

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**Diseño e Implementación de un Sistema Amplificador para Tres
Hidrófonos con Filtrado y Digitalización de Señal**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

José Antonio Osada Mochizuki

ASESOR: Francisco F. Cuellar C.

Lima, septiembre de 2016

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se presenta el diseño, implementación y los resultados de las pruebas de un sistema de amplificación, filtrado en frecuencia y adquisición de datos para un arreglo de tres hidrófonos de tipo piezoeléctrico que serán utilizados por un vehículo submarino operado remotamente. El sistema debe monitorear hasta tres hidrófonos piezoeléctricos teniendo control de ganancia para los tres canales, siendo la máxima de por lo menos 40dB. El ancho de banda de los amplificadores abarca desde 1 Hz hasta 100KHz. Cada canal cuenta con cuatro filtros de 4to orden; dos pasa-altos de 0.1 y 10 Hz y dos pasa-bajos de 100 Hz y 30 KHz. Los cuáles serán seleccionables en base a los requerimientos de las pruebas a realizar. Un sistema de digitalización de señales permite capturar las ondas dentro de su ancho de banda. Todo esto se encuentra energizado por un sistema de regulación de voltaje de bajo ruido para asegurar la pureza de la señal capturada. Dado que este sistema fue desarrollado para formar parte de un vehículo submarino operado remotamente (ROV), su diseño e implementación también responden a la necesidad de acoplarse en el recipiente de forma cilíndrica en el cual va a ser alojado. Este arreglo además de capturar la información acústica para luego ser almacenada y procesada, permitirá determinar la localización relativa de la fuente de sonido mediante la triangulación de las señales obtenidas por el arreglo de hidrófonos, del cual se presentan resultados experimentales que demuestran la viabilidad del concepto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	vi
1 PRESENTACIÓN DEL PROYECTO.....	01
1.1 PROBLEMÁTICA.....	01
1.2 ANTECEDENTES.....	02
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	05
1.4 FORMULACIÓN DE PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	05
1.5 METODOLOGÍA.....	07
2 DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO.....	08
2.1 PRESENTACIÓN DEL CONCEPTO.....	08
2.2 SISTEMA PREAMPLIFICADOR.....	09
2.3 SISTEMA AMPLIFICADOR.....	12
2.4 SISTEMA DE FILTRADO.....	13
2.4.1 Filtro pasa-altos de 0.1 Hz.....	15
2.4.2 Filtro pasa altos de 10 Hz.....	16
2.4.3 Filtro pasa-bajos de 0.1 KHz.....	17
2.4.4 Filtro pasa-bajos de 30 KHz.....	18
2.4.5 Sistema seleccionador de filtros.....	19
2.5 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	20
2.6 SISTEMA DE CONTROL.....	21
2.7 FIRMWARE DE PRUEBA PARA EL MICROCONTROLADOR.....	23
2.8 ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO.....	25
3 EXPERIMENTOS Y RESULTADOS.....	26
3.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	27
3.2 EXPERIMENTOS DEL SISTEMA EN EL AGUA.....	31
CONCLUSIONES.....	40
RECOMENDACIONES.....	41
BIBLIOGRAFÍA.....	42

Glosario de Términos

ADC	Conversor Analógico - Digital
AUV	(Autonomous Underwater Vehicle) Vehículo submarino autónomo
COG	Código EIA para el capacitor NPO
dB	Decibelio
DC	Corriente continua, Corriente Directa
EIA	(Electronic Industries Alliance) Asociación de compañías electrónicas de EEUU.
ESR	(Equivalent series resistance) Resistencia equivalente en serie
FINCyT	
GND	(Ground) Voltaje de referencia asignado a 0V
Hz	Hertz
JFET	(Junction Gate Field Effect Transistor) Tipo de transistor controlado por voltaje
KHz	Kilohertz
KSPS	Mil muestras por segundo
LDO	(Low Drop Out) Tipo de regulador lineal de voltaje
MHz	Megahertz
MIPS	Un millón de instrucciones por segundo

MUX	Multiplexor
mV	Milivoltio
NBR	(Nitrile Butadiene Rubber) Tipo de caucho sintético de alta resistencia
NPO	Tipo de Capacitor inmune a variaciones de temperatura
PCB	(Printed Circuit Board) Circuito impreso.
PCBA	(Printed Circuit Board Assembly) Circuito impreso ensamblado.
PGA	(Programmable Gain Amplifier) Amplificador de ganancia programable
PUCP	
RISC	(Reduced Instruction Set Computer) Arquitectura de computador con conjunto reducido de instrucciones
ROV	(Remote Operated Vehicle) Vehículo operado remotamente
SPI	(Serial Peripheral Interface) Tipo de comunicación serial síncrona
TDOA	(Time Difference of Arrival) Diferencia del tiempo de arribo
USART	Tipo de Bus para comunicación serial
V	Voltio

Listado de Figuras

- Figura 1.2-1 Modelado de emisión de sonidos producido por el objetivo
- Figura 1.2-2. Prototipo del AUV Serafina Mk II
- Figura 2.1-1. Diagrama de bloques general del Sistema
- Figura 2.2-1. Hidrófono TC4013 fabricado por Teledyne RESON
- Figura 2.2-2. Diagrama eléctrico del hidrófono
- Figura 2.2-3. Etapa preamplificadora
- Figura 2.3-1. Etapa Amplificadora de Ganancia Programable.
- Figura 2.4.1-1. Circuito esquemático del filtro pasa-altos de 0.1 Hz
- Figura 2.4.1-2. Diagrama de Bode del filtro pasa-altos de 0.1
- Figura 2.4.2-1. Circuito esquemático del filtro pasa-altos de 10 Hz
- Figura 2.4.2-2. Diagrama de Bode del filtro pasa-altos de 10 Hz.
- Figura 2.4.3-1. Circuito esquemático del filtro pasa-bajos de 0.1 KHz
- Figura 2.4.3-2. Diagrama de Bode del filtro pasa-bajos de 0.1 KHz.
- Figura 2.4.4-1. Circuito esquemático del filtro pasa-bajos de 30 KHz
- Figura 2.4.4-2. Diagrama de Bode del filtro pasa-bajos de 30 KHz
- Figura 2.4.5-1. Diagrama de bloques del Sistema Seleccionador de Filtros.
- Figura 2.5-1. Esquema de conexión del convertor analógico – digital.
- Figura 2.7-1. Diagrama de flujo del programa de pruebas
- Figura 3.1-1 Pruebas de laboratorio del amplificador para hidrófonos.
- Figura 3.1-2 Pruebas sobre los filtros.
- Figura 3.1-3 Pruebas de ADC

- Figura 3.2-1. Fotografía de la piscina portable
- Figura 3.2-2. Señales de los hidrófonos.
- Figura 3.2-3. Fotografía de la distribución de hidrófonos durante la pruebas
- Figura 3.2-4. Imagen capturada por el osciloscopio de la onda sonora
- Figura 3.2-5 Arreglo en línea de los tres hidrófonos
- Figura 3.2-6 Ensayo del arreglo lineal de hidrófonos en la piscina de pruebas
- Figura 3.2-7 Captura de la señal del osciloscopio durante el ensayo del arreglo lineal
- Figura 3.2-8 Ensayo del arreglo triangular de hidrófonos
- Figura 3.2-9 Captura de la señal del osciloscopio durante el ensayo del arreglo triangular
- Figura 3.2-10 Ensayo del arreglo triangular de hidrófonos; Perturbación hacia el lado derecho
- Figura 3.2-11 Ensayo del arreglo triangular de hidrófonos; Perturbación hacia el lado izquierdo
- Figura 3.2-12 ROV con los hidrófonos instalados.
- Figura 3.2-13 Señales obtenidas durante las pruebas de los hidrófonos instalados en el ROV

Listado de Tablas

- Tabla 3.1-1 Frecuencia de corte real para cada uno de los filtros implementados.
- Tabla 7.6-1 Ganancias obtenidas en el sistema

INTRODUCCIÓN

Muchos procesos que el hombre realiza bajo el agua pueden tener efectos nocivos en contra del ecosistema acuático, como por ejemplo la pesca con explosivos, la prospección sísmica para la búsqueda de hidrocarburos e incluso, el sonido que produce el movimiento de las embarcaciones motorizadas en el litoral.

Los hidrófonos son sensores que pueden captar las ondas mecánicas producidas en el agua y transformarla en impulsos eléctricos. Estos sensores, en su mayoría, están constituidos por un transductor piezoeléctrico el cual crea señales eléctricas cuando son sometidos a cambios de presión, pero su señal de salida suele ser tan pequeña que requieren de gran amplificación para poder medirla. Es por esto que para poder capturar evaluar y ubicar las ondas mecánicas que son producidas bajo el agua, se requiere de un amplificador de gran ganancia que permita la lectura de múltiples hidrófonos. Este mismo dispositivo puede ser utilizado para el registro de sonidos generados por dispositivos de señalización o por animales acústicamente activos como son los mamíferos marinos.

1 PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

1.1 Problemática

Hasta no hace mucho tiempo, el mar fue considerado por la sociedad humana como una fuente inagotable de recursos, cuya existencia proporcionaba espacio, alimento y servía de sumidero infinito para los residuos de una creciente sociedad en rápido desarrollo. Esta concepción ha impactado en los ecosistemas al punto que se ha hecho patente la limitada capacidad de estos para absorber la presión de la sociedad humana sin perjudicar su integridad estructural y funcional[1].

Adicionalmente a la polución debido a desechos existe la polución por ruido marino, el cual se ha convertido en un tema de alta relevancia. Este problema afecta principalmente a mamíferos marinos que, al vivir en un medio en el que las ondas de sonido se propagan mejor que la de la luz, desarrollaron la habilidad de hacer uso de las ondas sonoras para desplazarse, cazar, protegerse de sus depredadores e incluso buscar pareja[2].

La existencia de ruido marino ocasiona el enmascaramiento de los sonidos que produce la misma especie para comunicarse así como los producidos por sus depredadores. También reduce temporal e incluso permanentemente la habilidad de estos animales de percibir sonido al variar su nivel de audición. Además, al igual que en los humanos, en los animales el ruido produce estrés, afectando su sistema inmunológico y reduciendo su tasa de reproducción[2][3][4].

Al abordar el tema de afección de vida marina debido a ondas mecánicas, destacan dos actividades que en nuestro medio deberían de estar efectivamente reguladas: La pesca con explosivos y la prospección sísmica del fondo marino. Si bien la primera, que es considerada ilegal debido a los evidentes daños que causa al medio marino, se sigue practicando en algunos lugares de nuestro litoral, La prospección sísmica, que en nuestro medio es utilizada para la búsqueda de hidrocarburos, todavía debe ser estudiada con mayor detenimiento para evaluar sus efectos sobre el ecosistema marino.

Para poder realizar un adecuado monitoreo en el ambiente en donde estas situaciones se presentan, se requiere de un sistema capaz de obtener las señales que viajan en el medio donde estas ocurren, es decir bajo el agua. Por ello es necesario el uso de sensores capaces de captar las señales acústicas del agua, así como de un sistema que acondicione estas señales de tal manera que se puedan analizar y extraer la información de interés. Este sistema debe ser capaz de instalarse adecuadamente en el vehículo submarino que los transporte.

1.2 Antecedentes

El uso de hidrófonos, para realizar diferentes estudios en medios acuosos, es ampliamente difundido, debido a la versatilidad de este tipo de dispositivos para la captura de ondas mecánicas dentro del agua. Este dispositivo junto con un correcto sistema de amplificación y digitalización de la señal capturada permite que la información pueda ser almacenada y luego procesada.

Tomando en cuenta que los hidrófonos pueden capturar señales que incluso están fuera del rango audible para los animales, se pueden realizar estudios como los que MacArthur, L.D. et. al. desarrollaron utilizando hidrófonos, para realizar mediciones de telemetría acústica sobre distintos animales marinos[5][6][7]. Esto consiste en la localización, mediante triangulación[8], de un espécimen al cual se le ha fijado un transmisor ultrasónico, permitiendo así estudiar el comportamiento de los animales sin que ellos estén influenciados por la presencia humana. De forma similar Zimmer, W. M. X., et. al. utilizan hidrófonos para el monitoreo acústico pasivo[9][10][11] que, a diferencia del método anterior, ya no utiliza transmisores de ningún tipo (Figura 1.2-1). Este es el método común utilizado en la detección de cetáceos y la evaluación de su comportamiento bajo el agua[10] dado que estos animales son acústicamente activos en su hábitat, minimizando así la interacción de los humanos con los animales en estudio.

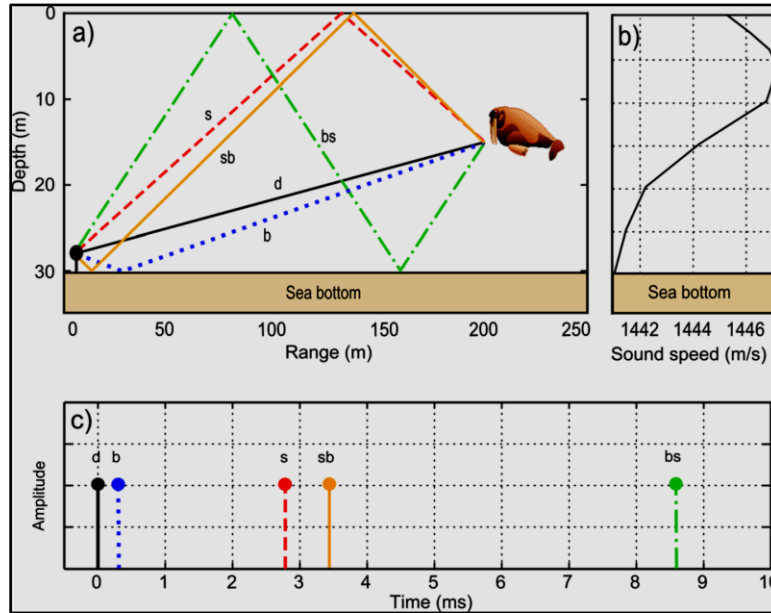


Figura 1.2-1. a) Modelado de emisión de sonidos producido por el objetivo a 15m de profundidad y la forma en que se refleja en la superficie y el fondo del mar. b) velocidad del sonido en agua de acuerdo a la profundidad. c) Captura de los reflejos en diferentes tiempos debido a las diferentes distancias recorridas. Fuente: [10]

Por otro lado, Gervaise, C. et. al. realizan inversiones geoacústicas con el objetivo de caracterizar el fondo oceánico[12]. Este proceso se vale de parámetros como velocidad, compresión, atenuación y desfase de la señal para que, mediante el uso de métodos computacionales, puedan estimar la geometría, número de capas de sedimento, densidad del suelo, etc. J-C. Le Gac, et. al. prueban con éxito, en las costas de Portugal, un método de inversión geoacústica utilizando un solo hidrófono y trabajando a bajas frecuencias (300-800Hz). Asimismo, Rutenko, et. al. realizan estudios con hidrófonos sobre la propagación de ondas de baja frecuencia y ondas sísmicas durante un proceso similar a la prospección del suelo submarino para la búsqueda de hidrocarburos en la Bahía Vityaz en Mar de Japón.[13] Kiguchi, Tsutomu et. al. caracterizan la permeabilidad del suelo marino en la falla de Nojima en Japón, haciendo uso de un método que involucra múltiples hidrófonos los cuales realizan un proceso llamado perfilado sísmico vertical[14].

Navinda Kottege y Uwe R. Zimmer realizan experimentos con hidrófonos para la localización de pequeñas naves submarinas, (Figura 1.2-2) logrando con éxito este objetivo dentro de un rango de 90 metros y llegando a una precisión de 5cm dentro del rango cercano de la nave (10m o menos)[15].

Dejando de lado los hidrófonos y centrándose en el acondicionamiento de la señal que estos producen, JJ Martines et. al. desarrollan e implementan para el Departamento de Energía de U.S. un dispositivo de grabación de sonidos bajo el agua capaz de recolectar data de hasta dos sensores en simultáneo, pero únicamente trabajan en aplicaciones dentro del rango de frecuencias de 20Hz a 15KHz [16].

