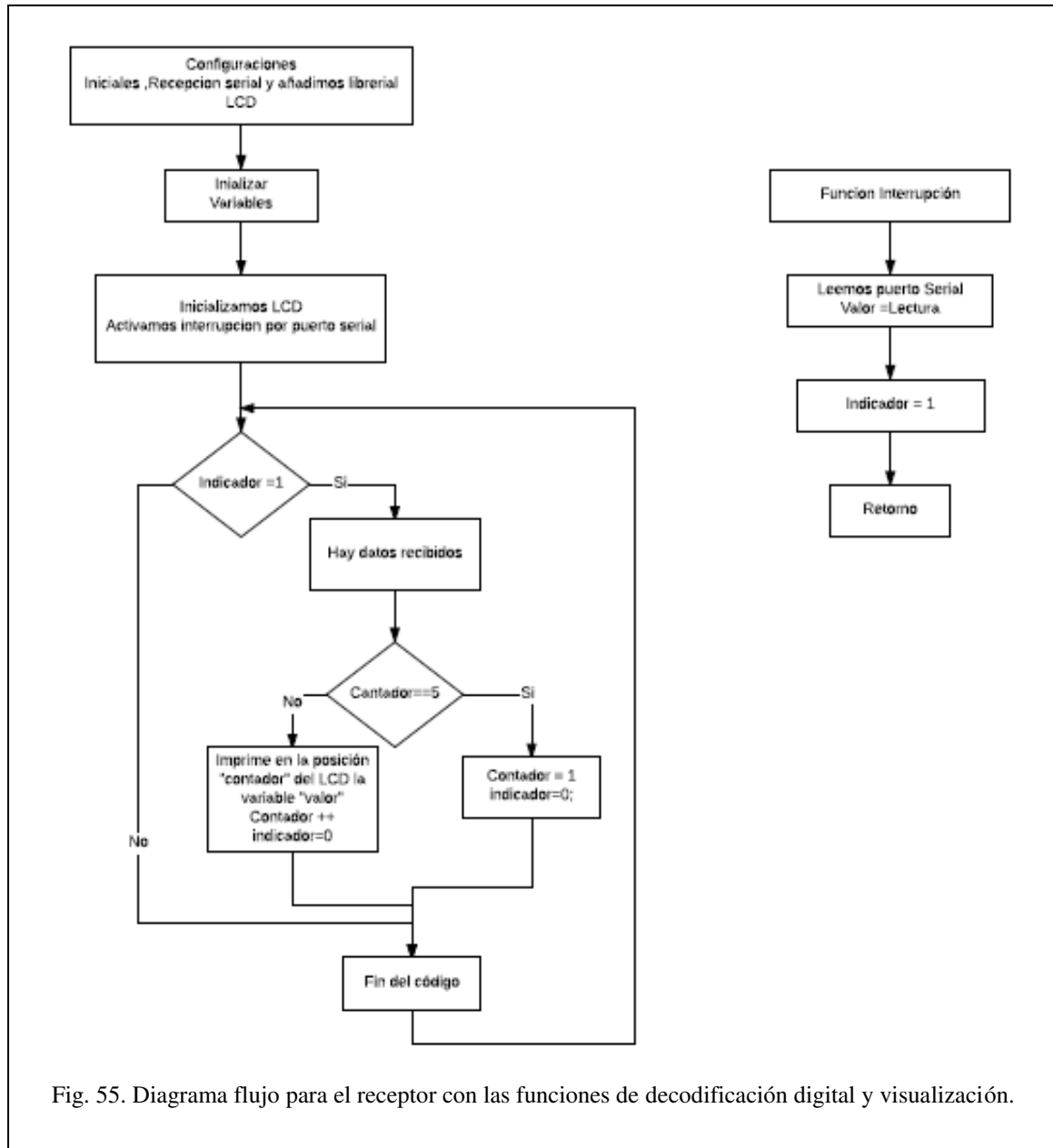


Fig. 55. Diagrama flujo para el receptor con las funciones de decodificación digital y visualización.

### 11) Medios de visualización: Módulo LCD e interfaz por puerto serial.

Por sus características fue elegido un *display* de 16 caracteres y 2 líneas. Este se ajusta a los requerimientos de las pruebas experimentales para visualizar los valores recibidos desde el emisor. El *display* muestra “Recibido =” en su primera línea y “voltaje =” con el valor recibido en la segunda línea.

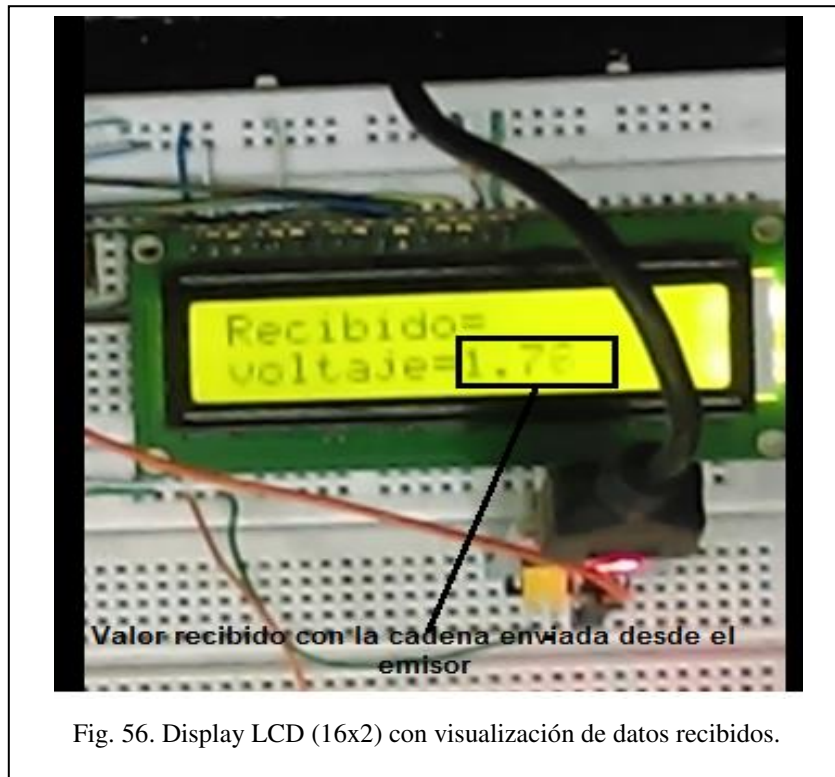


Fig. 56. Display LCD (16x2) con visualización de datos recibidos.

### *F. Transmisión utilizando modulación ASK*

A continuación, se describe en un diagrama de bloques todo el acondicionamiento de la señal para su transmisión por el medio acuático. En esta parte de procesamiento de señal hay etapas que se repiten y que fueron utilizadas para el caso de la técnica de FSK.