También existen dispositivos comerciales que son utilizados para la amplificación de señales de hidrófonos como el EC6061 de Teledyne Reson[17] y el AH-1100 Preamplifier de Onda[18] que, si bien cumplen la mayoría de especificaciones requeridas para el sistema de monitoreo de señales submarinas, su ganancia y la selección de los filtros limitantes de frecuencia no pueden ser controlados remotamente, lo cual sería una limitante de ser instalados dentro de un ROV.

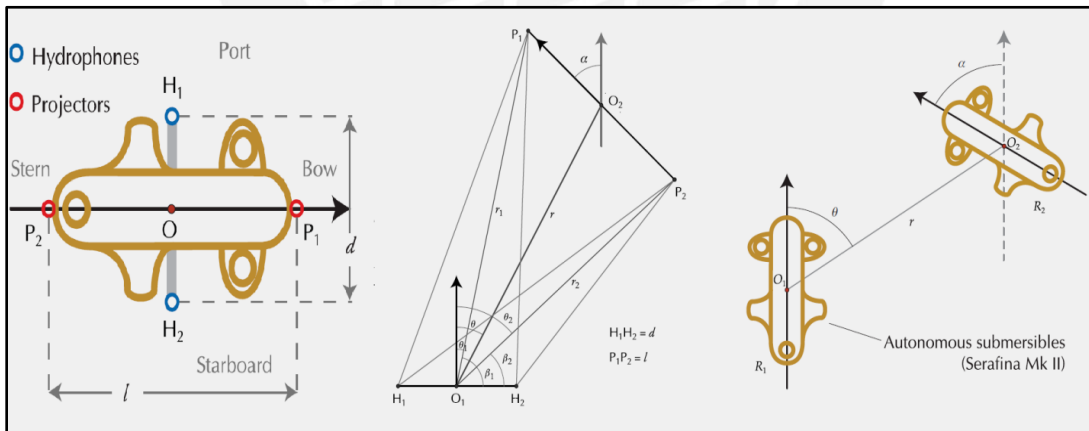


Figura 1.2-2. Prototipo del AUV Serafina Mk II. Las unidades logran detectarse entre sí gracias a dos Hidrófonos (H_1 y H_2) los cuales detectan las señales emitidas por los emisores (P_1 y P_2) que posee cada unidad. Fuente: [15]

1.3 Justificación

El sonido es una forma de energía que se propaga en el agua con menor atenuación en comparación a otras formas de energía. Esta es una forma de energía dinámica (no se puede almacenar) que se dispersa típicamente en todas direcciones, transformando su inicial energía cinética en energía potencial, la cual es manifestada como un cambio en la presión en el agua[18]. Asimismo, los hidrófonos son dispositivos usados en la detección de sonido en los líquidos. Estos convierten, en la práctica, la señal de velocidad o presión acústica en una señal eléctrica.

Se desea implementar un sistema basado en la captura de sonidos dentro del agua para realizar diferentes estudios acerca de la diversidad marina, la interacción del hombre sobre el medio marino (polución sonora) así como la procedencia u origen de estos sonidos mediante el método TDOA (Time Difference of Arrival). Para poder lograr la adquisición de la información que entregue el hidrófono es necesario desarrollar un amplificador de alta ganancia y bajo ruido[19] que se adecúe a las características del sensor. Este sistema se debe implementar de tal forma que pueda ser instalado dentro de un ROV, lo cual le permitirá al sistema ubicarse dentro de la zona de interés para el estudio que se desea realizar.

1.4 Formulación de propuesta de solución

Se propone el desarrollo de un sistema que capture las señales de tres hidrófonos y las entregue a una unidad de procesamiento en formato digital.

1.4.1 Objetivos.

Los objetivos de este proyecto son:

- Diseñar y construir un dispositivo que amplifique, filtre y digitalice las señales acústicas submarinas provenientes de tres hidrófonos.
- Implementar el sistema de tal forma que este sea acoplable al contenedor submarino que lo va a albergar.

- Corroborar con pruebas en laboratorio que el sistema funciona correctamente.
- Realizar pruebas del sistema en campo y documentar los resultados obtenidos.

1.4.2 Alcances.

Los alcances del sistema corresponden a una necesidad del proyecto de Monitoreo oceanográfico (FINCyT - PUCP) cuya justificación no es parte de la presente tesis:

- Capacidad para trabajar con 3 hidrófonos
- Control de ganancia para los 3 canales
- Ganancia máxima superior de por lo menos 40dB
- Cada canal deberá admitir señales de 1Hz a 100Khz provenientes de los hidrófonos
- Cada canal tendrá dos filtros paso-altos de 0.1Hz y 10Hz seleccionables
- Cada canal tendrá dos filtros paso-bajos de 100Hz y 30KHz seleccionables
- Se busca el menor nivel de ruido posible en la salida del sistema
- El sistema deberá implementarse de modo que sea instalable en un ROV.

1.4.3 Hipótesis.

Un sistema que pueda capturar fielmente las señales acústicas que se presentan en el fondo del medio acuático permitirá el adecuado monitoreo de la zona de estudio para poder tomar las acciones convenientes en caso de que la situación lo requiera, como por ejemplo la detección de pesca con explosivos. Así como también permitirá el adecuado estudio de

especies acuáticas que sean acústicamente activas o de fenómenos que ocurran en ese entorno y que generen ondas mecánicas en el medio.

Características como una amplificación libre de distorsión, el filtrado adecuado de las señales de interés, así como la digitalización de las señales capturadas por los hidrófonos, permitirán el almacenamiento y posterior estudio, así como determinar la localización de las fuentes de estas señales.

1.5 Metodología

En primer lugar se revisará literatura que justifique el desarrollo de un sistema de amplificación y filtrado de las señales provenientes de los hidrófonos. Se obtendrá información acerca de las características, comportamiento y modelamientos de los hidrófonos piezoeléctricos. También se revisará literatura acerca de desarrollos similares relacionados al acondicionamiento de señales provenientes también de hidrófonos piezoeléctricos.

En segundo lugar se seleccionarán los componentes y se diseñarán los circuitos esquemáticos concernientes a la etapa de amplificación, filtrado y digitalización de la señal. Posteriormente se desarrollará el PCB el cual deberá ser dimensionado acorde al lugar donde va a ser alojado el sistema. Se presentarán adicionalmente en esta etapa los diagramas de flujo del programa de control así como la lista de los componentes a utilizar.

En tercer lugar se implementará el sistema propuesto para efectuar las pruebas de validación y corroborar que este cumple con los requerimientos propuestos.

Finalmente como cuarto paso se presentarán los resultados experimentales obtenidos de las pruebas realizadas, así como las conclusiones y propuestas para futuras mejoras del sistema.

2 DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

2.1 Presentación del concepto

El sistema implementado responde a la necesidad de monitoreo de señales sonoras en el agua que sobrepasan las frecuencias de audición humana. Estas señales, además de determinar la identidad de su fuente, (Ejm. Una ballena del pacífico, *Eubalaena japonica*) pueden también revelar su localización a partir del método de triangulación de señales (TDOA). Para lograr esto se requiere la utilización de transductores como los hidrófonos, que son capaces de transformar las ondas sonoras del agua en impulsos eléctricos, alojados, en nuestro caso, en un vehículo submarino operado remotamente (ROV) el cual debe de contar con un sistema integrado de amplificadores, filtros y digitalizadores de señal que permitan la recolección de información de varios hidrófonos (Figura 2.1-1).

Se requiere del acondicionamiento de la señal de hasta tres hidrófonos piezoeléctricos teniendo control de ganancia para los tres canales siendo la máxima de por lo menos 40dB. El ancho de banda de los amplificadores abarca desde 1 Hz hasta 100KHz. Cada canal cuenta con cuatro filtros de 4to orden cada uno; dos pasa-altos de 0.1 y 10 Hz y dos pasa-bajos de 100 Hz y 30 KHz, los cuáles serán seleccionables en base a los requerimientos de las pruebas a realizar. Un sistema de digitalización de señales permite capturar las ondas y entregar los datos por protocolo SPI. Todo esto se encuentra energizado por un sistema de regulación de voltaje lineal de bajo ruido para asegurar la pureza de la señal capturada. Dado que este sistema fue desarrollado para formar parte de un ROV, su diseño e implementación también responden a la necesidad de acoplarse en el recipiente de forma cilíndrica en el cual va a ser alojado.

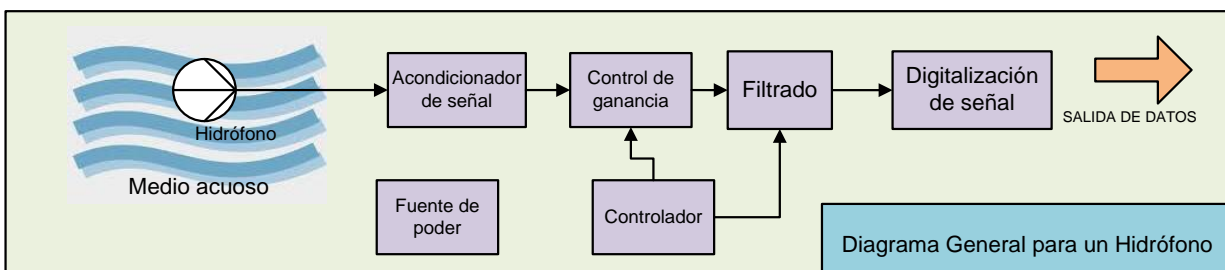


Figura 2.1-1. Diagrama de bloques general del Sistema para un Hidrófono (Fuente propia).

2.2 Sistema Preamplificador

El sistema de preamplificación conforma el bloque de acondicionamiento de señal y es el encargado de captar la señal directamente del transductor, en este caso, del hidrófono. Esta etapa se caracteriza por tener su entrada diseñada de tal manera que permita la captura de la señal eléctrica que viene desde el transductor, de manera efectiva dentro del ancho de banda deseado. Asimismo, dado que las señales capturadas del transductor se encuentran en el orden de unos pocos milivoltios (0-10mV), se requiere que esta etapa sea inmune a ruido debido a que, de estar presente, también será amplificado junto con la señal.

El hidrófono utilizado es el TC4013 de Teledyne RESON (Figura 2.2-1) el cual fue seleccionado y adquirido dentro del proyecto de Monitoreo Oceanográfico. Este puede operar en el rango de frecuencias de 1Hz hasta 170KHz, es de tipo piezoeléctrico con una capacitancia nominal de 3.4nF (Figura 2.2-2) por lo cual, para que la frecuencia de corte inferior del ancho de banda del sistema sea menor a 1Hz se elige una impedancia de entrada para el preamplificador del orden de 100M Ω . (Ver anexo 7.1)

Debido a que la configuración de la salida del transductor no es diferencial, sino una línea de señal y una de armadura (chasis), se requiere que la entrada del preamplificador sea referenciada a tierra, por lo que para poder trabajar con este tipo de acople, el preamplificador debe ser alimentado con una fuente simétrica.

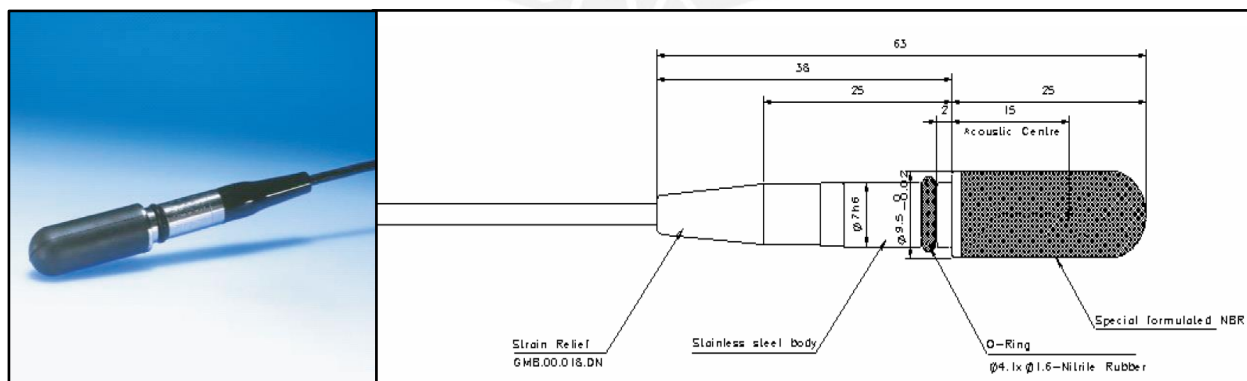


Figura 2.2-1. Hidrófono TC4013 fabricado por Teledyne RESON. Está recubierto de NBR que es una goma protectora resistente al agua de mar. Para más detalles técnicos ver el anexo 7.2 (Fuente: Hoja de datos del TC4013).

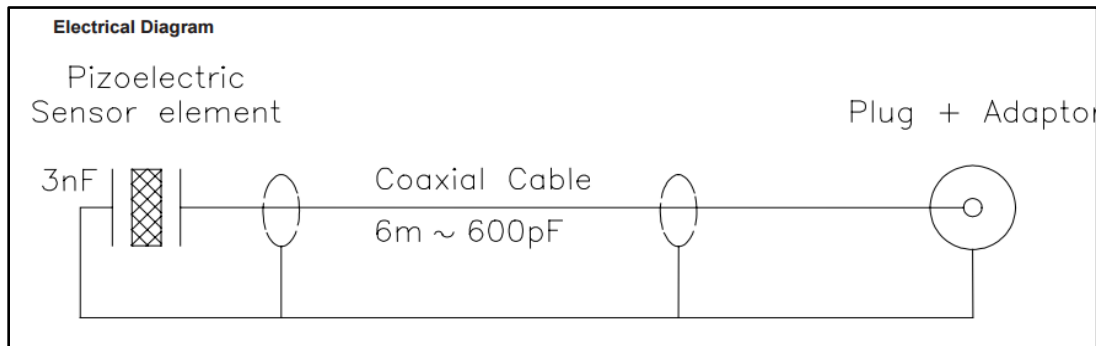


Figura 2.2-2. Diagrama eléctrico del hidrófono. (Fuente: Hoja de datos del TC4013)

Acorde a los requerimientos establecidos, encontramos como base del preamplificador al circuito integrado AD743 de ANALOG DEVICES y el LT1792 de Linear Technology los cuales son amplificadores operacionales de precisión, de muy bajo ruido y entradas de tipo JFET que tienen corrientes de polarización en el orden de picoamperios, característica que permitirá lograr muy altas impedancias de entrada en el preamplificador. Además el valor típico de capacitancia en sus entradas, para ambos amplificadores, se encuentra por debajo de los 30 pF lo cual representa la centésima parte de la capacitancia del sensor, asegurándose así que esta no interfiera a la señal que se desea capturar.

Se selecciona para esta etapa, el amplificador operacional LT1792 de Linear Technology debido a su costo, el cual es cercano a la mitad del costo del AD743. (Comparación realizada a mediados del presente año 2015.)

El amplificador operacional seleccionado se encuentra configurado como un amplificador no inversor. La ganancia del preamplificador está determinada para un valor aproximado de 20 veces (Ver anexo 7.3) que equivale a unos 13dB.

El preamplificador se encuentra alimentado por una fuente simétrica de 10V provenientes de reguladores de bajo ruido, los cuales serán detallados más adelante.

Las resistencias utilizadas en la implementación del circuito, al igual que en el resto del sistema, son de tipo de lámina delgada (Thin film technology). Este tipo de resistencias presentan valores más exactos (menores tolerancias), menor ruido, menor capacitancia e inductancia parásita, mayor estabilidad térmica y retienen sus características por mayor tiempo (Tiempo de vida)[21]. En contraparte, tienen mayor costo que las resistencias comunes (Thick film) pero no son tan costosas como otras tecnologías que logran mejorar las características de las resistencias como es el caso de resistencias de lámina de metal (metal film)

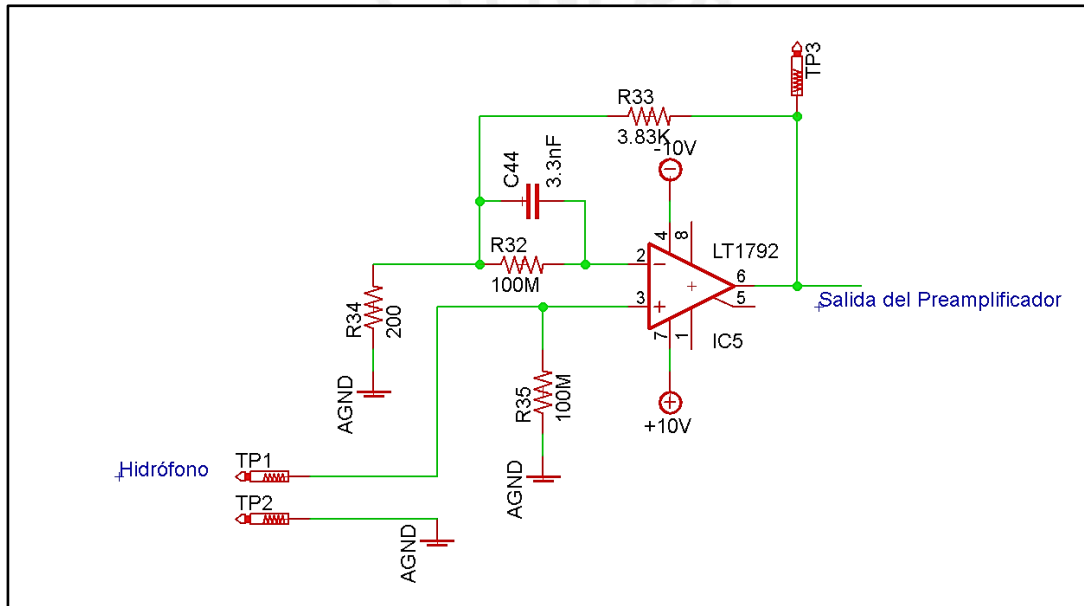


Figura 2.2-3. Etapa preamplificadora. Esta recibe directamente las señales del hidrófono y las entrega a la siguiente etapa que es la de amplificación programable. (Fuente Propia)

2.3 Sistema Amplificador

La etapa de amplificación es la encargada de suministrar la señal proveniente del hidrófono con la amplitud deseada hacia la etapa de filtrado.

Este está conformado por dos componentes básicos; un amplificador operacional dual de bajo ruido y un amplificador de ganancia programable (PGA).

Tomando en cuenta los requerimientos de esta etapa, podemos escoger amplificadores operacionales como el AD8022 de Analog Devices o el EL2227 de Intersil. Dado el requerimiento de menor ruido posible escogemos el circuito integrado EL2227 (amplificador operacional dual) el cual, en nuestro sistema, es utilizado como adaptador de impedancias a la vez que es utilizado como amplificador de ganancia fija.

Uno de los amplificadores del EL2227 está configurado como seguidor de voltaje ya que se requiere la adaptación de impedancias entre el condensador de desacoplo de continua en la salida del preamplificador, utilizado para desplazar el nivel DC de 0V a 2.5V, y la entrada del segundo amplificador, el cual está configurado como amplificador inversor con una ganancia aproximada de 5 V/V (ver anexo 7.4).

El condensador de desacoplo de continua forma junto con una resistencia un filtro pasabajos de primer orden. La constante de tiempo de este arreglo es equivalente a un segundo, valor con el cual se asegura que esta etapa no interfiere en el ancho de banda del sistema. (ver anexo 7.5).

El MAX9939 de Maxim Integrated, el cual es un amplificador de ganancia programable, posee valores de ganancia en su salida que van de 0.2 hasta 157 veces la amplitud de la señal de entrada. Este recibe la señal proveniente del amplificador de ganancia fija (EL2227) y la envía hacia los filtros, multiplicado por la ganancia que ha sido programada en el dispositivo a través de comandos, recibidos mediante protocolo SPI, provenientes del microcontrolador. Se presenta la tabla de ganancias obtenidas en el anexo 7.6

A diferencia del preamplificador que utiliza alimentación simétrica, cuyo motivo es explicado en el acápite anterior, el resto del circuito utiliza alimentación simple con una misma referencia (GND). Debido a esto se debe de agregar una componente DC a la

señal para que esté dentro del rango de trabajo del resto de los componentes comenzando por el PGA de esta etapa.

La componente DC usada en esta etapa es proporcionada por el circuito integrado MAX3393 siendo obtenida de uno de los amplificadores operacionales internos del PGA, el cual está configurado para entregar la mitad del voltaje de alimentación. En nuestro caso 2.5V, ya que tanto el MAX3393 como el EL2227 son alimentados por una fuente de 5V.

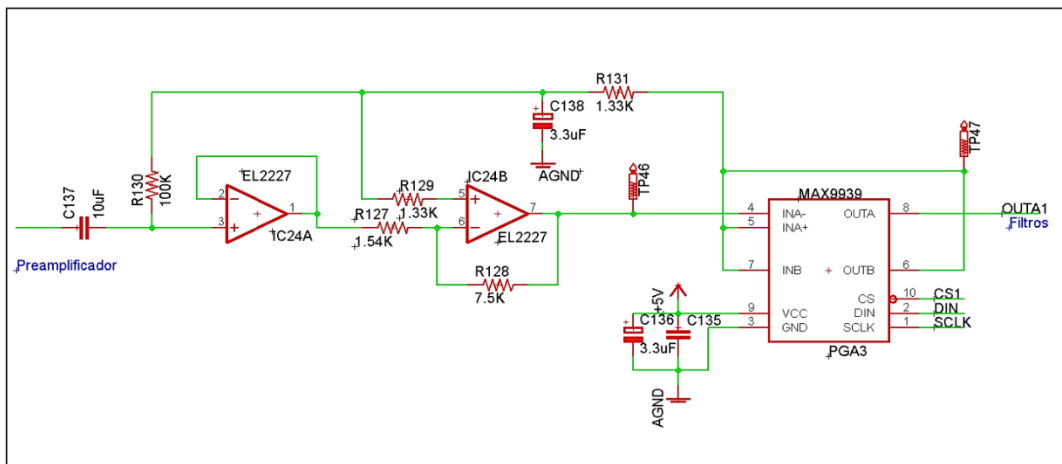


Figura 2.3-1. Etapa Amplificadora de Ganancia Programable. La ganancia programable es configurada en el MAX9939 mediante protocolo SPI. (Fuente propia)

2.4 Sistema de Filtrado

El sistema cuenta con 4 filtros de 4to orden cada uno. Dos pasa-altos con frecuencia de corte en 0.1Hz y 10Hz y dos pasa-bajos con frecuencia de corte en 0.1KHz y 30KHz. Estos son seleccionables por el microcontrolador encargado de gestionar el funcionamiento del sistema, de manera que se puede escoger entre uno o ningún filtro pasa-altos en adición con uno o ningún filtro pasa-bajos.

La configuración de los filtros es tipo butterworth dado que este tipo de filtro, en contraste al Chevyshev, cuenta con una respuesta plana en su banda de paso y a diferencia del tipo Bessel que también tiene una respuesta plana, su atenuación es más rápida pasada la frecuencia de corte. [22]

Un cuádruple amplificador operacional, El OPA4354 de Texas Instruments, el cual posee cuatro amplificadores rail-to-rail de bajo ruido, es la base de cada uno de los filtros. Uno de los cuatro amplificadores operacionales, de cada uno de los filtros, está configurado como seguidor de voltaje, mientras que otros dos conforman cada uno de los filtros en su configuración correspondiente. La salida de cada filtro posee una DC = 2.5V

Dado que las frecuencias de corte de los filtros depende de los valores de las capacitancias y resistencias asociadas al amplificador operacional, se escogieron para la implementación capacitores de tipo cerámico, ya que esta tecnología posee bajo ESR y baja inductancia parásita, Los capacitores seleccionados tienen tolerancia de 2% y coeficiente de temperatura C0G, NPO lo cual indica que no varía su capacitancia nominal dentro del rango de temperatura de trabajo. Las resistencias son del tipo de lámina delgada (Thin film) cuyas características ya han sido mencionadas anteriormente en este documento.

El diseño de los filtros fue realizado mediante el programa de diseño filterPro de Texas Instruments. Los diseños de los filtros fueron analizados con el software SIMetrix/SIMPLIS de SIMetrix Technologies cuyos resultados presentamos a continuación.

NOTA: En los siguientes esquemáticos de los circuitos filtro “VCC” corresponde a 2.5V

2.4.1 Filtro pasa-altos de 0.1 Hz

Filtro pasa-altos de 4to orden con frecuencia de corte en 0.1Hz (Figura 2.4.1-1). El filtro es de tipo Butterworth y la topología del circuito es Sallen-Key. La Figura 2.4.1-2 muestra la ganancia y el desfase de la señal en función de la frecuencia. Se aprecia también la frecuencia de corte situada en 0.1 Hz.

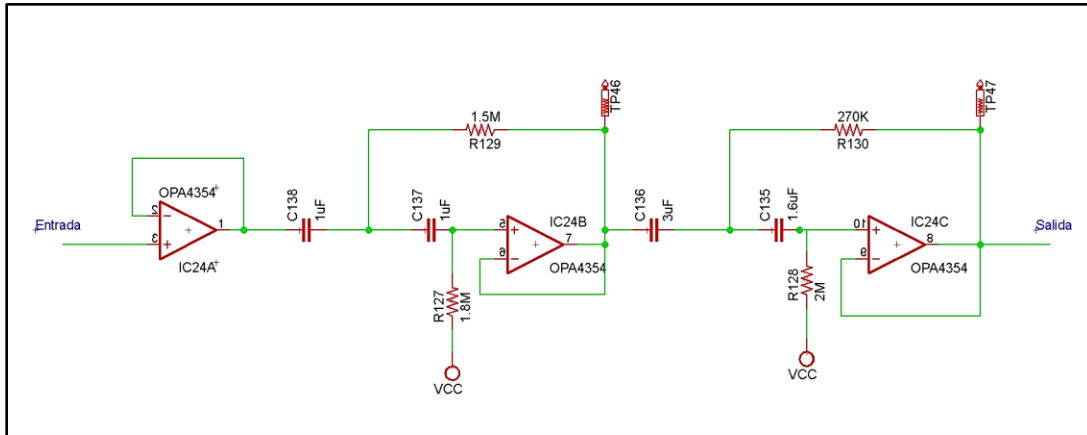


Figura 2.4.1-1. Circuito esquemático del filtro pasa-altos de 0.1 Hz (Fuente propia)

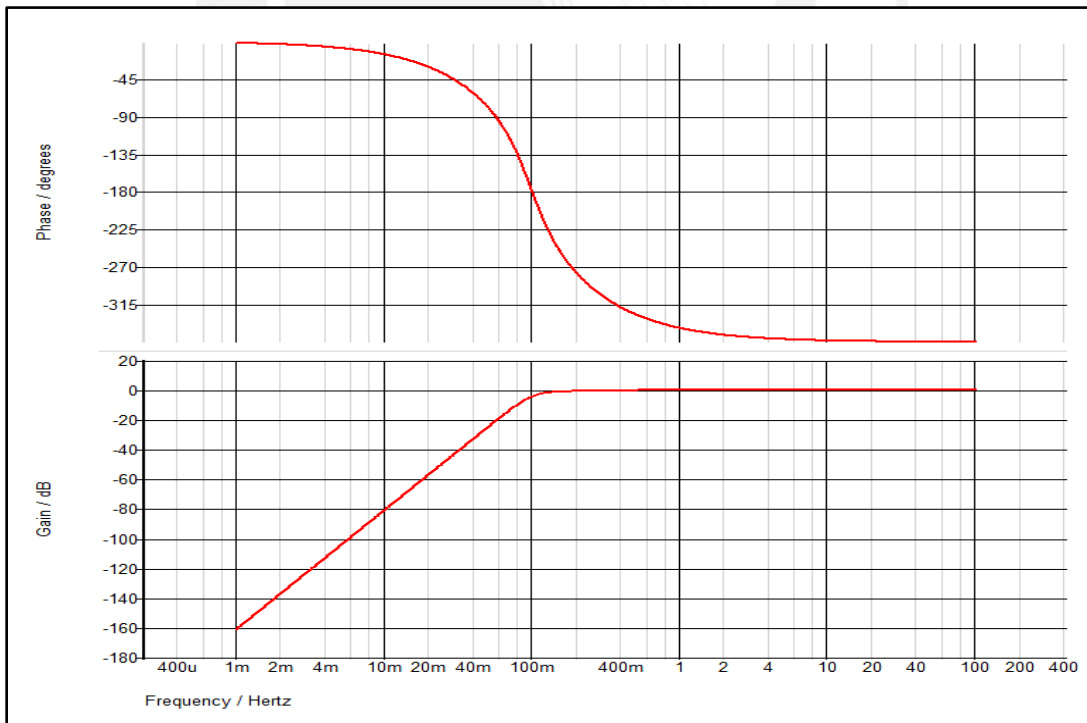


Figura 2.4.1-2. Diagrama de Bode del filtro pasa-altos de 0.1 Hz. (Fuente Propia. Software de simulación: SIMetrix/SIMPLIS)

2.4.2 Filtro pasa altos de 10 Hz

Filtro pasa-altos de 4to orden con frecuencia de corte en 10Hz (Figura 2.4.2-1). El filtro es de tipo Butterworth y la topología del circuito es Sallen-Key. En Figura 2.4.2-2 muestra la ganancia y el desfase de la señal en función de la frecuencia. Se aprecia también la frecuencia de corte situada en 10 Hz.

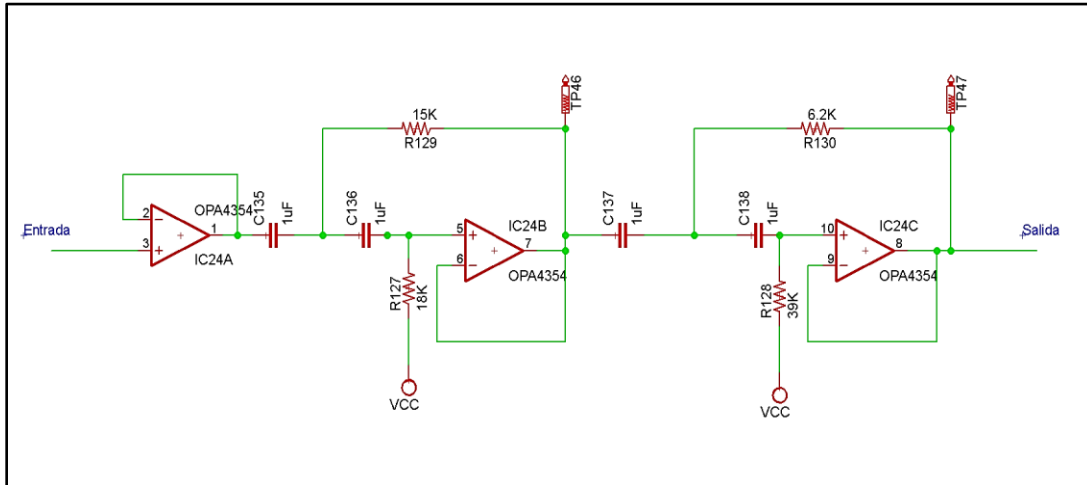


Figura 2.4.2-1. Circuito esquemático del filtro pasa-altos de 10 Hz (Fuente propia)

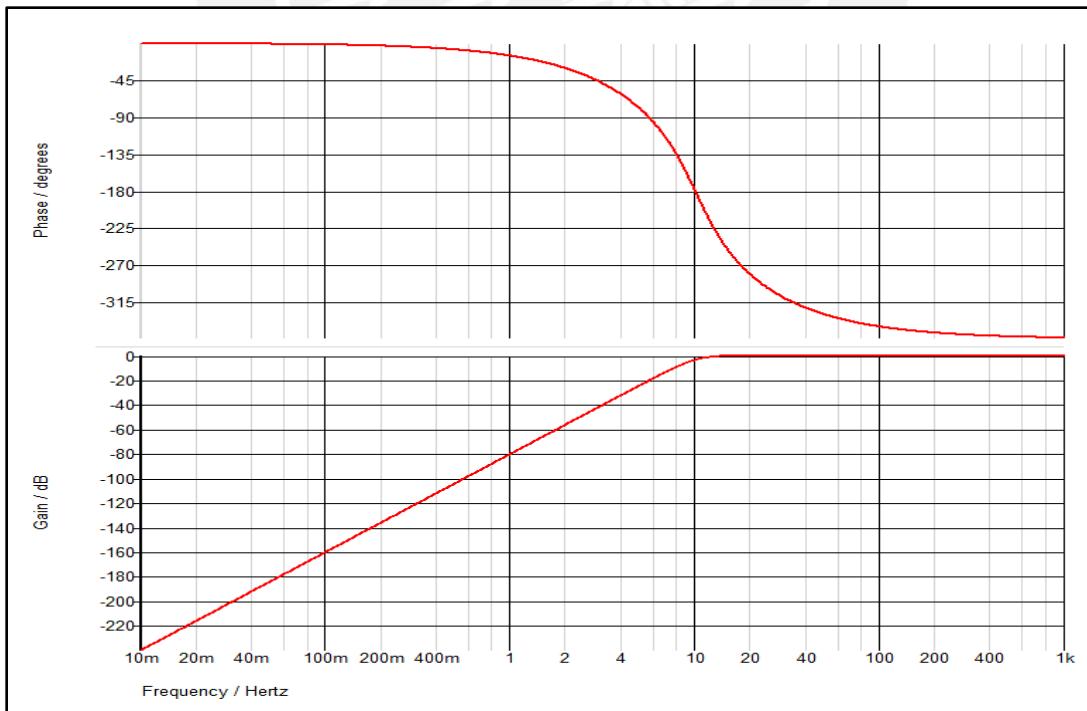


Figura 2.4.2-2. Diagrama de Bode del filtro pasa-altos de 10 Hz. (Fuente Propia. Software de simulación: SIMetrix/SIMPLIS)

2.4.3 Filtro pasa-bajos de 0.1 KHz

Filtro pasa-bajos de 4to orden con frecuencia de corte en 0.1 KHz (Figura 2.4.3-1). El filtro es de tipo Butterworth y la topología del circuito es de múltiple realimentación (Multiple Feedback). En la Figura 2.4.3-2 se Muestra la ganancia y el desfase de la señal en función de la frecuencia. Se aprecia también la frecuencia de corte situada en 0.1 KHz.