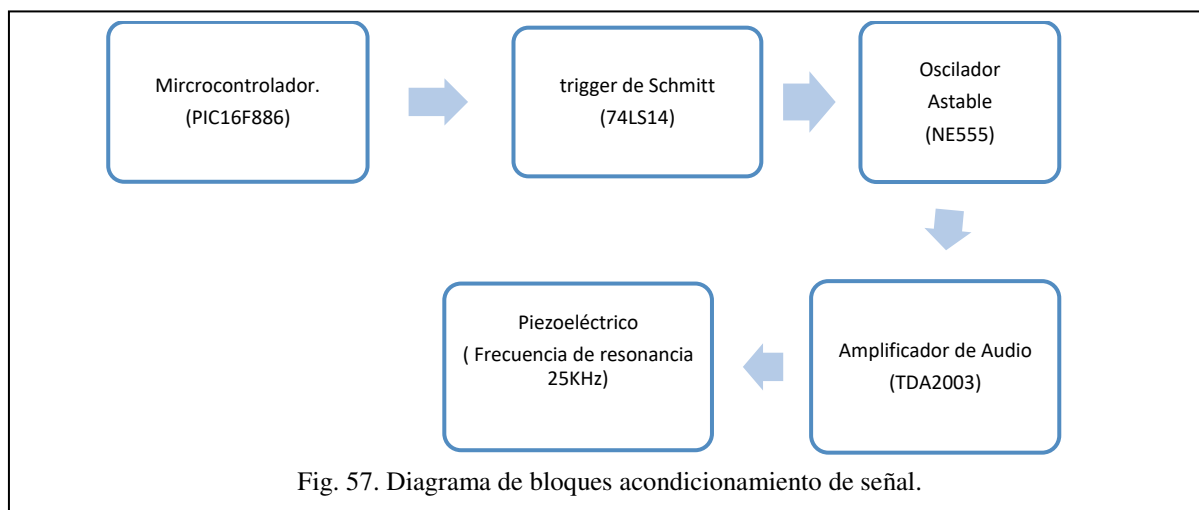
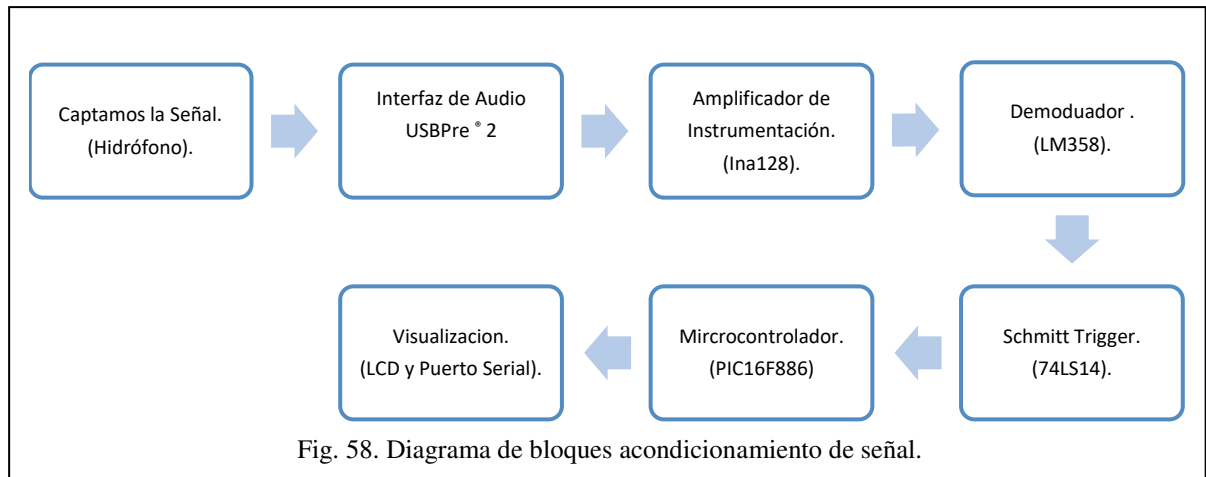


Fig. 57. Diagrama de bloques acondicionamiento de señal.

### 1) Detección de la señal ASK

A continuación, se describe en un diagrama de bloques todo el acondicionamiento de la señal recibida después de pasar por el medio acuático.



### G. Resultados Experimentales

En esta sección presentamos el soporte gráfico de algunas pruebas realizadas en el laboratorio, también en el laboratorio de mecánico de fluidos y en la piscina de la Universidad del campus de Bello.

En la figura 59 se muestra la disposición básica de los elementos finales de transmisión y recepción, emisor acústico e hidrófono respectivamente, para pruebas realizadas en el laboratorio de electrónica en un pequeño contenedor.



Fig. 59. Pruebas en contenedor.

La figura 60 muestra la señal de datos como sale en el microcontrolador en su pin tx (en amarillo) y la forma de onda recibida en rojo (pin rx) en el microcontrolador de recepción.

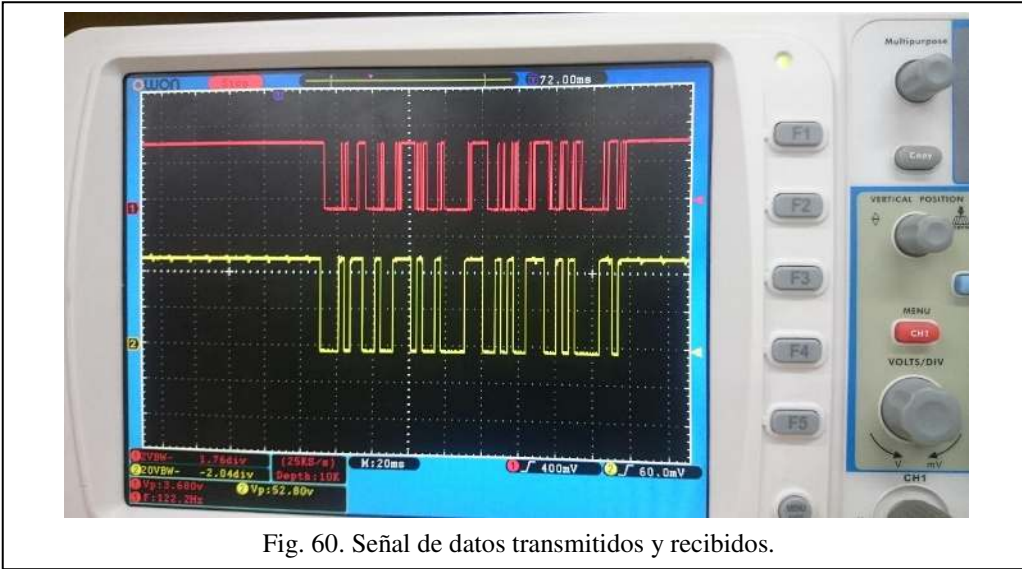


Fig. 60. Señal de datos transmitidos y recibidos.

Se muestra también la forma de la señal de salida que se aplica en los extremos del transductor piezoeléctrico (en amarillo) y la señal a la salida de la interfaz primaria de acondicionamiento del hidrófono (en rojo).

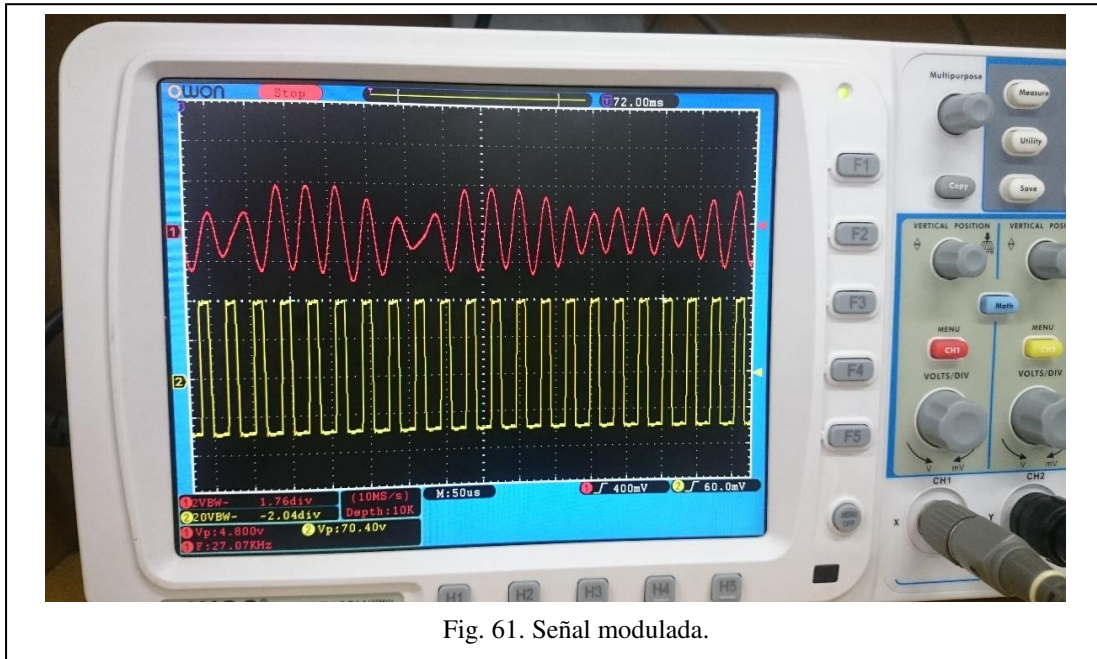


Fig. 61. Señal modulada.