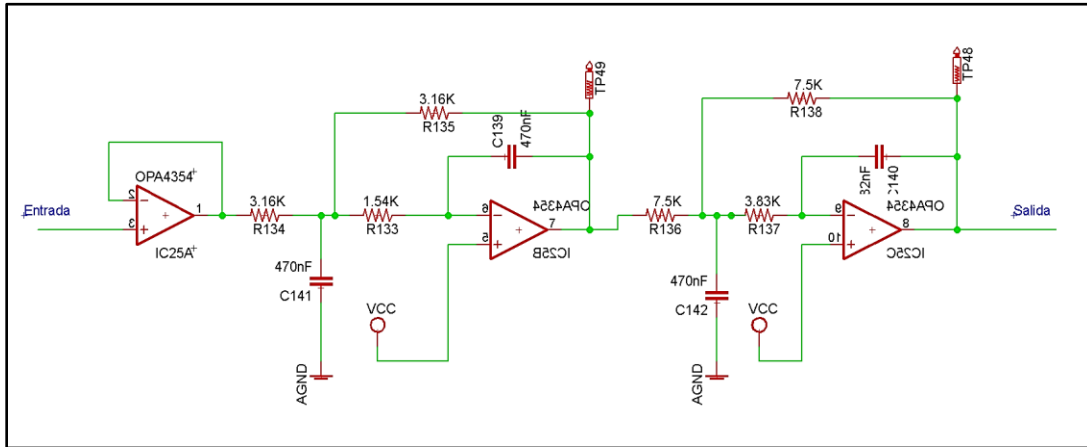


Figura 2.4.3-1. Circuito esquemático del filtro pasa-bajos de 0.1 KHz (Fuente Propia)

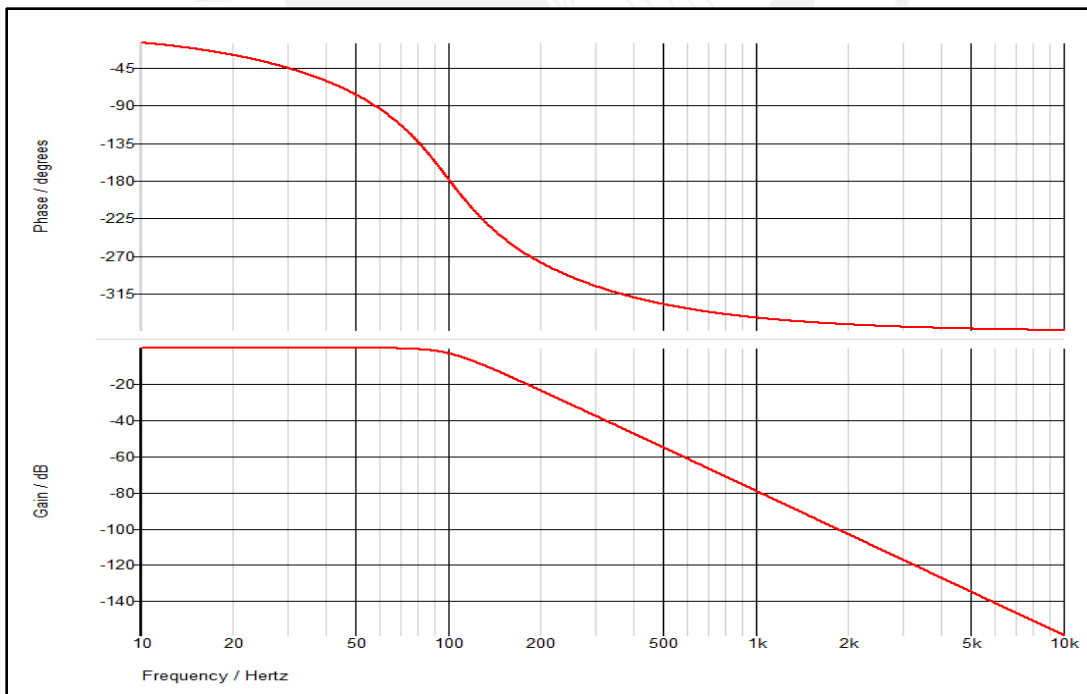


Figura 2.4.3-2. Diagrama de Bode del filtro pasa-bajos de 0.1 KHz. (Fuente Propia. Software de simulación: SIMetrix/SIMPLIS)

2.4.4 Filtro pasa-bajos de 30 KHz

Filtro pasa-bajos de 4to orden con frecuencia de corte en 30 KHz (Figura 2.4.4-1). El filtro es de tipo Butterworth y la topología del circuito es de múltiple realimentación (Multiple Feedback). En la Figura 2.4.4-2. se muestra la ganancia y el desfase de la señal en función de la frecuencia. También se puede apreciar la frecuencia de corte situada en 30 KHz.

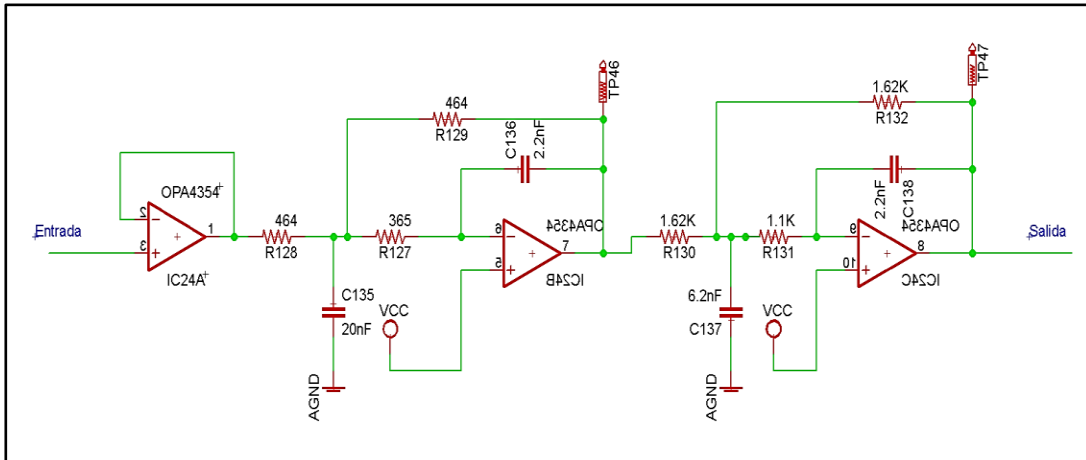


Figura 2.4.4-1. Circuito esquemático del filtro pasa-bajos de 30 KHz (Fuente Propia)

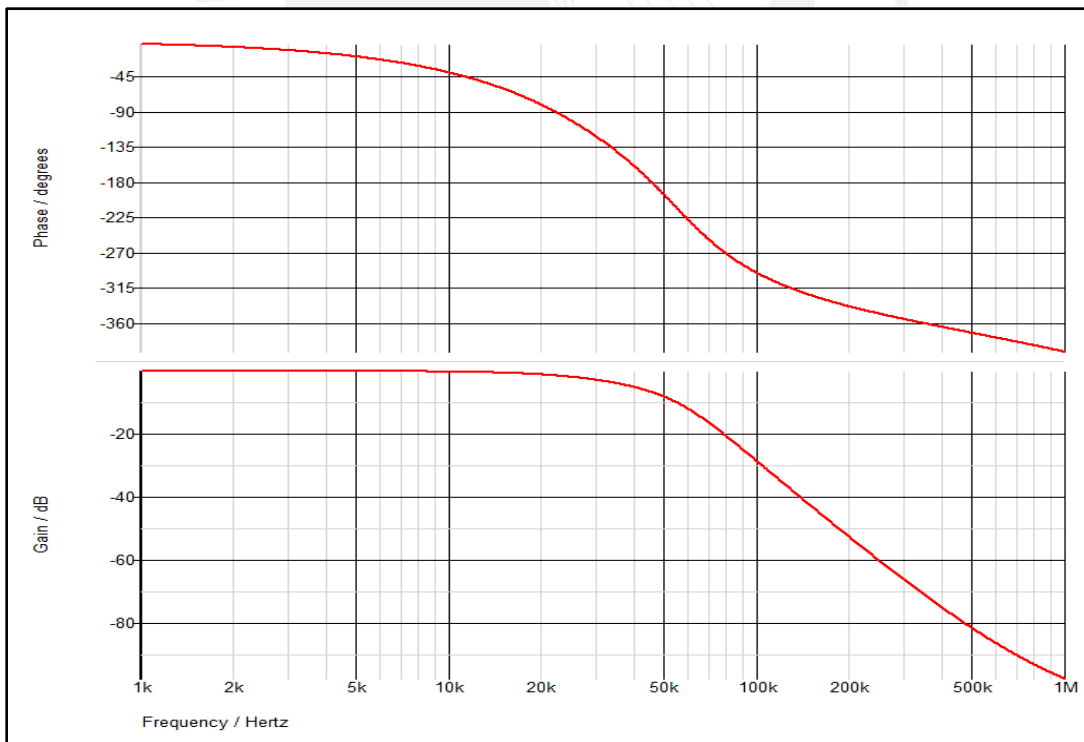


Figura 2.4.4-2. Diagrama de Bode del filtro pasa-bajos de 30 KHz (Fuente Propia. Software de simulación: SIMetrix/SIMPLIS)

2.4.5 Sistema seleccionador de filtros

En esta etapa un multiplexor analógico es utilizado para seleccionar entre los filtros de tal forma que permite que un microcontrolador gestione la selección de los filtros a utilizar. Cumpliendo los requerimientos del sistema se encuentran los circuitos integrados MAX4634 de Maxim y DG9414 de Vishay. Se selecciona el primero dada su menor impedancia en su estado de conducción así como mejores características de aislamiento entre canales. Este circuito integrado permite seleccionar la señal proveniente de hasta cuatro entradas distintas y canalizar la señal seleccionada en una sola salida. Dos pines de entrada de este dispositivo permiten al microcontrolador seleccionar el canal que será conectado a la salida. Al estar el multiplexor alimentado con 5V es capaz de direccionar señales que estén en el rango de 0 a 5V mediante una impedancia típica de 2.5Ω entre la entrada seleccionada y la salida.

Para el sistema seleccionador de filtros, dos multiplexores controlan la selección de los filtros para cada canal (Figura 2.4.5-1). Uno para los filtros pasa-altos y otro para los filtros pasa bajos. En la selección de los filtros pasa-altos, ambos filtros están conectados a la salida del amplificador. El primer multiplexor selecciona entre las salidas de los filtros o del amplificador directamente y envía la señal seleccionada a las entradas de los dos filtros pasa bajos. El segundo multiplexor selecciona entre las salidas de los dos filtros pasa-bajos o la salida directa del primer multiplexor. De esta manera se puede seleccionar uno o ningún filtro pasa-altos y adicionarle la acción de uno o ningún filtro pasa-bajos.

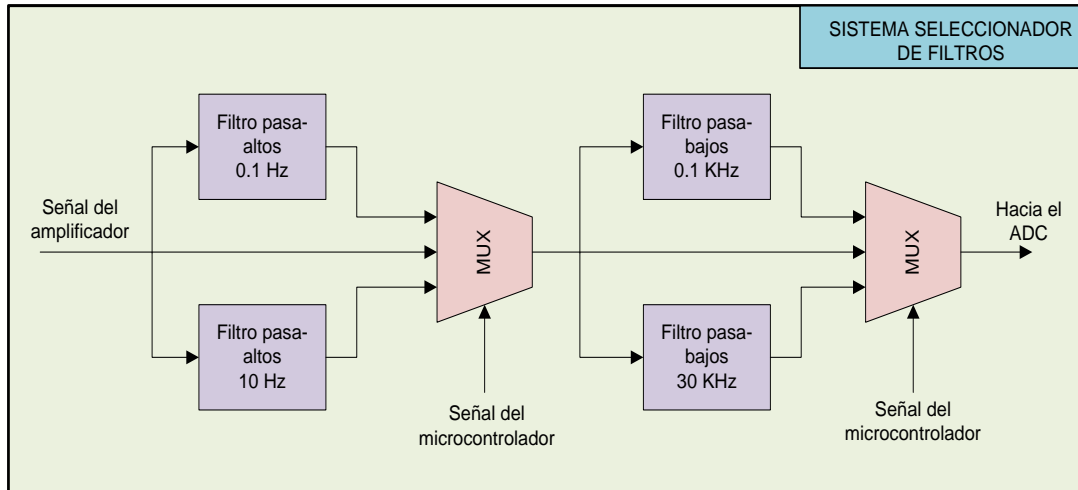


Figura 2.4.5-1. Diagrama de bloques del Sistema Seleccionador de Filtros. El microcontrolador controla el funcionamiento de los multiplexores y así gestiona la selección de los filtros que serán utilizados para cada canal. (Fuente Propia)

2.5 Sistema de Adquisición de Datos.

Como requerimiento del proyecto se solicitó una resolución de 16bits por muestra y dado que se desea muestrear una señal de hasta 100KHz, la frecuencia mínima de muestreo teórico (Nyquits – Shannon) sería de 200 KSPS. Tomando en cuenta estas características se selecciona como base del sistema de adquisición de datos de cada canal a un conversor analógico digital AD7988-5 de Analog Devices. Este es un conversor de 16bits con tasa de muestreo de hasta 500 kSPS. Este circuito integrado tiene la salida de datos compatible con el protocolo SPI y además, cada uno de ellos tiene la capacidad de interconectarse con otros formando una topología “Daisy-Chain” (Ver anexo 7.7) el cual permite conectar una salida digital de un conversor a una entrada digital de otro conversor de manera que los datos que genera uno de ellos pasa a través del otro y permite generar así una trama de datos más larga con la información de ambos conversores. Esto permitiría obtener la data de los tres canales con un solo bus SPI de ser necesario. Otra ventaja en cuanto a la interface de salida de este conversor es que la alimentación de esta etapa es independiente de la alimentación del resto del circuito integrado, permitiendo así que su salida sea compatible con dispositivos que funcionen a otros voltajes como 5V, 3.3V o 1.8V inclusive.

En esta etapa se espera que la señal a convertir se encuentre dentro del rango de 0 a 5V por ello se usa como voltaje de referencia 5V provenientes de una fuente de voltaje de referencia de bajo ruido, el ADR02 de Analog Devices.

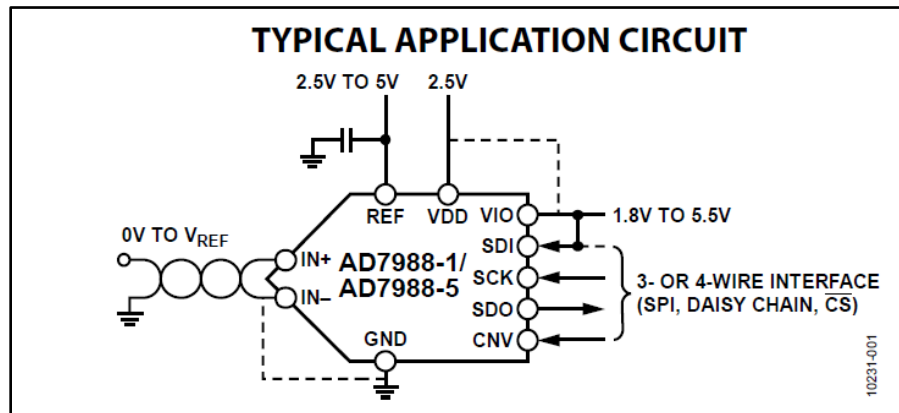


Figura 2.5-1. Esquema de conexión del convertor analógico – digital. El voltaje de referencia usado es 5V. Los voltajes de la salida de datos están definidos por el circuito receptor, otorgando así flexibilidad en la conexión de esta etapa. (Fuente: Hoja de datos del convertor AD9788-5)

2.6 Sistema de Control.

Para la administración del sistema se requiere controlar seis multiplexores de la etapa de filtrado los cuales requieren dos señales de control cada una. Esto representa doce puertos IO para la selección de los filtros. Para la etapa de control de ganancia se requiere un puerto SPI y tres puertos IO para la selección del PGA a programar. Adicionalmente se requiere de un puerto UART para la comunicación con el sistema de control del ROV.

Un microcontrolador ATmega88 de ATMEL conforma la etapa de control del sistema amplificador. Básicamente su función es recibir un comando desde el exterior (para el caso del presente desarrollo el comando proviene del sistema de control del ROV) y

ejecutar las acciones correspondientes sobre los componentes de los sistemas de selección de filtros o de control de ganancia de los amplificadores.

Este microcontrolador es alimentado con 5V provenientes del circuito integrado uA78M05 de Texas Instruments, el cual es un regulador de voltaje de tres terminales con una capacidad de corriente de hasta 0.5 amperios.

La frecuencia de operación es determinada por el reloj interno del microcontrolador, el cual opera a una frecuencia de 8MHz. Y dado que la arquitectura en la que se basa el diseño de este microcontrolador es de tipo RISC, puede alcanzar como desempeño casi los 8MIPS, lo cual significa que estaría realizando una instrucción por cada ciclo de su reloj interno.

La comunicación con el sistema de control desde el exterior se realiza a través de un puerto de comunicaciones mediante protocolo USART. Enviando instrucciones por este puerto, el usuario gestiona diversos parámetros como ganancia del amplificador o tipos filtros a utilizar para cada canal del sistema amplificador.

Un puerto SPI y tres líneas de habilitación son utilizados por el sistema de control para comunicarse con los tres amplificadores de ganancia programable que determinan la magnitud de amplificación para cada canal. Cada habilitador determina cuál de los PGA es el que va a recibir las instrucciones puestas en el bus SPI del microcontrolador.

Doce puertos de entrada-salida son utilizados para el control de los multiplexores que permiten la selección de los filtros a utilizar. Cada uno de los seis multiplexores utilizados recibe dos líneas de selección desde el microcontrolador. De esta manera es que cada uno de los multiplexores puede escoger la señal proveniente de una de sus cuatro entradas y proyectarla en su terminal de salida.

Una de las entradas de ADC del microcontrolador es utilizada para el monitoreo de la tensión positiva que recibe el sistema a través de un divisor resistivo conectado directamente en la línea de alimentación. El ADC ha sido configurado con 5V como voltaje de referencia para esta operación.

2.7 Firmware de Prueba para el Microcontrolador.

Para el control del sistema implementado se desarrolló un firmware para ATmega88 en lenguaje C. Este fue implementado en la plataforma de desarrollo Atmel Studio 6 la cual permite editar, simular y depurar el programa desarrollado antes de ser grabado en el microcontrolador.

El firmware fue desarrollado de manera que al recibirse instrucciones desde el puerto USART, el microcontrolador pueda gestionar el accionamiento o control de todos los componentes del sistema implementado, ya sea la selección de cada uno de los filtros o el control de ganancia de cada uno de los canales.

El algoritmo de pruebas implementado en el microcontrolador, espera la llegada de un carácter alfanumérico (de la "a" a la "f") para la selección de los filtros o de un carácter numérico (del 0 al 9) para la selección de ganancia para los tres canales simultáneamente.

Para corroborar la llegada de comandos hacia el microcontrolador, al recibir un carácter, el microcontrolador inmediatamente reenvía el mismo carácter por el puerto USART de manera que el equipo que controle el sistema amplificador para hidrófonos pueda elaborar un algoritmo de detección de errores de comunicación con el microcontrolador.

Se presenta en la figura 2.7.1 el diagrama de flujo del firmware del microcontrolador y el código fuente se encuentra detallado en el anexo 7.12.

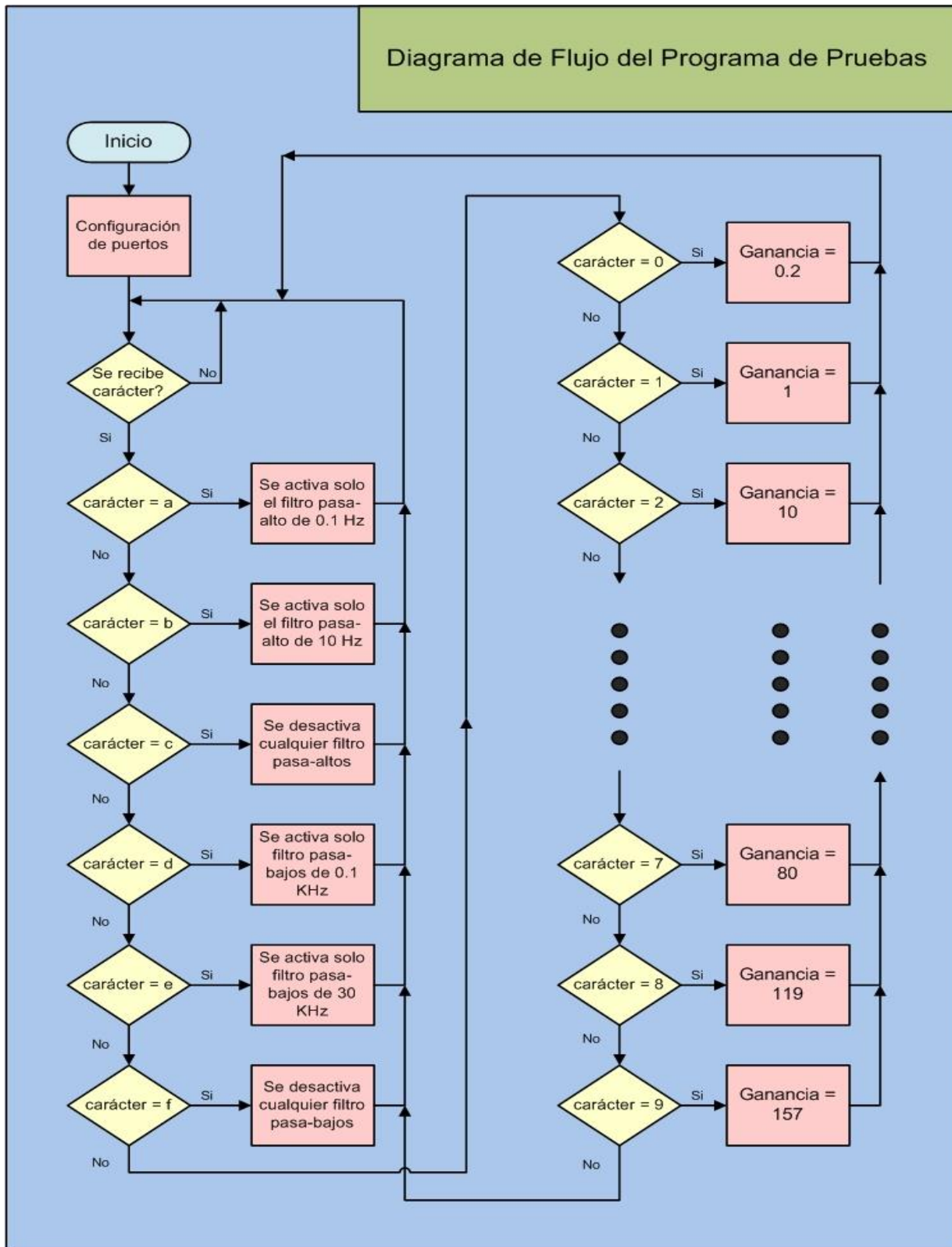


Figura 2.7-1. Diagrama de flujo del programa de pruebas para el sistema de amplificación y filtrado para hidrófonos. (Fuente propia)

2.8 Alimentación del Sistema Electrónico.

Dada la naturaleza del sistema implementado, en la cual es imprescindible mantener el ruido eléctrico de cada etapa al mínimo, es necesario brindarle atención especial a las fuentes de poder que alimentan a cada una de estas etapas.

La alimentación de cada canal es independiente para evitar que la señal de un canal no interfiera con la del otro.

A continuación se detalla el sistema de alimentación de un canal. La etapa de pre-amplificación conformada por el amplificador operacional LT1792, es la etapa más sensible a perturbaciones externas debido a que trabaja con voltajes muy pequeños (0 a 10mV) provenientes del transductor. Esta etapa requiere de voltaje simétrico. Tomando esto en cuenta se seleccionó el regulador lineal de voltaje positivo TPS7A49 de Texas Instruments junto con su complementario TPS7A30. Estos reguladores presentan, según especificaciones del fabricante, ruido menor a 15.4 μV_{RMS} en el rango de 10Hz a 100KHz y un rechazo de rizado de alimentación de los reguladores no menor a 52 dB en el rango de 10Hz a 400 KHz.

Para la etapa amplificadora conformada por el amplificador operacional OPA4354 y el PGA MAX4634, los cuales son alimentados con 5V, se utiliza el uA78M05 de Texas Instruments, el cual es un regulador de tres terminales y hasta 500 mA de corriente de salida. Este posee como ruido típico de salida 40 μV_{RMS} en el rango de 10Hz a 100KHz.

Para la etapa de digitalización de señal, un TPS76325DBVR de Texas Instruments el cual es un LDO de 2.5V y hasta 150mA de corriente de salida, es utilizado para la alimentación, mientras que un ADR02 de Analog Devices, el cual posee error en voltaje de 0.1% y ruido de 10 $\mu\text{V}_{\text{p-p}}$, es utilizado como voltaje de referencia para los convertidores analógico-digital.

Otro regulador uA78M05 de Texas Instruments es dedicado exclusivamente para la alimentación del microcontrolador.

3 EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

El sistema fue desarrollado con la forma de un semicírculo de 8.2cm de radio sobre una tarjeta impresa de doble cara. Esto debido a que en su implementación, se tomó en cuenta el recipiente de forma cilíndrica en el que va a ser instalado el sistema: el UROV de CrustCrawler Robotics.

En el diseño del prototipo se tuvo en cuenta criterios de manufactura para minimizar ruido tales como la distribución y distancia entre componentes, ubicación y geometría de las pistas conductoras y utilización de planos de tierra. En el anexo 7.9 y 7.10 se muestra el diseño y enrutamiento de las pistas del circuito impreso, mientras que en el anexo 7.11 se muestra una fotografía de la tarjeta impresa ensamblada.

La tarjeta impresa del sistema se instala de forma transversal dentro del recipiente cilíndrico junto con otras dos tarjetas de control del ROV. (Figura 3-1)

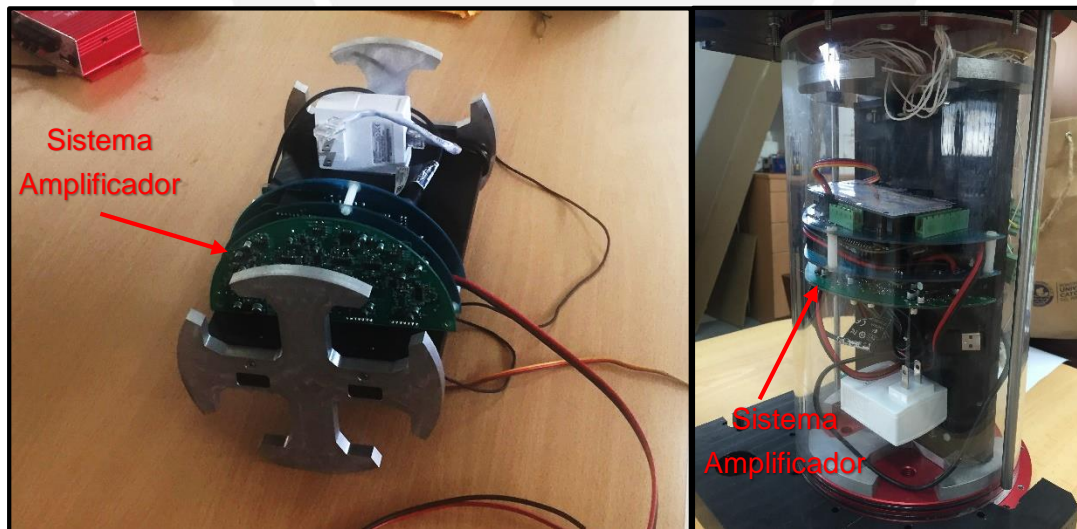


Figura 3-1 Ubicación de la tarjeta impresa dentro del recipiente de contención del ROV
(Fuente Propia)

3.1 Pruebas de Funcionamiento del Sistema

Se inicia la prueba del sistema determinando la calibración de los filtros. Para este propósito se utilizó el osciloscopio de cuatro (4) canales, DPO 4104, de Tektronix y el generador de funciones AFG3021C de Tektronix con el cual se introdujo una señal sinusoidal a cada uno de los filtros y se corroboró que las frecuencias de corte de estos se encontrasen correctamente sintonizadas con respecto a la frecuencia a la cual fueron diseñados.

Dado que todos los filtros han sido diseñados con ganancia unitaria, se inicia las pruebas introduciendo una señal sinusoidal en la entrada de cada filtro de manera que la frecuencia de esta señal se encuentre dentro de la banda de paso del filtro y se corrobora que la amplitud de la señal de salida sea la misma que de la señal de entrada. Luego se varía la frecuencia de la señal de manera que coincida con la frecuencia de corte real del filtro analizado. Para ello se hace un barrido en frecuencia en las inmediaciones de la frecuencia de corte a la cual fueron diseñados los filtros. Se busca que la ganancia haya caído -3dB . Esto determina la frecuencia de corte real de los filtros.