En el lado de emisión es evidente la presencia de una gran cantidad de armónicos en frecuencias múltiples de las frecuencias primarias, como se muestra en la figura 62.

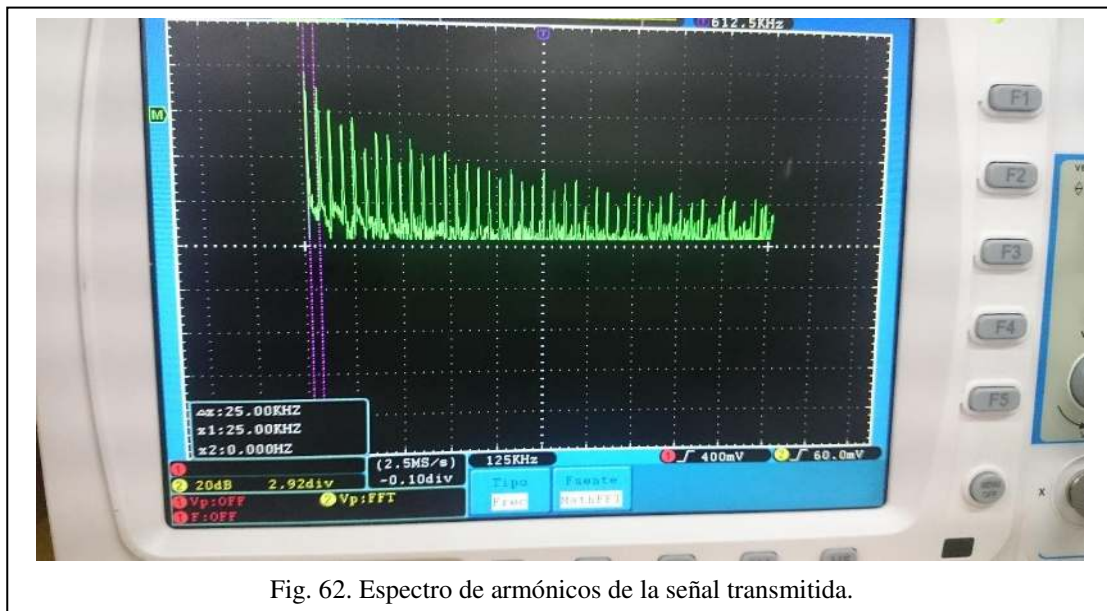


Fig. 62. Espectro de armónicos de la señal transmitida.

En una aproximación o *zoom* se ve con más detalle la distribución del espectro de la señal fundamental y sus armónicos.



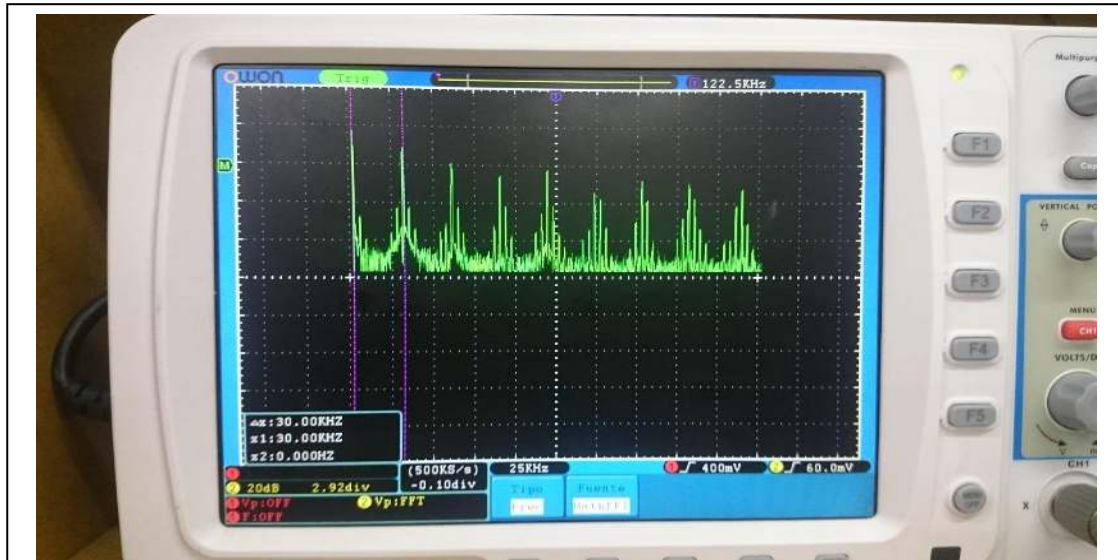


Fig. 63. Vista en detalle de un conjunto de armónicos de la señal transmitida.

En el lado del receptor, se evidencia el trabajo de las etapas de filtrado y la presencia de un solo componente espectral que corresponde a la señal modulada. Esta señal sin embargo presenta un componente pulsante, seguramente derivado de la naturaleza de la técnica FSK, este fenómeno se muestra en la figura 64.

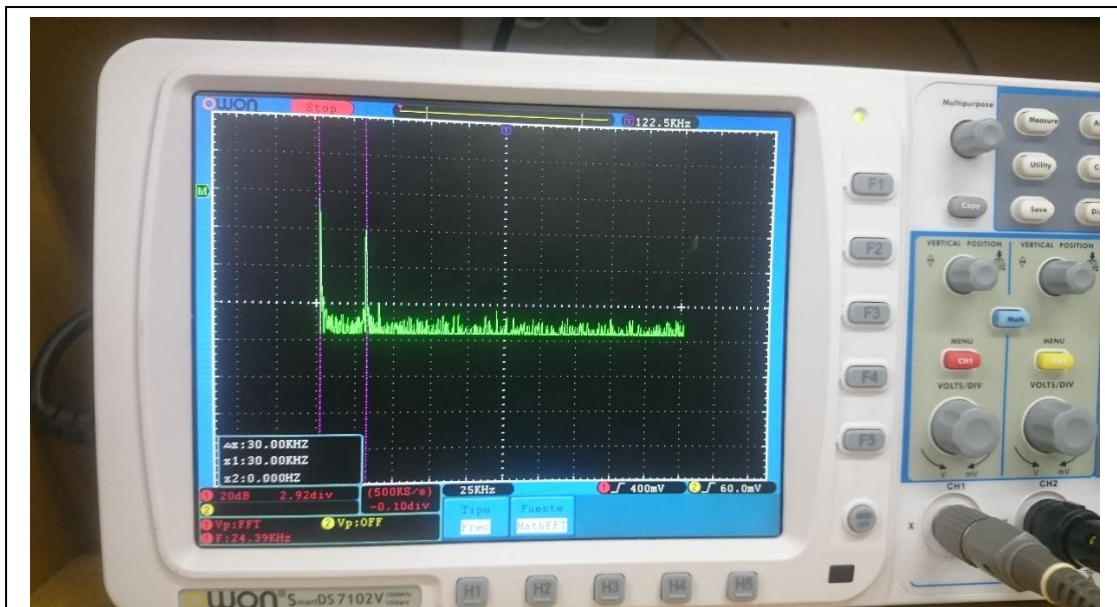
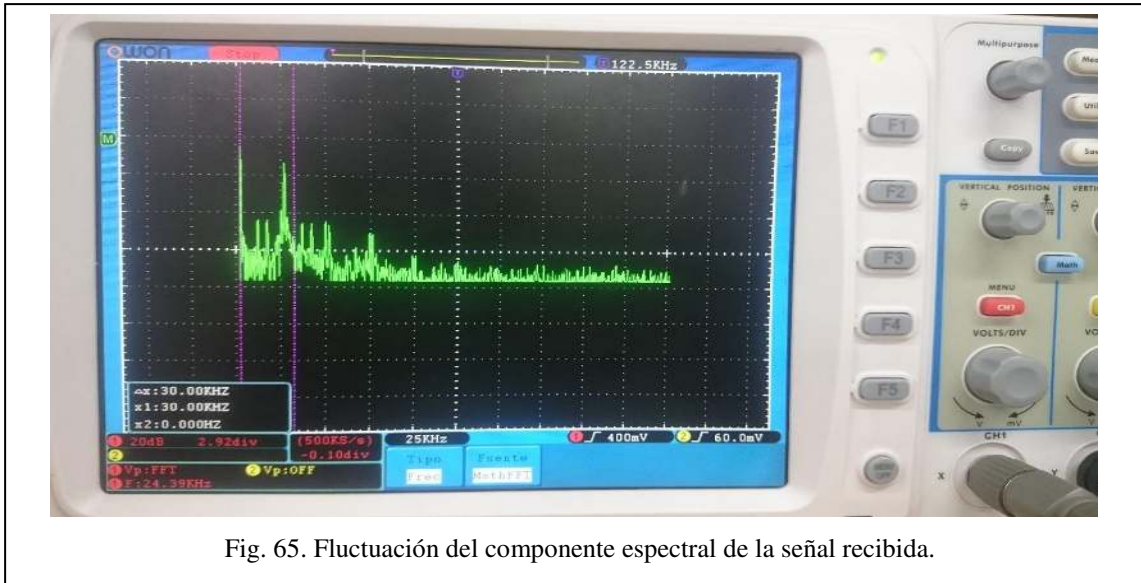


Fig. 64. Espectro de la señal recibida luego de los procesos de filtrado.

Como se mencionó antes, se presenta el mismo componente central pero con la presencia de una componente pulsante que tiene cierto ancho de banda.

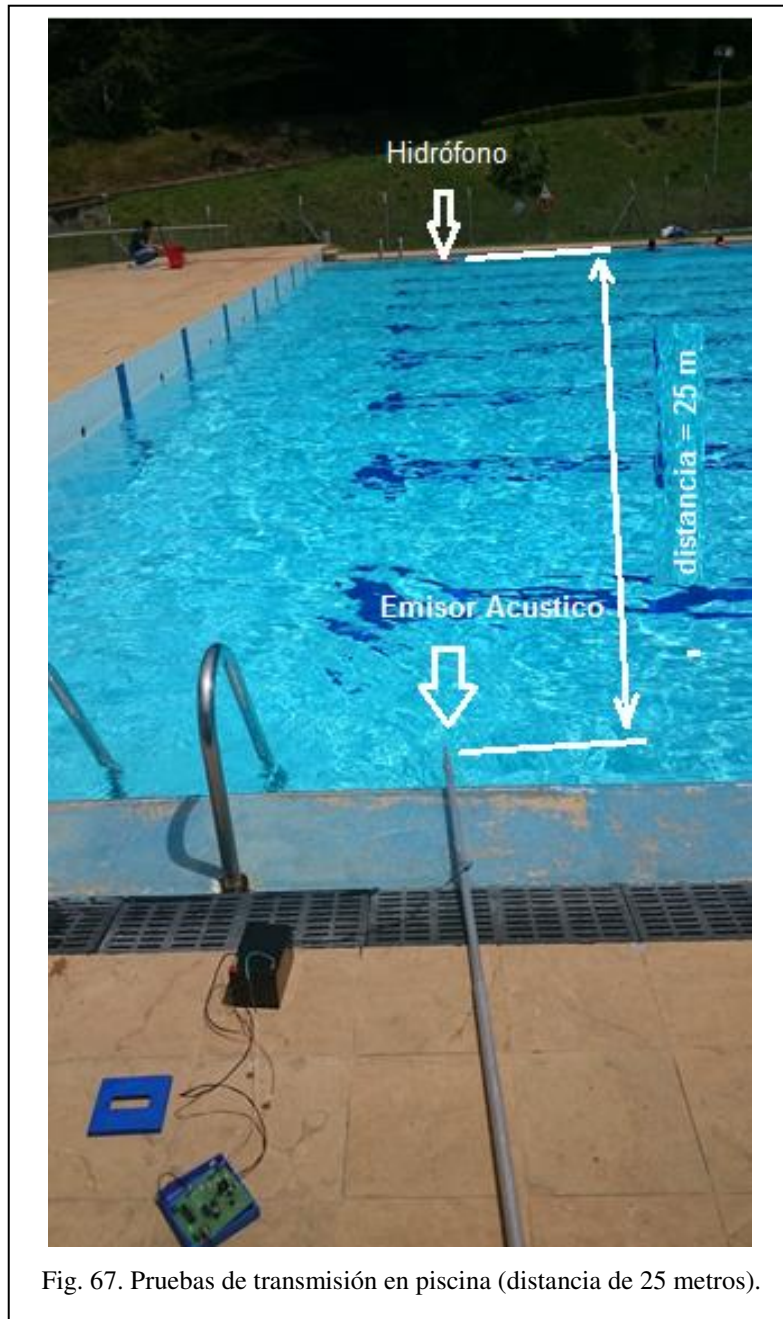


Con el fin de probar el sistema de comunicación en un cuerpo de agua mayor se hicieron pruebas en el laboratorio de mecánica de fluidos de la Universidad. Para estas pruebas se desplazaron hasta allí equipos de computo, osciloscopio y elementos similares para registrar los resultados y realizar labores de análisis y depuración. El arreglo de emisor-receptor se probó con varias distancias hasta alcanzar la separación máxima de 1.80 metros.





En la figura 67 se muestra la disposición inicial de elementos para una prueba realizada con la longitud de 25 metros que corresponde al ancho de la piscinal del campus de Bello de la universidad.



Para observar el desempeño del transmisor a una longitud mayor se dispuso el arreglo de emisor receptor a lo largo de la piscina, con una distancia de 50 metros. Esto se muestra en la figura 68.



Fig. 68. Pruebas de transmisión en piscina (distancia de 50 metros).

Se presenta a continuación en la figura 69 el análisis espectral de las grabaciones de las señales captadas con el hidrófono, para este fin se aprovecharon las funcionalidades del programa Audacity.