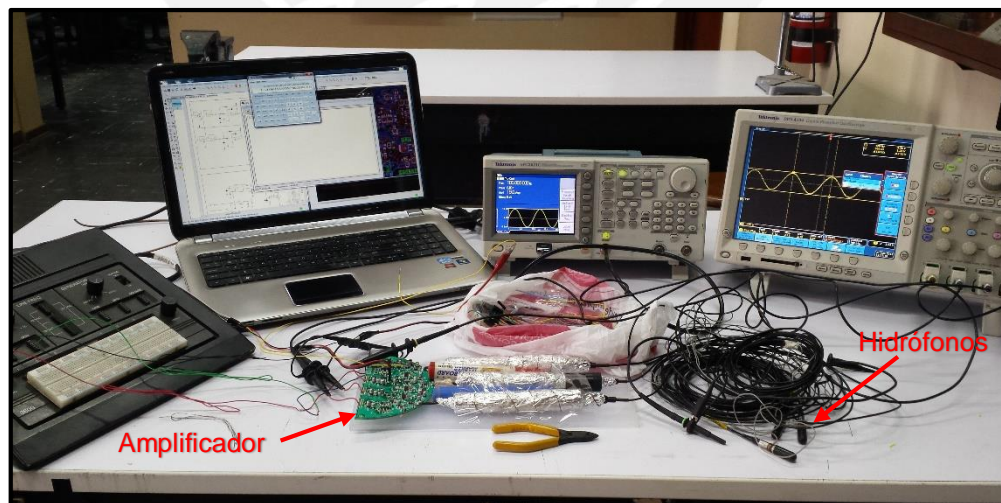


Figura 3.1-1 Pruebas de la etapa de filtrado del sistema de amplificación para hidrófonos.
(Fuente propia)

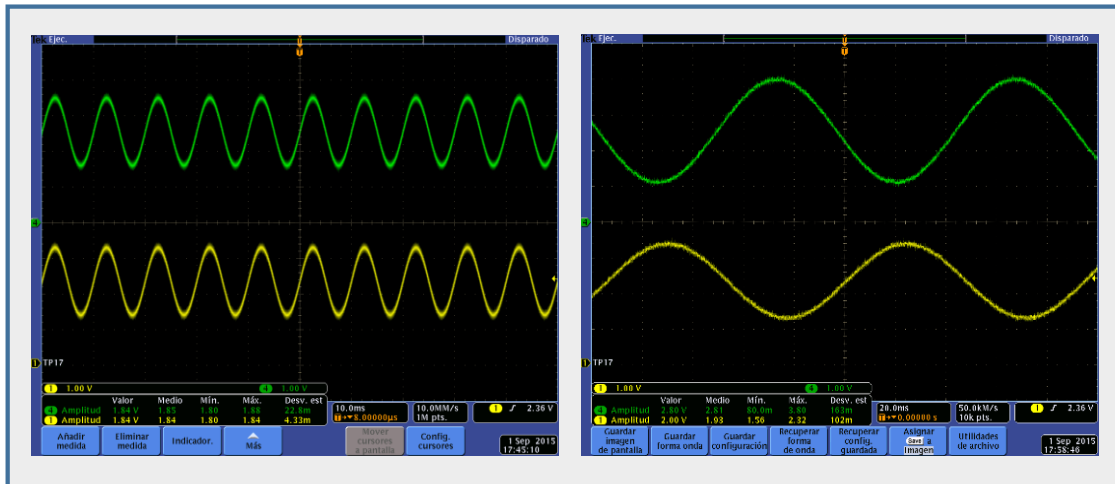


Figura 3.1-2 Izquierda: Señal del filtro dentro de su banda de paso. Derecha: Señal del filtro en su frecuencia de corte. (Fuente propia)

Con el fin de ilustrar la forma de verificar el funcionamiento de los filtros, se tiene en la Figura 3.1-2, en la imagen de la izquierda, la señal superior de color verde que es la señal de entrada del filtro proveniente del generador de funciones AFG3021C de Tektronix. Mientras que en la misma imagen, la señal inferior de color amarillo es la señal de salida del filtro. En esta imagen se puede observar que la señal de salida del filtro se encuentra en fase con la señal de entrada de este, además de que ambos tienen la misma amplitud. Esto se debe a que la frecuencia de la señal se encuentra dentro de la banda de paso del filtro y corrobora su correcto funcionamiento en este rango de frecuencias. Para determinar la frecuencia de corte real del filtro se llevó la frecuencia de la señal de pruebas a las inmediaciones de la frecuencia de corte de diseño y se buscó que la amplitud de la señal de salida se encuentre 3dB por debajo de la señal de entrada. En este punto se observa también, tal como lo muestra la imagen derecha de la Figura 3.1-2, que la onda de salida se encuentra desfasada 180° con respecto a la entrada, lo cual corrobora los resultados obtenidos en las simulaciones presentadas en el capítulo 2.4 “Sistema de Filtrado” en donde se describen las características de los filtros utilizados.

Al verificarse la frecuencia de corte real de cada uno de los doce (12) filtros implementados, se obtuvo los siguientes resultados que se muestran a continuación en la tabla 3.1-1

Tabla 3.1-1 Frecuencia de corte real para cada uno de los filtros implementados.

	Frecuencia de corte teórica	Frecuencia de corte real			Unidad
		CH1	CH2	CH3	
Filtro pasa altos	0.1	0.11	0.11	0.11	Hz
	10	10.6	10.8	11	Hz
Filtro pasa bajos	100	97	96	94	Hz
	30K	29.3	29.7	29.9	KHz

Las desviaciones de la frecuencia de diseño con respecto a las frecuencias obtenidas en los filtros se encuentran dentro del rango esperado debido a la tolerancia de los valores reales de los componentes utilizados con respecto a su valor nominal, esencialmente debido a la tolerancia de los capacitores los cuales son 5% para los utilizados en los filtros pasa altos y 20% para los filtros pasa bajos.

Dado que las capacitancias reducen su valor de capacidad de almacenamiento con respecto al tiempo, los fabricantes las producen con valores mayores al valor nominal y se define su tiempo de vida como el período en el que su valor real se encuentra dentro del rango de tolerancia del valor nominal del capacitor mientras que su capacidad real va disminuyendo con el tiempo.

Para el caso de los filtros pasa-altos, un mayor valor en las capacitancias implica una mayor frecuencia de corte mientras que para los filtros pasa-bajos una menor frecuencia

de corte. Dado que las pruebas han sido realizadas con una tarjeta electrónica recién manufacturada, son esperados los valores obtenidos en la tabla 3.1-1 debido a la tolerancia de los componentes.

Se procede a probar los ADC's del sistema amplificador para hidrófonos. Este cuenta con tres ADC's los cuales transmiten la información de la señal muestreada mediante protocolo SPI además de contar cada una con una línea de habilitación y una de inicio de conversión.

Para realizar esta prueba se utilizó un módulo Arduino UNO (figura 3.1-3, izquierda) el cual fue programado para capturar los datos emitidos por cada uno de los ADC's y mostrar la señal en una pantalla gráfica, además de enviar los datos capturados a una PC.

El puerto SPI del módulo fue programado con una velocidad de reloj de 1MHz y la captura fue realizada con un periodo de muestreo de 10 ms. Con estas características se tomaron 500 muestras y se enviaron a una PC en la cual, utilizando el software Microsoft Excel se generó la gráfica que se muestra en el lado derecho de la figura 3.1-3

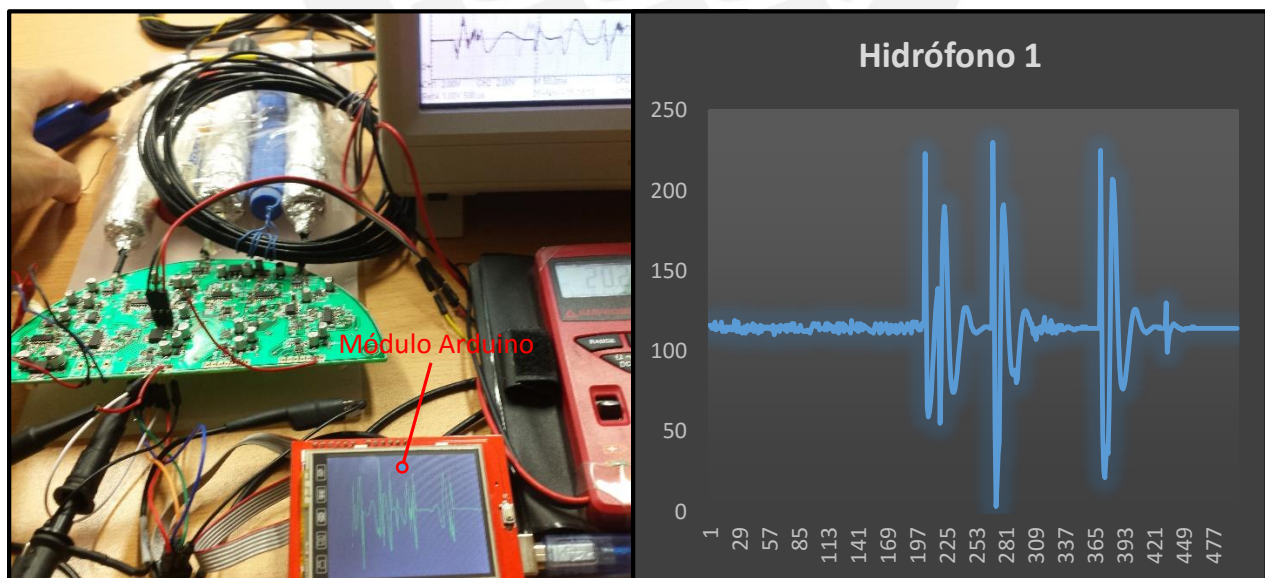


Figura 3.1-3 Pruebas de ADC. Izquierda: Pruebas de ADC utilizando un módulo Arduino. Derecha: Gráfica en PC de los datos extraídos del sistema amplificador para hidrófonos. (Fuente propia)

3.2 Experimentos del Sistema en el agua

Para comprobar el funcionamiento del sistema junto con los hidrófonos, se utilizó como medio de prueba el agua contenida en una piscina portable de 228 X 159 X 42 cm (Figura 3.2-1). El equipo de medición para estas pruebas fue el osciloscopio de cuatro (4) canales, DPO 4104, de Tektronix.



Figura 3.2-1. Fotografía de la piscina portable de 228 X 159 X 42 cm en las cuales se realizaron las pruebas de funcionamiento del sistema amplificador. (Fuente propia)

Al colocar los hidrófonos dentro de la piscina se observa que estos son exitados por el movimiento del agua debido al viento o a cualquier otra perturbación mecánica. Esta excitación se pudo suprimir, antes de la etapa que toma las muestras, activando el filtro pasa-altos de 10 Hz para cada canal, tal como se muestra en la figura 3.2-2.

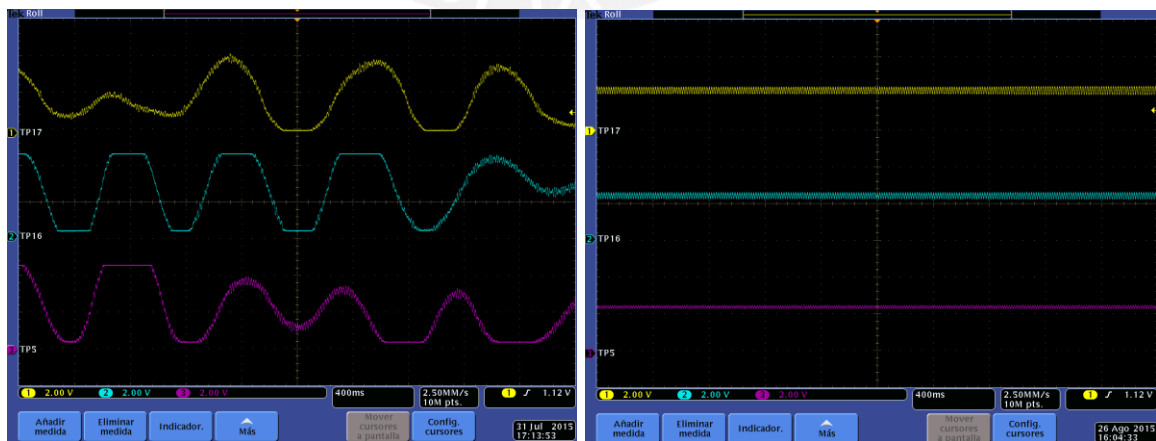


Figura 3.2-2. Izquierda: Señales provenientes de los hidrófonos sin ningún filtrado. Derecha: Señal de los hidrófonos pasado por el filtro pasa-bajos de 10 Hz. (Fuente propia)

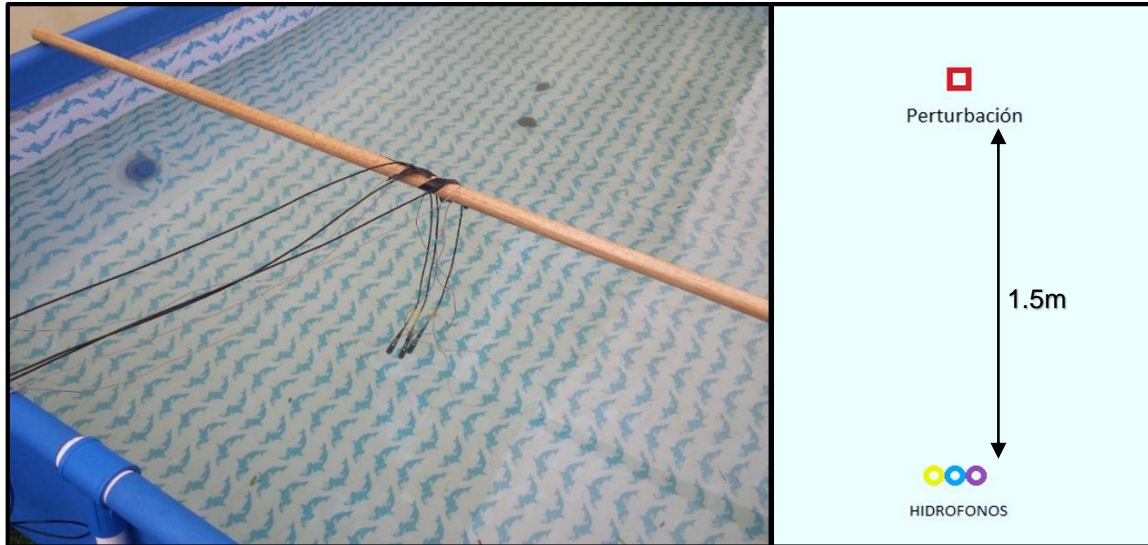


Figura 3.2-3. Izquierda: Fotografía de la distribución de hidrófonos durante la pruebas. Derecha: Ubicación la perturbación respecto la posición de los hidrófonos. (Fuente propia)

Una vez probados los hidrófonos en el medio acuoso y habiendo activado el filtro pasaltos de 10Hz, se realiza el primer experimento colocando los hidrófonos juntos y generando una perturbación en el agua lanzando un objeto (una piedra) en ella. Este objeto es lanzado aproximadamente a 1.5m de distancia (Figura 3.2-3).

Al realizar esta operación se pudo capturar en el osciloscopio la imagen producida por las señales de los hidrófonos (Figura 3.2-4). En ella se puede observar que las señales provenientes de los tres hidrófonos son recibidas en simultáneo y que guardan similitud de forma y magnitud entre ellas, lo cual es la respuesta que se esperaba al encontrarse los hidrófonos en una misma ubicación y recibiendo la misma señal de excitación.

Para efectos de una adecuada visualización de la onda en el osciloscopio, se configuró la ganancia del sistema amplificador en un factor de 7850, lo cual equivale a 38.9 dB. Asimismo, la imagen principal presentada por el osciloscopio muestra una ventana de tiempo de 4 milisegundos (400 microsegundos por división) y una escala vertical correspondiente a 1V por división para cada una de las tres señales capturadas.