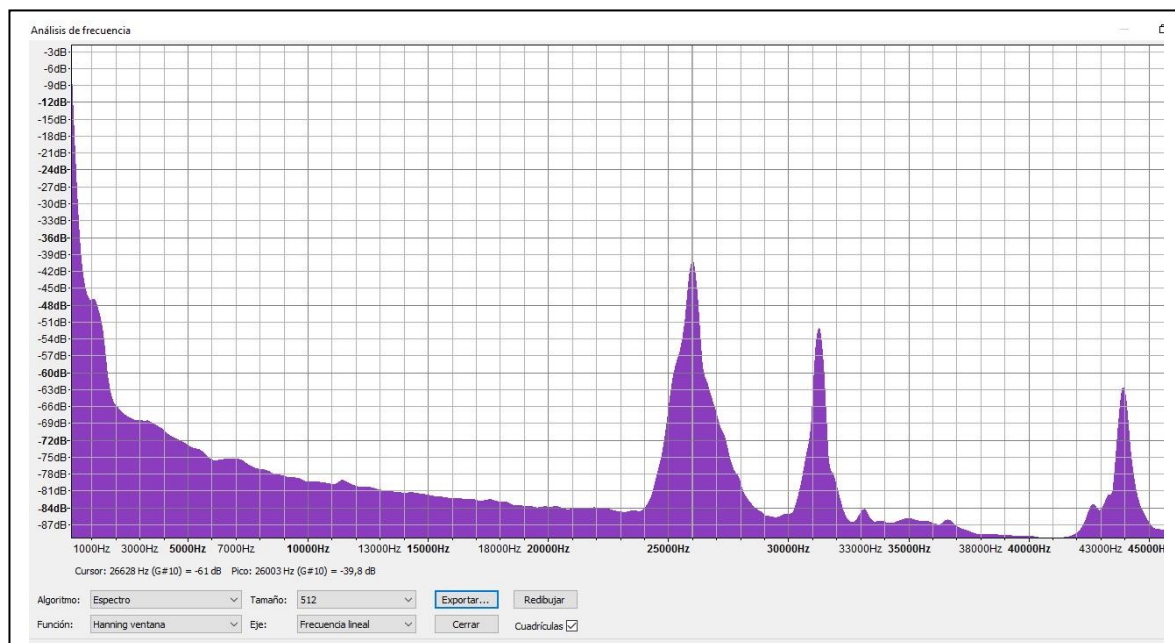
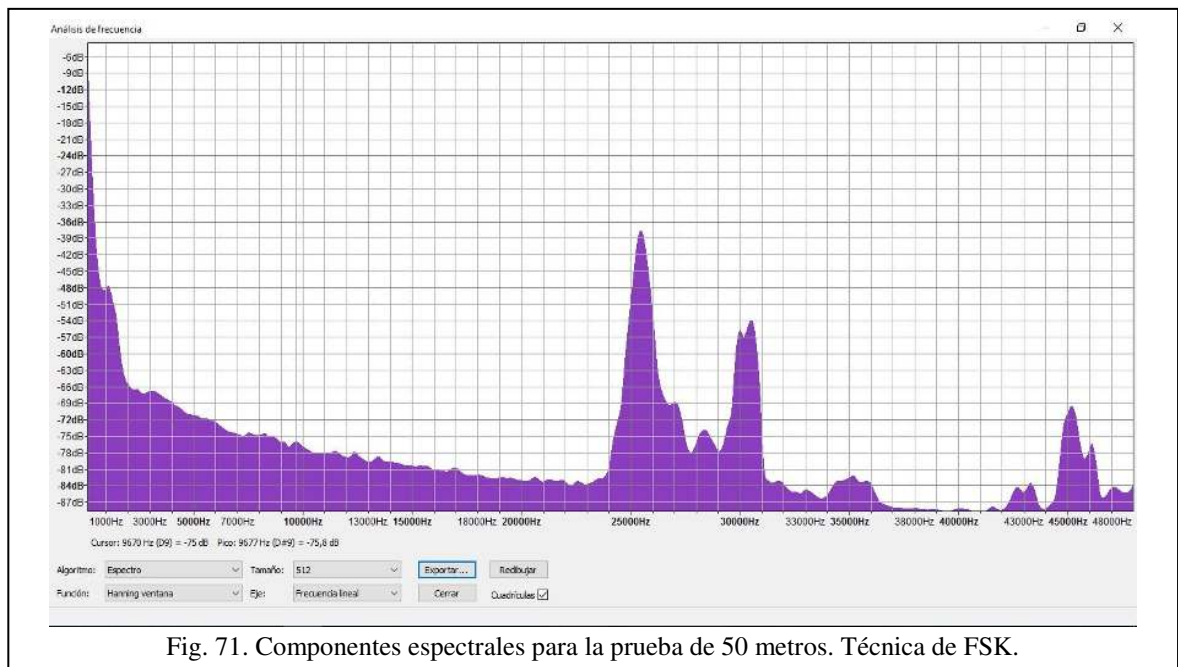
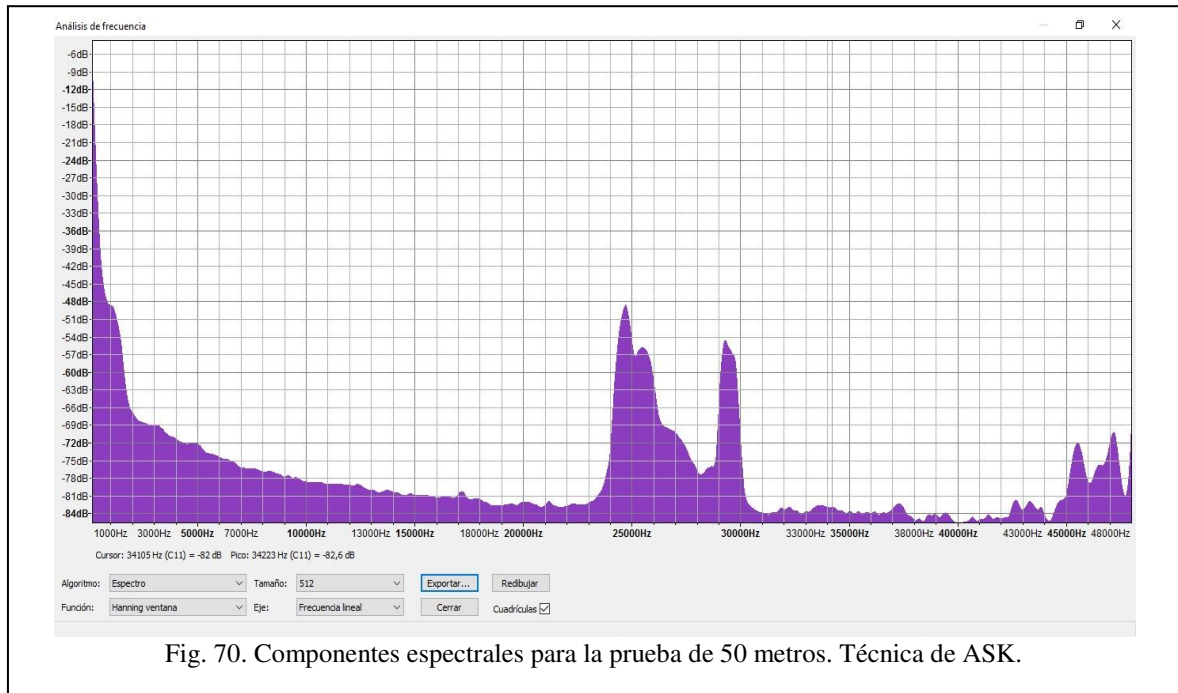


Fig. 69. Componentes espectrales para la prueba de 25 metros. Técnica de FSK.





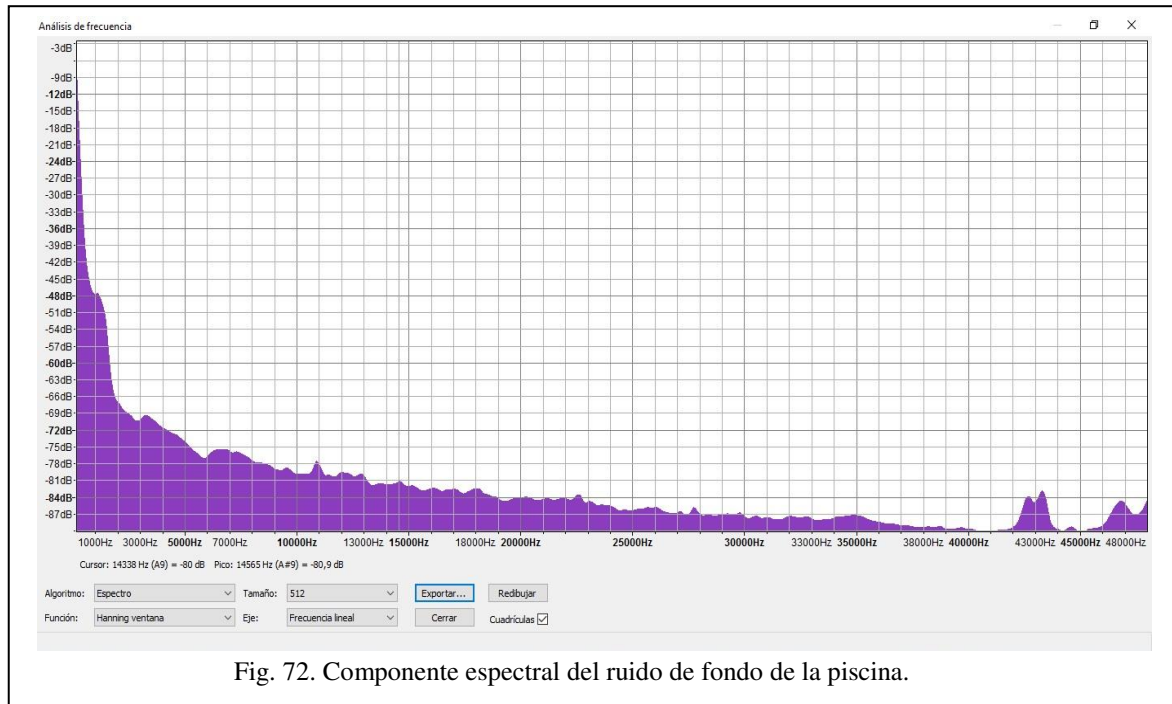


Fig. 72. Componente espectral del ruido de fondo de la piscina.

### *H. Desarrollo del prototipo*

Procedemos a mostrar el detalle de la implementación de los prototipos del emisor y receptor junto con las tarjetas de circuito impreso definitivas, su respectivo ensamble y ubicación en las cajas.

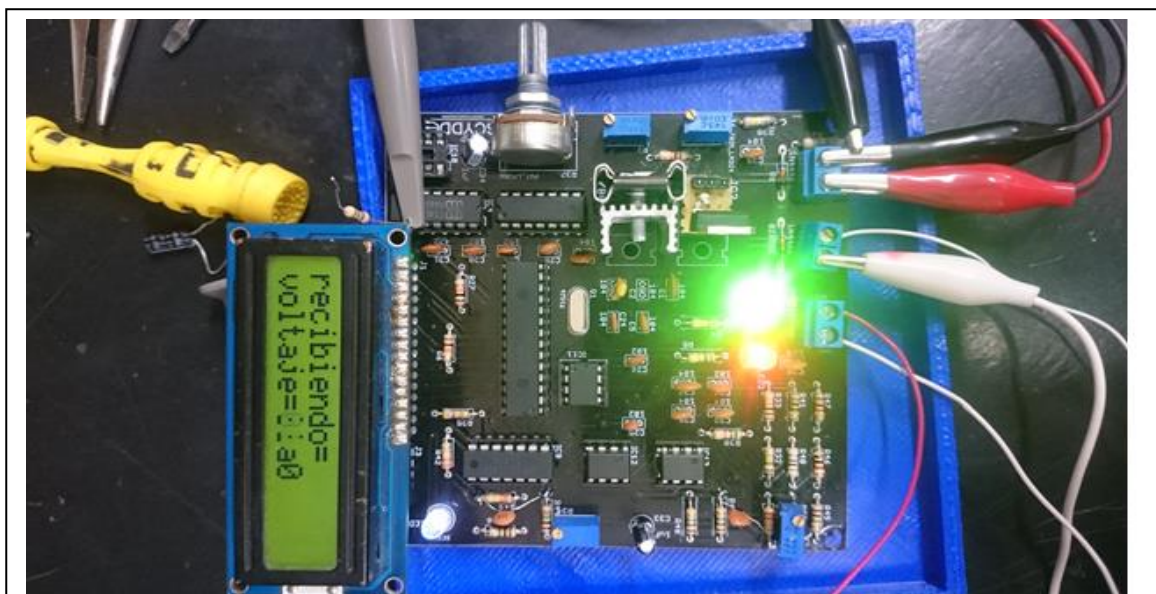


Fig. 73. Tarjeta de circuito impreso del receptor FSK y despliegue de mensajes.

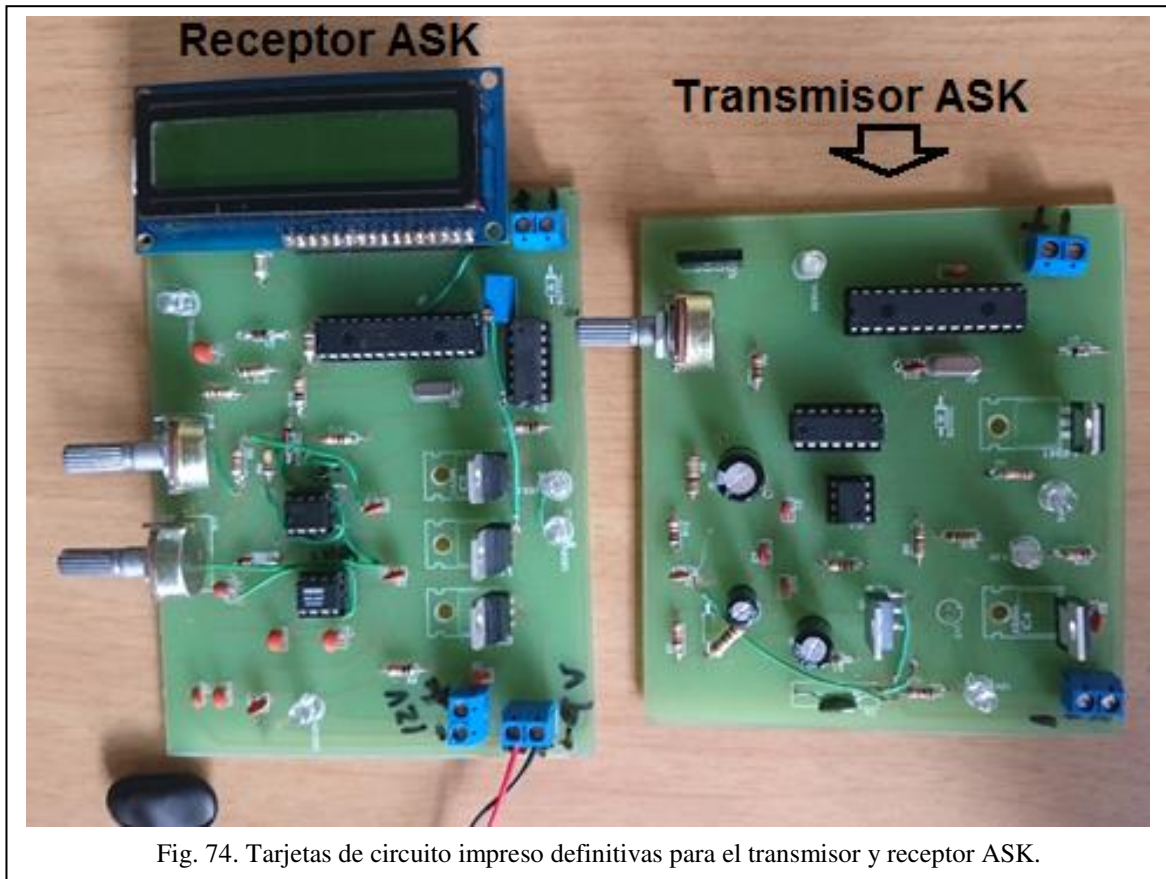


Fig. 74. Tarjetas de circuito impreso definitivas para el transmisor y receptor ASK.