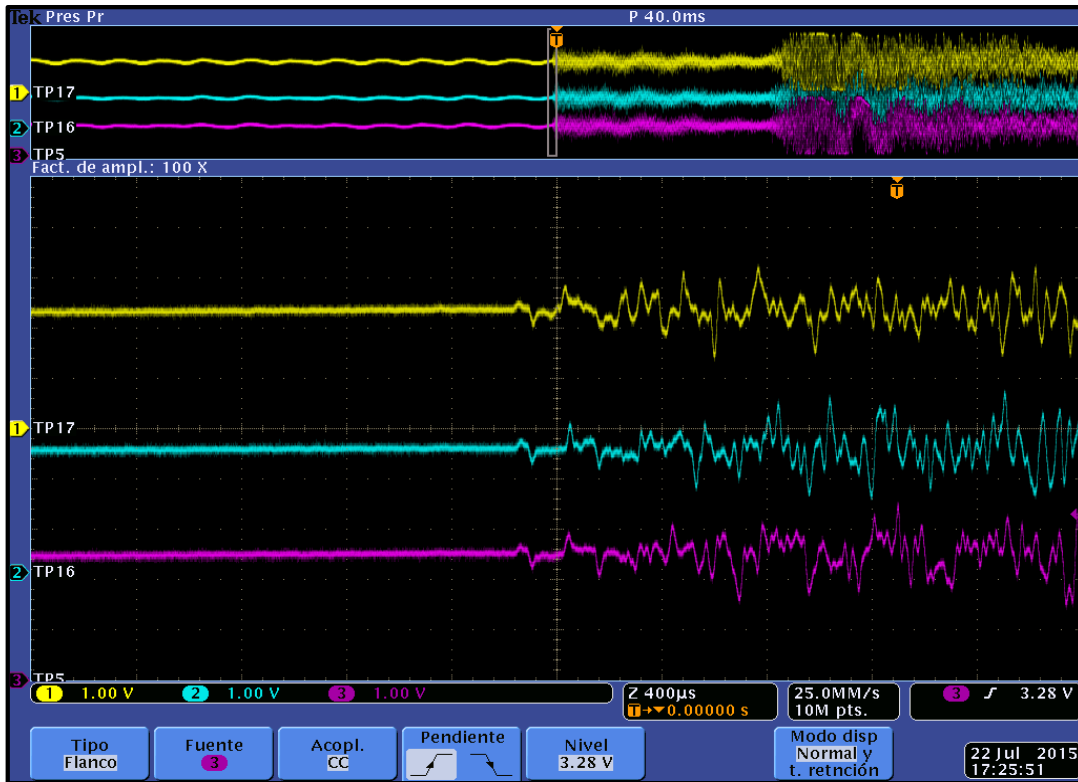


Figura 3.2-4. Imagen capturada por el osciloscopio de la onda sonora producida en el agua debido a la perturbación durante la prueba de hidrófonos. (Fuente propia)

Como segunda prueba, se colocan los hidrófonos conformando un arreglo en línea, con una separación de veinte centímetros (20cm) aproximadamente entre cada hidrófono y repitiendo el estímulo (perturbación) de la prueba anterior.

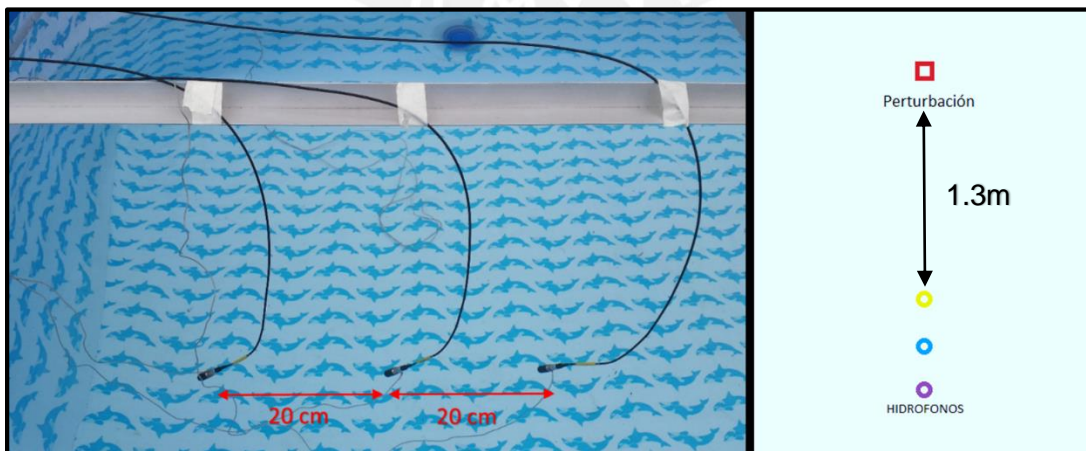


Figura 3.2-5 Arreglo en línea de los tres hidrófonos, con una separación de veinte centímetros (20 cm) entre ellos. (Fuente propia)



Figura 3.2-6 Ensayo del arreglo lineal de hidrófonos en la piscina de pruebas.
(Fuente propia)

En esta segunda prueba se desea visualizar el retardo de tiempo producido por la velocidad de propagación de la onda de sonido en llegar a cada uno de los hidrófonos. Para ello se procede a realizar una perturbación en el medio acuoso, de la misma manera como se procedió en el experimento anterior. La perturbación (el lanzamiento de la piedra) fue realizada a unos 1.3m de distancia del hidrófono más cercano (Figura 3.2-5).

El osciloscopio captura las señales de cada uno de los hidrófonos y lo muestra en pantalla (Figura 3.2-7). En esta imagen se puede apreciar la diferencia en el tiempo de arribo de la onda de sonido, en donde la señal superior en color amarillo corresponde al hidrófono situado más cerca a la perturbación, mientras que la señal inferior, en color morado corresponde al hidrófono opuesto (más alejado a la perturbación).

Tomando en cuenta que la velocidad del sonido en el agua es aproximadamente 1.5 Km por segundo y que la diferencia del tiempo entre los canales mostrados en amarillo y celeste es 128 μ S, esto representa una distancia de 19.2 cm lo cual es equivalente a la separación aproximada de los hidrófonos con un error de 4% de la longitud real.

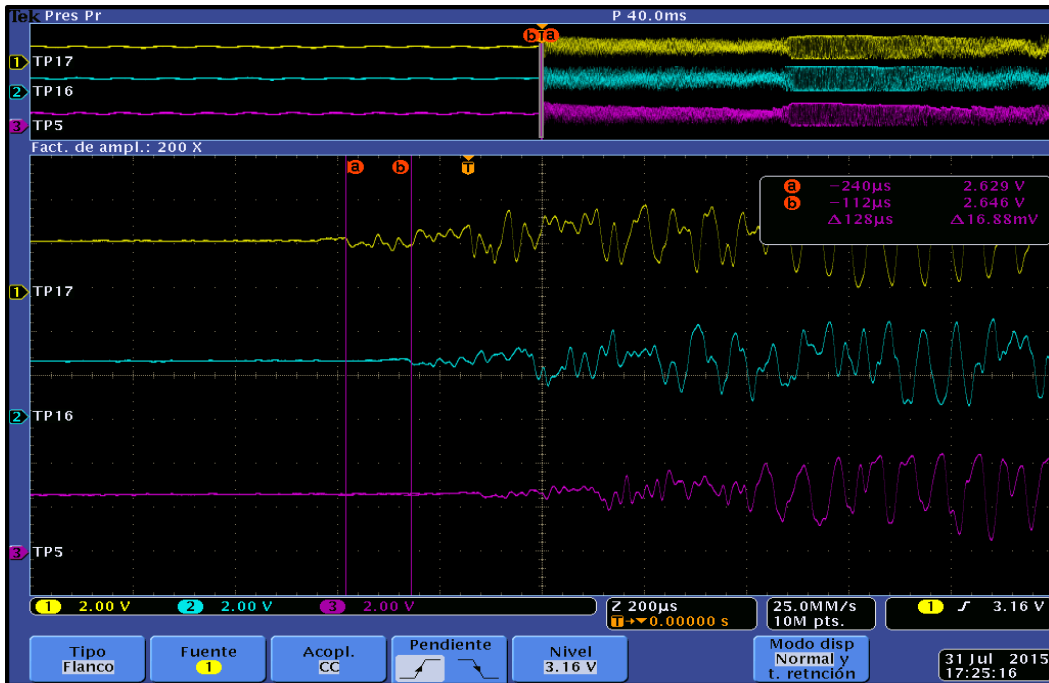


Figura 3.2-7 Captura de la señal del osciloscopio durante el ensayo del arreglo lineal de hidrófonos. (Fuente propia)

Para una tercera prueba se disponen los hidrófonos en un arreglo triangular de 25 cm de lado y se procede a realizar la prueba que consiste en capturar las señales acústicas provocadas por la perturbación realizada en la parte frontal del arreglo, como se observa en la figura 3.2-8.

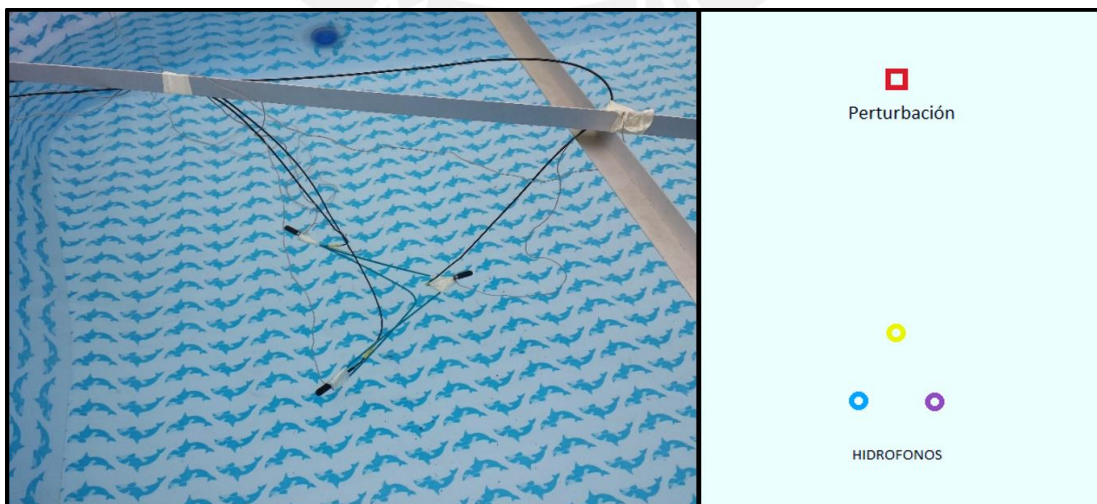


Figura 3.2-8 Ensayo del arreglo triangular de hidrófonos en la piscina de pruebas. (Fuente propia)

Al capturar en el osciloscopio las señales provenientes de los hidrófonos, se puede observar en la figura 3.2-9 que la señal producida por la perturbación llega primero al canal mostrado en amarillo (canal 1) y luego de un tiempo a los canales mostrados en celeste y morado (canales 2 y 3), lo cual es congruente respecto a la posición de los hidrófonos, ya que en este caso el hidrófono correspondiente al canal amarillo se encuentra más cercano a la fuente de perturbación mientras que los otros dos canales se encuentran más alejados, a una distancia equidistante con respecto a la fuente de perturbación, corroborándose esto último al observarse en el osciloscopio que las señales en celeste y morado se presentan en simultáneo 210 microsegundos después de la señal en amarillo.

Se procede nuevamente de la misma manera pero esta vez, las perturbaciones se hacen hacia un lado de la piscina y luego hacia el otro lado como se indica en las gráficas presentadas a continuación en las figuras 3.2-10 y 3.2-11.

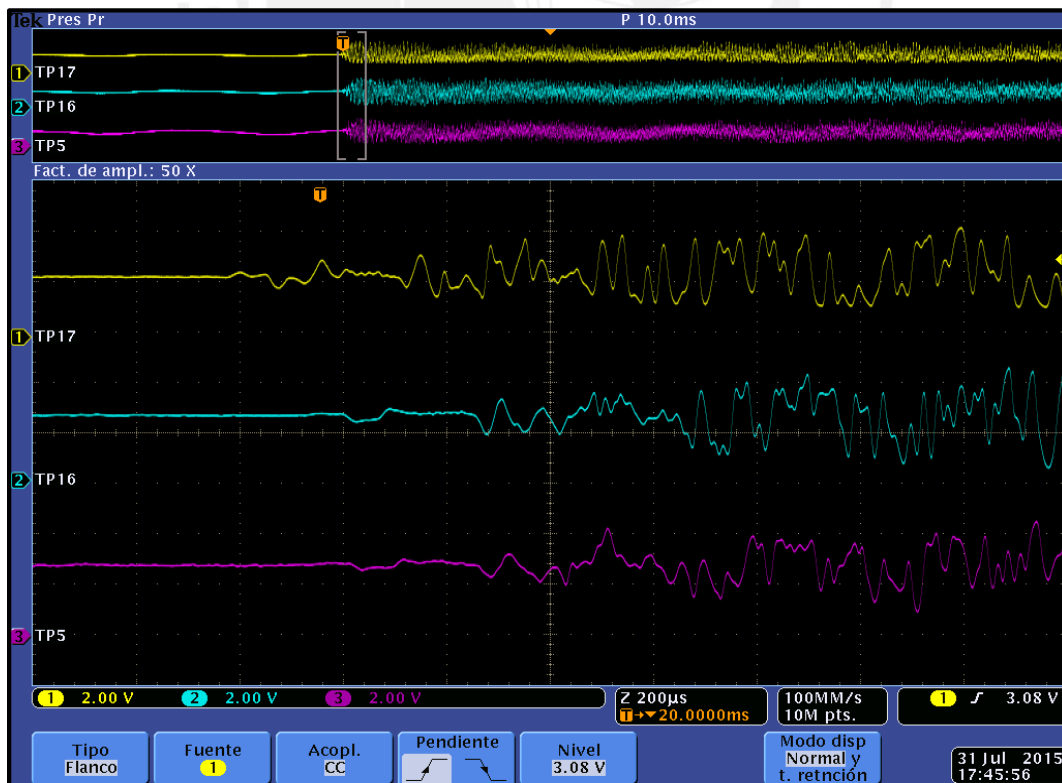


Figura 3.2-9 Captura de la señal del osciloscopio durante el ensayo del arreglo triangular de hidrófonos. (Fuente propia)

En las capturas de la pantalla del osciloscopio se puede apreciar el cambio en el tiempo de recepción de las señales celeste y morado (canales 2 y 3) en los cuales se observa que, para el caso de la figura 3.2-10, la señal en morado aparece unos 100 microsegundos antes que la señal en celeste cuyo hidrófono está más alejado de la fuente de perturbación, mientras que en la figura 3.2-11 lo hace la señal en morado antes que la celeste. Estas pruebas corroboran que es posible la detección aproximada de la dirección de la fuente de sonido mediante la triangulación de los retardos en que la señal acústica llega a los hidrófonos.

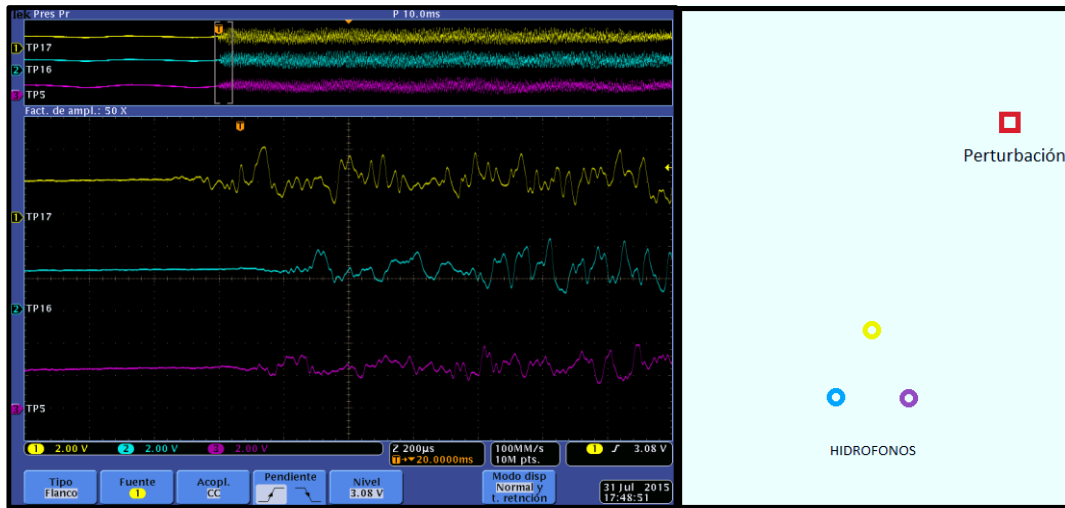


Figura 3.2-10 Ensayo del arreglo triangular de hidrófonos en la piscina de pruebas. Perturbación hacia el lado derecho de la piscina. (Fuente propia)

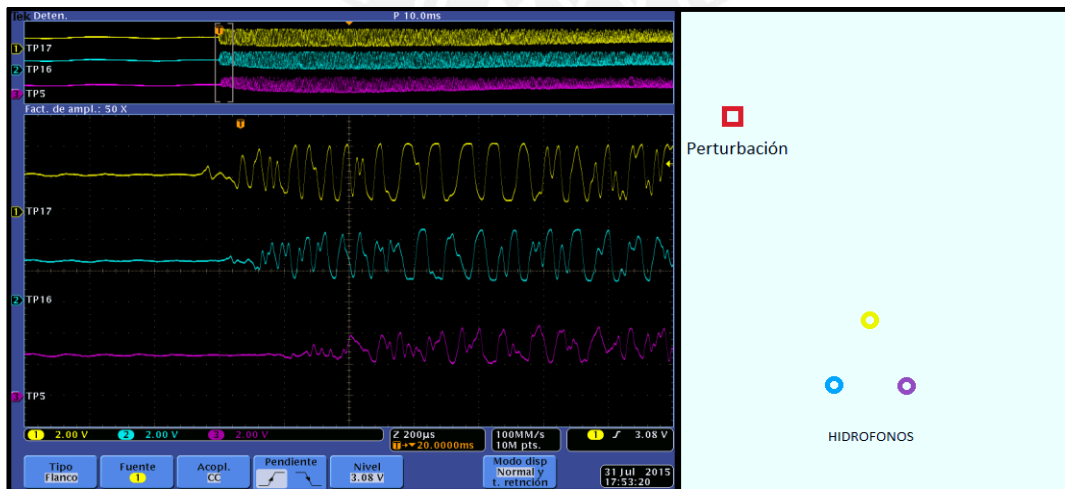


Figura 3.2-11 Ensayo del arreglo triangular de hidrófonos en la piscina de pruebas. Perturbación hacia el lado izquierdo de la piscina. (Fuente propia)

Finalmente se realizan pruebas del sistema con los hidrófonos montados en el ROV. Este Vehículo es producto del “Proyecto de Monitoreo Oceanográfico” (FINCyT - PUCP) el cual es un robot que se desplaza dentro del agua determinando la calidad del medio a través de diferentes sensores, así como también registrando imágenes y capturando señales acústicas.

Para esta etapa se utilizó una piscina circular de 7.5 metros de diámetro. En un extremo se introdujo el ROV con los hidrófonos instalados dispuestos en forma de triángulo como lo muestra la figura 3.2-12. Los hidrófonos se encuentran separados 75 cm entre ellos aproximadamente. En el extremo opuesto de la piscina se genera la onda de sonido y se registran las señales del amplificador en el osciloscopio que se encuentran fuera de la piscina.

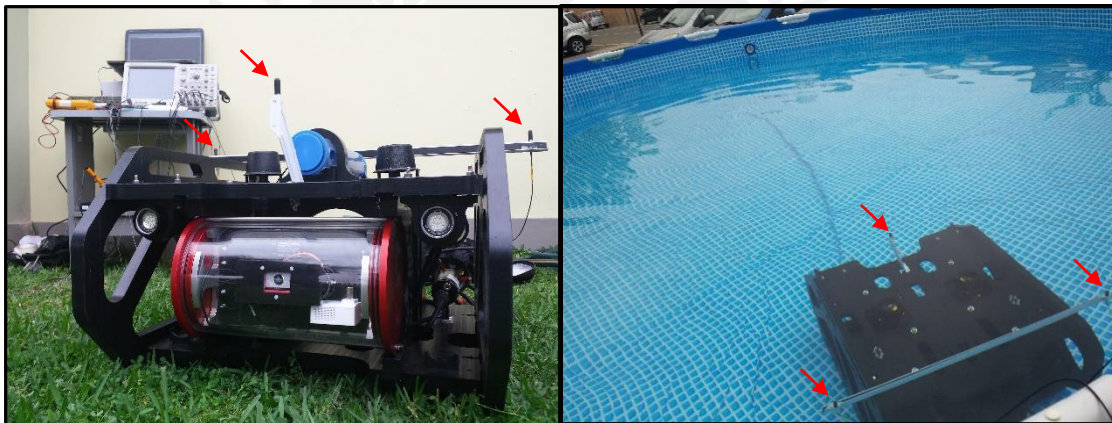


Figura 3.2-12 ROV con los hidrófonos instalados. La ubicación de los hidrófonos está indicado con flechas de color rojo en las imágenes. (Fuente propia)

El resultado de las pruebas (Figura 3.2-13) es similar al obtenido en la prueba anterior, con la diferencia que en este caso observamos que se ha triplicado el retardo de la señal debido a que los hidrófonos se encuentran más separados entre sí (a una distancia tres veces mayor), permitiendo estimar la ubicación de la fuente de sonido con mayor precisión ya que se dispone de mayor cantidad de información para una misma tasa de muestreo en la digitalización de la señal.

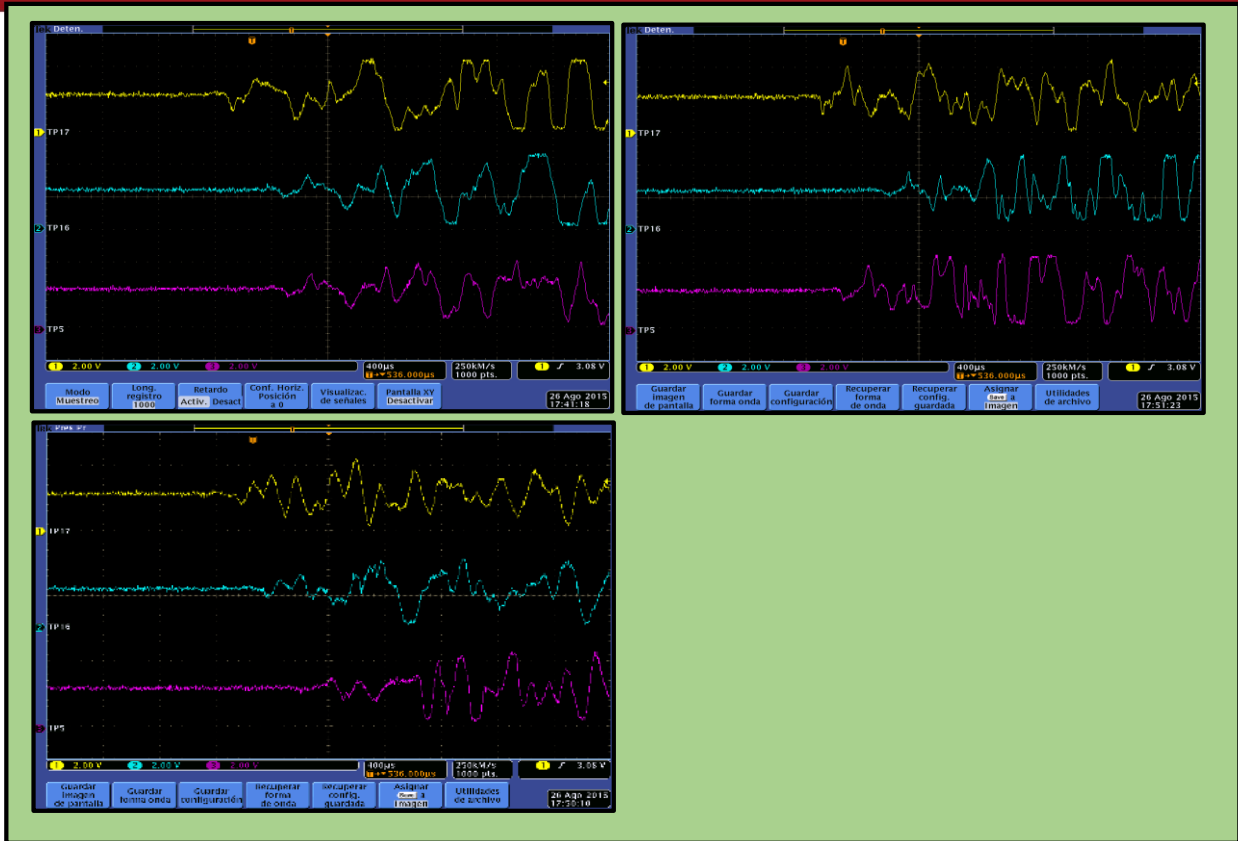


Figura 3.2-13 Señales obtenidas durante las pruebas de los hidrófonos instalados en el ROV (Fuente propia)

CONCLUSIONES

- Se logró alcanzar los requerimientos para el sistema de audición del ROV.
 - Se superó la ganancia solicitada de 40dB, alcanzándose 41.9dB dentro del ancho de banda establecido.
 - Se implementó el sistema de filtrado en función a los requerimientos y se comprobó que se encuentran operando en las frecuencias a la que han sido diseñados, dentro de la tolerancia (de 5% a 20%) establecida por las capacitancias utilizadas.
 - Se comprobó comunicación y la adecuada administración de todas las partes del equipo por el microcontrolador.
 - Se obtuvo la señal digitalizada de los hidrófonos dentro de los parámetros establecidos como requerimiento.
 - Se logró instalar el PCBA de forma correcta en el recipiente para el cual fue diseñado.
 - Se comprobó el buen funcionamiento del sistema hidrófonos instalados en el ROV y en un entorno acuático controlado.
- Se muestra la viabilidad de poder ubicar la dirección de donde proviene la fuente de sonido en función a la medición de retardos de la llegada de la señal acústica a cada uno de los hidrófonos.
- Separar la ubicación de los sensores incrementa la precisión de los cálculos para la ubicación de la fuente de sonido dado que la diferencia de retardos en que llega la señal a cada hidrófono es mayor.

RECOMENDACIONES

- Dado que la salida de los hidrófonos así como la entrada del preamplificador poseen impedancia bastante elevada es indispensable que esta conexión se encuentre completamente blindada para poder obtener una señal libre de ruido.
- Debido a la sensibilidad de los preamplificadores se debe de minimizar en lo posible la presencia cercana de equipos que puedan ejercer inducción electromagnética en el sistema tales como fuentes de conmutación, relés, motores, etc.
- La energía del sistema debe proveerse preferentemente mediante baterías para minimizar la presencia de ruido de alimentación.
- Dada las características de los hidrófonos utilizados, estos deben de tener su chasis puesto a la misma referencia (0V) que el circuito de la tarjeta del amplificador para minimizar el ruido inducido en los hidrófonos.
- Debido a que los motores del ROV producen ondas sonoras, estos deberían estar apagados cuando se requiera utilizar los hidrófonos para la captura de sonido bajo el agua.
- A la hora de instalar los hidrófonos en el ROV se debe de tener especial cuidado de no ejercer mucha fuerza sobre estos ya que según su hoja de datos, son elementos muy sensibles a esfuerzos mecánicos y podrían dañarse.
- Es indispensable que la conexión del hidrófono mantenga su blindaje en todo el recorrido, desde el hidrófono hasta la tarjeta amplificadora, ya que por experiencia dentro del desarrollo del proyecto, si este blindaje no cubre en su totalidad la conexión de la tarjeta con el hidrófono, el ruido inducido hace que la señal captada por el hidrófono sea ilegible.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rodríguez, J., Ruíz, J. (2010). "Conservación Y Protección De Ecosistemas Marinos: Conceptos, Herramientas Y Ejemplos De Actuaciones." *Ecosistemas*19(2):5-23. Recibido el 15 de febrero de 2010 - Aceptado el 26 de abril de 2010
<http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/43>
- [2] kathy Heise "The Emerging Issue Of Underwater Noise Pollution" From Canadian Sailings/
<http://www.canadiansailings.com>. ©2013 United Business Media Global Trade.
- [3] Russell Leaper¹, Martin Renilson², and Conor Ryan³ "Reducing Underwater Noise From Large Commercial Ships: Current Status And Future Directions"
- [4] Mark Peter Simmonds, Sarah J. Dolman, Michael Jasny, E.C.M. Parsons, Lindy Weilgart, Andrew J. Wright, and Russell Leaper "Marine Noise Pollution – Increasing Recognition But Need For More Practical Action"
- [5] MacArthur, L.D., Babcock, R.C., and Hyndes, G.A. 2008. "Movements Of The Western Rock Lobster (*Panulirus Cygnus*) Within Shallow Coastal Waters Using Acoustic Telemetry." *Mar. Freshw. Res.* 59: 603-613. doi:10.1071/MF07239.
- [6] McMichael, G.A., Eppard, M.B., Carlson, T.J., Carter, J.A., Ebberts, B.D., Brown, R.S., Weiland, M., Ploskey, G.R., Harnish, R.A., and Deng, Z.D. 2010. "The Juvenile Salmon Acoustic Telemetry System: A New Tool. *Fisheries*," doi:10.1577/1548-8446-35.1.9.
- [7] Ng, C.L., Able, K.W., and Grothues, T.M. 2007. "Habitat Use, Site Fidelity, And Movement Of Adult Striped Bass In A Southern New Jersey Estuary Based On Mobile Acoustic Telemetry". *Trans. Am. Fish. Soc.* 136: 1344-1355. doi:10.1577/T06-250.1.
- [8] Thomas Marcellin Grothues and Walker Christian Davis "Sound Pressure Level Weighting Of The Center Of Activity Method To Approximate Sequential Fish Positions From Acoustic Telemetry" Received January 29, 2013. Accepted June 27, 2013. Published on the web 3 July 2013. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2013, 70(9): 1359-1371, 10.1139/cjfas-2013-0056
- [9] Zimmer, W. M. X., Harwood, J., Tyack, P. L., Johnson, M. P., Madsen, P. T. (2008). "Passive Acoustic Detection Of Deep Diving Beaked Whales," *J. Acoust. Soc. Am.* 124, 2823-2832.
- [10] Mouy, Xavier; Hannay, David; Zykov, Mikhail; Martin, Bruce "Tracking of Pacific walrus in the Chukchi Sea using a single hydrophone". *Journal of the Acoustical Society of America*. Feb 2012, Vol. 131 Issue 2, p1349-1358. 10p.
- [11] Zimmer, Walter M. X. "Range Estimation Of Cetaceans With Compact Volumetric Arrays" *Journal of the Acoustical Society of America*. Sep 2013, Vol. 134 Issue 3, p2610-2618. 9p. DOI: 10.1121/1.4817892.

- [12] Gervaise, C.; Kinda, B. G.; Bonnel, J.; Stéphan, Y.; Vallez, S. "Passive Geoacoustic Inversion With A Single Hydrophone using Broadband Ship Noise." Journal of the Acoustical Society of America. Mar 2012, Vol. 131 Issue 3, p1999-2010. 12p. DOI: 10.1121/1.3672688
- [13] Rutenko, A.; Manul'chev, D.; Solov'ev, A. "Study Of Low-Frequency-Acoustic- And Seismic-Wave energy Propagation On The Shelf." Acoustical Physics. May 2013, Vol. 59 Issue 3, p319-332. 14p. 3 Charts, 8 Graphs DOI: 10.1134/S1063771013030111.
- [14] Kiguchi, Tsutomu; Ito, Hisaso; Kuwahara, Yasuto; Miyazaki, Teruki. "Estimating The Permeability Of The Nojima Fault Zone By A Hydrophone Vertical Seismic Profiling Experiment." Island Arc. Sep/Dec 2001, Vol. 10 Issue 3/4, p348-356. 9p. DOI: 10.1046/j.1440-1738.2001.00333.x.
- [15] Navinda Kottege, Uwe R. Zimmer. "Underwater Acoustic Localization For Small Submersibles" Article first published online: 2 NOV 2010 DOI: 10.1002/rob.20378
- [16] Martinez JJ, JR Myers, TJ Carlson, Z Deng, JS Rohrer, and KA Caviggia. 2011. "Design And Implementation Of An Underwater Sound Recording Device". PNNL-20371, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA.
- [17] (2015) teledyne-reson Home Page [online] Disponible:
<http://www.teledyne-reson.com/products/hydrophones/accessories/ec6061/>
- [18] (2015) ondacorp Home Page [online] Disponible:
http://www.ondacorp.com/images/brochures/Onda_AH-1100_DataSheet.pdf
- [19] Peter Simpkin, "Hydrophones: Neat Little Devices" The Journal of Ocean Technology, Vol. 9, No. 1, 2014
- [20] John Wiley and Sons, Inc. "Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering" Online ISBN: 9780471346081 DOI: 10.1002/047134608X
- [21] Stackpole Electronics, Inc. "Thick Film and Thin Film Resistors – A Comparison "
http://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Stackpole_738/PDF/Stackpole_ThickFilmXThinFilm.pdf?redirected=1 Consulta: 05/07/2015
- [22] Steve Winder "Analog and Digital Filter Design" (Second Edition)
ISBN: 978-0-7506-7547-5; 978-0-08-048833-2; 978-1-281-04951-3