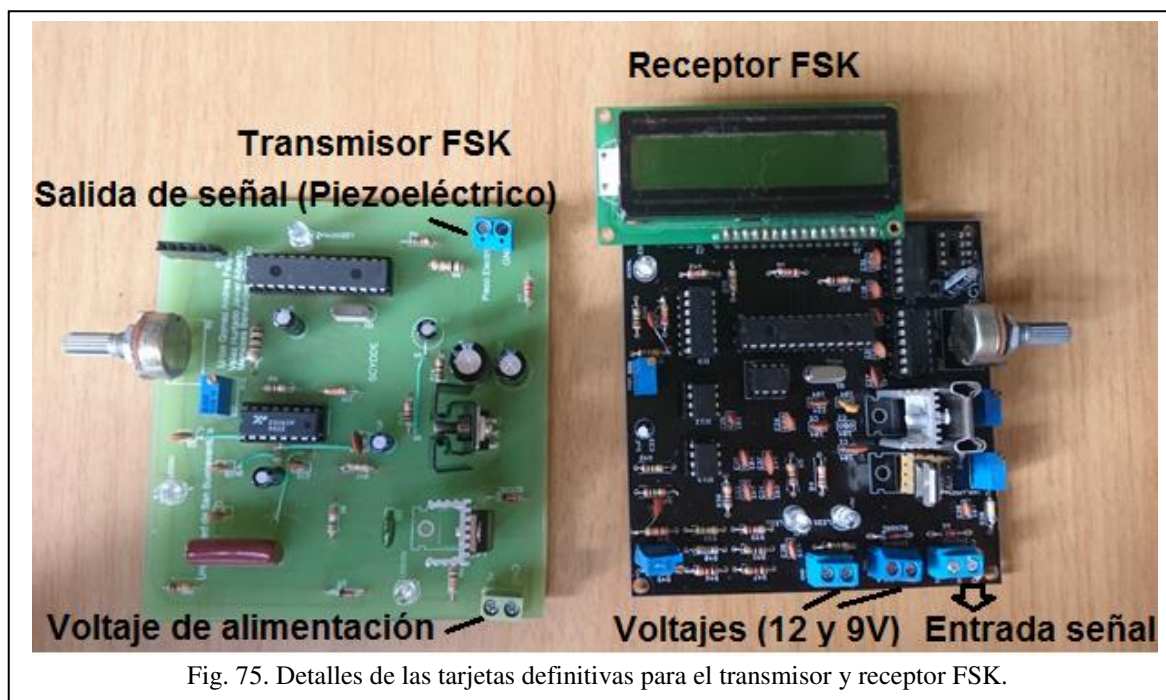


Fig. 75. Detalles de las tarjetas definitivas para el transmisor y receptor FSK.

En la figura 76 se muestra el detalle del ensamble del modulador por técnica ASK con la carcasa que también fue realizada con la impresora 3D. Carcasa y apariencia exterior (izquierda), componentes interiores (derecha).



## **XI. CONCLUSIONES**

- Se ha verificado el principio básico de la comunicación subacuática utilizando frecuencias de ultrasonido, 25 y 30 KHz, con transductores piezo-cerámicos.
- Se ha determinado que se deben adicionar circuitos y etapas de acondicionamiento para resolver los problemas de ruido y atenuación de la señal luego de atravesar el medio acuático.
- Luego de resolver algunos problemas con la hermeticidad de la carcasa del emisor acústico se han obtenido resultados satisfactorios con sus pruebas en inmersión.
- En varios momentos durante el desarrollo de este proyecto, las pruebas en el laboratorio de mecánica de fluidos representaron varias dificultades ya que en este no se cuenta con equipos necesarios para pruebas y análisis como osciloscopio, generador de señales y fuentes de voltaje, entre otros. Adicionalmente el acondicionamiento de los tanques requería de sellamientos para evitar fugas de agua, lo que toma un tiempo considerable.
- En distancias cortas y con canales acuáticos constituidos por cuerpos de agua pequeños el sistema está expuesto a una gran cantidad de reflexiones que resultan en interferencias significativas sobre la señal. Esto dificulta la recepción o hace necesario la realización de tareas de ajuste fino para poder recuperar la señal en el lado de recepción y por ende recuperar los datos transmitidos.
- En este momento se están realizando los ajustes sobre los elementos del sistema para proceder a pruebas en una piscina y verificar el funcionamiento de las comunicaciones a diferentes distancias entre emisor y receptor como también para diferentes profundidades de inmersión.
- las pruebas realizadas en la piscina se detectó un desplazamiento de las frecuencias utilizadas en la técnica de FSK de aproximadamente 1KHz, esto no se había evidenciado en las pruebas realizadas a más cortas distancias en medios con un volumen menor de agua.

### **VIII. TRABAJOS A FUTURO**

- Con el fin de atenuar los efectos del canal y la influencia del ruido y ecos, se trabaja en la actualidad en el desarrollo de programas para el microcontrolador que utilicen esquemas de codificación diferentes al ASCII para tener un menor número de cambios de señal por mensaje transmitido.
- En el contexto del proyecto SIDACAM se continuará con la realización de pruebas de campo para verificar el desempeño del sistema de comunicación propuesto en diferentes cuerpos de agua y bajo diferentes condiciones.
- Actualmente se trabaja en la puesta a punto de los prototipos para poder proceder con facilidad durante las pruebas de campo en cuanto a aspectos de alimentación de los módulos de emisión y recepción, también de finalización de las carcasas para los circuitos electrónicos.
- Se trabajará también en la utilización de radios definidos por software como elementos de modulación y demodulación en los extremos de modulación y demodulación respectivamente con el fin de probar el desempeño del sistema desarrollado con esquemas de modulación y codificación más complejos que el ASK y el FSK.



## REFERENCIAS

- [1] F. Ruiz, «Eficiencia y Control de Potencia en Canales de Comunicaciones Acústicas Subacuáticas (Tesis de Doctorado),» 2012. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?Codigo=45980>.
- [2] S. Sendra, «Comunicaciones Inalámbricas Subacuáticas a 2,4 ghz para la Transmisión de Datos con Altas Tasas de Transferencia (Trabajo de Grado),» 2011. [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/14605>.
- [3] B. Benson, K. Domond, B. Faunce, R. Kastner, D. Kimball, Y. Li y C. Schurgers, «Design of a Low Cost Underwater Acoustic Modem for Short Range Sensor Networks, » IEEE Embedded Systems Letters, vol. 2, n° 3, pp. 58-61, 2010.
- [4] E. Ramírez, «Comunicaciones Submarinas Modelado de la Propagación de Ondas Acústica en el Océano Producidas por una Fuente en Movimiento en la Superficie del Mismo (Tesis de Maestría),» 2006. [En línea]. Available: <http://www.remeri.org.mx/portal/REMERI.jsp?Id=oai:tesis.ipn.mx:123456789/15854>.
- [5] H. Medwin, Sounds in the Sea. From Ocean Acoustics to Acoustical Oceanography, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [6] A. Hernandez, «Diseño y Construcción de un Emisor y Transmisor Acústico para la Localización de Equipo Oceanográfico Fondeado en un Cuerpo de Agua (Tesis de Maestría),» 2015. [En línea]. Available: <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/14947>.
- [7] A. Arias, «Acústica Submarina,» s.f. [En línea]. Available: [http://www.academia.edu/13725873/Ac%C3%bastica\\_submarina](http://www.academia.edu/13725873/Ac%C3%bastica_submarina).
- [8] J. Quino, «Propagación de Onda Acústica en Océanos (Tesis de Doctorado),» 2009. [En línea]. Available: <http://repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/13126>.
- [9] A. Sanchez, «Sistema de Comunicación Acústica para Redes de Sensores Inalámbricas Subacuáticas en Aguas Someras (Tesis de Doctorado),» 2013. [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/discover>.
- [10] M. Gonzáles, «Propuesta de Solución de Comunicación Subacuática Entre el Submarino HRC-AUV y una Estación Remota (Tesis de Doctorado),» 2016. [En línea]. Available: <http://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/6677?Show=full>.

- [11] A. Ángeles y G. Flores, «Análisis de la Ecuación de Dispersión como Parte Fundamental del Método de Modos Normales Enfocado a las Comunicaciones Subacuáticas (Trabajo de Grado),» 2008. [En línea]. Available: <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/6310>.
- [12] H. Young y R. Freedman, Sears y Zemansky Física Universitaria, Mexico: Pearson, 2013.
- [13] J. Aparicio, «Modelo de Propagación Acústica Subacuática y su Aplicación en Sistemas de Posicionamiento (Tesis de Doctorado),» 2014. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10017/22396>.
- [14] A. Stefanov y M. Stojanovic, «Design and Performance Analysis of Underwater Acoustic Networks, » IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 29, n° 10, pp. 2012-2021, 2011.
- [15] W. Tomasi, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Mexico: Pearson, 2003.
- [16] R. Urick, Principles of Underwater Sound, New york: mcgraw-Hill, 1983.
- [17] M. Arshad, «Recent Advancement in Sensor Technology for Underwaters, » Indian Journal of Marine Sciences, vol. 38, n° 3, pp. 267-273, 2009.
- [18] E. Whitman, «SOSUS.The Secret Weapon of Undersea Surveillance, » Undersea Warfare, vol. 2, p. 7, 2005.
- [19] G. Xie y J. Gibson, «A Networking Protocol for Underwater Acoustic Networks, » 2000. [En línea]. Available: <https://goo.gl/fwi6zD>
- [20] D. Sarriá, P. Oriol y J. Río, «Acoustic Modem for Underwater Sensor Networks, » Instrumentation Viewpoint, vol. 17, pp. 29-30, 2014.
- [21] Teledyne Reson, «Hydrophone TC4032,» 2005. [En línea]. Available: <https://goo.gl/dnqpmf>.
- [22] EXAR Corporation, «XR-2206 Monolithic Function Generator, » 2008. [En línea]. Available: <https://goo.gl/qdanjb>.
- [23] EXAR Corporation, «XR-2211 FSK Demodulator,Tone Decoder,» 1997. [En línea]. Available: <https://goo.gl/5qs77u>.
- [24] Stmicroelectronics, «Audio Amplifier,» 2013. [En línea]. Available: <https://goo.gl/mmsqlh>.
- [25] Steminc, «Piezoelectric Ceramic Cylinder. Radial mode vibration, » [En línea]. Available: <https://goo.gl/fgt8k4>.
- [26] Sound Devices, «usbpre 2, » 2010. [En línea]. Available: <https://goo.gl/hdls55>.

- [27] Stmicroelectronics, «Wide Bandwidth Dual J-Fet Operational Amplifiers, » 1998. [En línea]. Available: <https://goo.gl/Zkur5u>.
- [28] Texas Instruments Incorporated, « LM386 Low Voltage Audio Power Amplifier, » 2017. [En línea]. Available: <https://goo.gl/xdoygi>.
- [29] Texas Instruments Incorporated, «Low Power Instrumentation Amplifiers, » 2015. [En línea]. Available: <https://goo.gl/Zavd6P>.

## ANEXOS

### Anexo 1. Criterios de diseño de la carcasa

Para la construcción del emisor acústico subacuático se consideró inicialmente el tamaño de los principales componentes que lo integran como son: la tarjeta de circuitos electrónicos, baterías y el transductor piezoeléctrico ya que estos se alojan dentro de la carcasa. Una vez estimada las dimensiones la carcasa se diseñó de tal forma que sea separable, con el fin de permitir el acceso a los componentes y realizar tareas de mantenimiento o reparación en caso de presentarse alguna falla. Por último, se selló el dispositivo de forma que no se presente filtraciones o humedades por agua a través de la unión existente en la carcasa, por lo que se utilizó tornillos de acero inoxidable, empaquetadura de caucho y el uso de resinas.

Según [6] a la hora de diseñar y construir la carcasa los factores más importantes son:

- **Presión hidrostática.** La presión del agua aumenta a medida que aumenta la profundidad. Se estima que por cada 10 metros de profundidad la presión aumenta 14.7 psi. Por lo tanto, la carcasa debe ser capaz de soportar los altos índices de presión.
- **Corrosión.** el contenido de sales, minerales y químicos presentes en el agua provoca que diferentes materiales se desgasten, corroan y fatiguen, por lo que es necesario elegir cuidadosamente el material a utilizar. Actualmente muchas de las carcasas utilizadas en dispositivos comerciales se fabrican utilizando metales como el acero inoxidable y aluminio, también materiales plásticos como el poliuretano, PVC o acrílico siendo estos la mejor opción ya que ante la exposición prolongada bajo el agua no se presentan deterioro asociado a reacciones químicas con el agua (corrosión).
- **Forma y tamaño.** Las formas más apropiadas para fabricar una carcasa son cilindros y esferas. De estas, la forma más utilizada es la cilíndrica, esto debido a que por su forma geométrica la presión hidrostática se distribuye de manera uniforme sobre su superficie,

mientras que en el caso de la esfera si bien su diseño es favorable su fabricación es más difícil por lo que se acostumbra a utilizarse como elementos de flotación.

- **Ventana acústica o encapsulamiento.** Tomando las consideraciones nombradas por [3] el transductor piezoeléctrico necesita ser encapsulado para evitar el contacto con cualquier fluido conductor, y proporcionar un eficiente acoplamiento de energía mecánica a acústica evitando así, una gran diferencia de impedancia acústica entre el elemento piezoeléctrico y el agua, que ocasione que gran parte de la energía de ultrasonidos se vea reflejada.



Fig. 1. Encapsulamiento del transductor

Tomado de [3]

Tenemos entonces que la consideración de diseño más importante es encontrar un material que sea acústicamente transparente en el medio que se utilizará el transductor; esto es más importante para aplicaciones de mayor frecuencia o más sensibles donde la longitud de onda y la amplitud son menores que el espesor del material encapsulante. Se recomienda materiales como el uretano y el acrílico. También se recomienda el uso a la vez de una capa de aceite mineral ya que este es inerte y posee propiedades acústicas similares al agua.

**Anexo 2. Costos del prototipo****TABLA I. COSTOS PARA CIRCUITOS ELECTRÓNICOS**

ÍTEM	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	TOTAL
1	1	Microcontrolador Microchip 16F883	11.340
2	1	Transductor piezoeléctrico	321.690
3	1	Amplificador de audio de 10W TDA2003	3.300
4	2	Base para integrado de 28 pines	700
5	4	Base para integrado de 8 pines	400
6	1	Base para integrado de 14 pines	600
7	2	Regulador de voltaje L4941 5 voltios	3.000
8	2	Regulador de voltaje L7905 5 voltios	3.600
9	2	Regulador de voltaje L1117 3.3 voltios	3.000
10	1	Amplificador de instrumentación INA 128	35.000
11	1	Circuito integrado XR 2206	10.000
12	1	Circuito integrado XR 2211	11.000
13	5	Resistencias de 1K a ¼ watio	50
14	10	Resistencias de 10K a ¼ watio	100
15	5	Resistencias de 100K a ¼ watio	50
16	5	Resistencias de 220K a ¼ watio	50
17	5	Resistencias de 680K a ¼ watio	50
18	5	Resistencias de 100 Ohm a ¼ watio	50
19	5	Resistencias de 1 Ohm a ¼ watio	50
20	5	Condensadores de 470 µf a 25 voltios	1.100
21	5	Condensadores de 100 µf a 16 voltios	300
22	5	Condensadores de 10 µf a 16 voltios	300
23	2	Condensadores de 1000 µf 25 voltios	200
24	5	Condensadores de 1 µf 16 a voltios	200
25	30	Condensadores cerámicos de varios valores	1.200
26	10	Diodos leds azul, verde, rojo, blanco	800

27	6	Diodos zener 5.1 voltios	600
28	1	Display 16x2	10000
29	2	Amplificador LF353	1400
30	2	Compuerta lógica 74LS14	2800
31	4	Bornera 2 posiciones	1800
32	2	Fabricación tarjeta PCB emisor y receptor	186000
		Total (pesos)	\$ 609.730

**TABLA II. COSTOS PARA FABRICACIÓN DE LA CARCASA**

ÍTEM	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTAL
1	8	Hora impresión en 3D	3.000	24.000
2	1	Resina epóxica.	9.430	9.430
3	10	Tornillos de acero inoxidable 1/8" x 2" con tuerca y arandela.	6.000	6.000
4	4	Empaques caucho.	4.000	4.000
5	1	Material consumible (guantes, tapabocas, cintas).	10.000	5.000
6	1	Acrílico y cortes en taller	20.000	20.000
		Total (pesos)		\$68.430

Comparando nuestro sistema con los módems comerciales LinkQuest, Teledyne Benthos y uno diseñado en Woods Hole Oceanographic Institute de la Tabla I, podemos ver que superan de forma considerable en precio al nuestro convirtiéndose así en una alternativa de costo moderado a los diseños de módems existentes y aún más cuando este se comprende de emisor y receptor.

Se debe tener en cuenta que el precio de los módems comerciales se debe a los precios del mercado, mientras que nuestro sistema depende únicamente del costo de las piezas y dispositivos sumándole el de mano de obra.