

Diseño de un Transductor Ultrasónico Subacuático para un Sistema de Monitoreo y Control de Áreas Naturales Protegidas

3 de diciembre de 2010

Xochitl Sarahí Hernández Carrillo [050300252@ucaribe.edu.mx]
Rafael Márquez Galicia [060300227@ucaribe.edu.mx]
Dra. Candy Sansores Perez [csansores@ucaribe.edu.mx]
Universidad del Caribe
Cancún, Quintana Roo

Resumen

El desarrollo de una red de telecomunicaciones inalámbrica basada en instrumentos altamente autónomos, de bajo consumo de energía y amigables con el medio ambiente es de gran prioridad. Una red submarina de este tipo no solamente es el vehículo ideal para la exploración científica y monitoreo medio ambiental, sino también para la conservación de las áreas naturales acuáticas. En este contexto, estamos desarrollando un dispositivo capaz de transmitir datos a través de ultrasonido y de forma subacuática, el cual debe poseer como elemento principal un transductor de ultrasonido. En este documento se explicará a grandes rasgos nuestra propuesta de diseño del dispositivo a desarrollar y más a detalle la primera etapa de desarrollo la cual conforma el diseño, construcción y experimentación de un transductor de ultrasonido ‘hecho en casa’.

1. Introducción

En el estado de Quintana Roo la conservación y protección de áreas naturales es de gran importancia debido al impacto económico, ecológico y social,

siendo una región en la que los ingresos provienen en su mayoría del turismo, sin olvidar también el hecho de que el impacto ambiental que se genera al alterar los nichos ecológicos es muy grande, se pretende dejar éstas áreas protegidas lo más parecido posible a su estado natural, tratando de no afectar a las especies de plantas y animales que viven en esas zonas. Específicamente en la zona protegida de Isla Contoy localizada al Norte de Quintana Roo, se desea realizar un monitoreo constante de las actividades marítimas que se realizan cerca de sus costas, debido a que la pesca sólo está permitida en ciertas áreas de la Isla y en algunas épocas del año. Actualmente el proceso de vigilancia es muy rudimentario, consiste en una torre, en la cual generalmente dos personas, realizan un monitoreo constante con ayuda de binoculares. Si se detecta una embarcación que pudiera estar realizando actividades ilícitas, se procede a enviar una lancha para la inspección correspondiente. Esto no es eficiente, primero debido a que los recursos humanos en la Isla son limitados, y también al factor de confiabilidad que este sistema de vigilancia presenta, por ejemplo, por las noches el monitoreo de la actividad es nulo. Se propone diseñar una red de comunicación inalámbrica por medio de sensores ultrasónicos que sea capaz de transmitir información de manera submarina, comunicándose con un nodo que se encontrará en la superficie, el cual por medio de radiofrecuencia se comunicará con una terminal que se encontrará en tierra, desde donde se administrara el sistema, recibiendo la información y gestionándola. Véase Figura 1.

Existen diversas investigaciones respecto al desarrollo de telecomunicaciones submarinas, sin embargo la información no es tan extensa y en su mayoría los resultados aun se encuentran en etapa experimental, o los resultados no han sido tan alentadores. Por ejemplo, la red sensores submarinos para monitorear la contaminación en las costas de California no fue tan eficiente, ya que la tasa de transmisión de datos que se logró fue apenas de 42 bps en un rango de 17 metros [1]. Otro prototipo de modem subacuático fue diseñado en La Jolla California, sin embargo no se implementó ningún sistema de aprovisionamiento que lo hiciera autónomo y portátil [2]. En Costa Rica, se desarrolló un sistema ultrasónico para analizar la topografía submarina, hicieron uso de transductores comerciales lo cual eleva el costo del dispositivo, por otra parte el sistema diseñado para el aprovisionamiento de energía no cumplió con las expectativas ya que no se logró implementar en su totalidad [3].

En este contexto y como parte de nuestra propuesta, se pretende desarrollar un prototipo de dispositivo inalámbrico amigable con el medio ambiente,

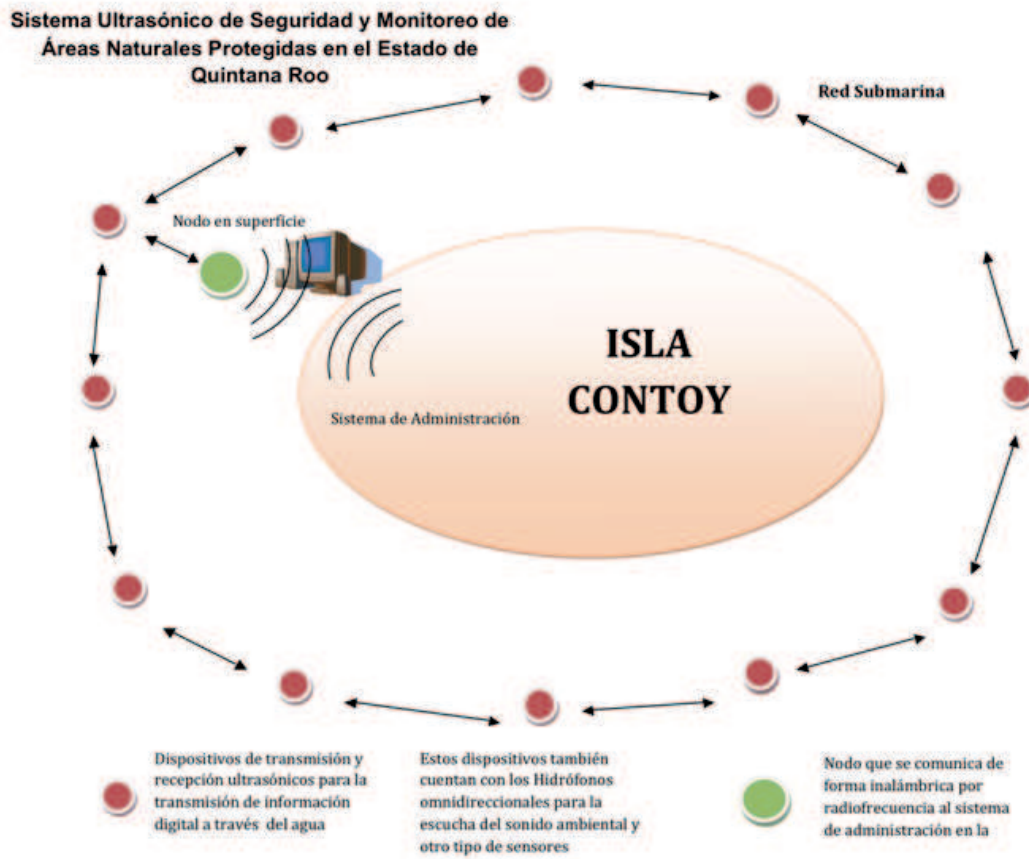


Figura 1: Diagrama de la arquitectura propuesta y sus principales componentes en un área natural protegida, en este caso, los arrecifes de Isla Contoy.

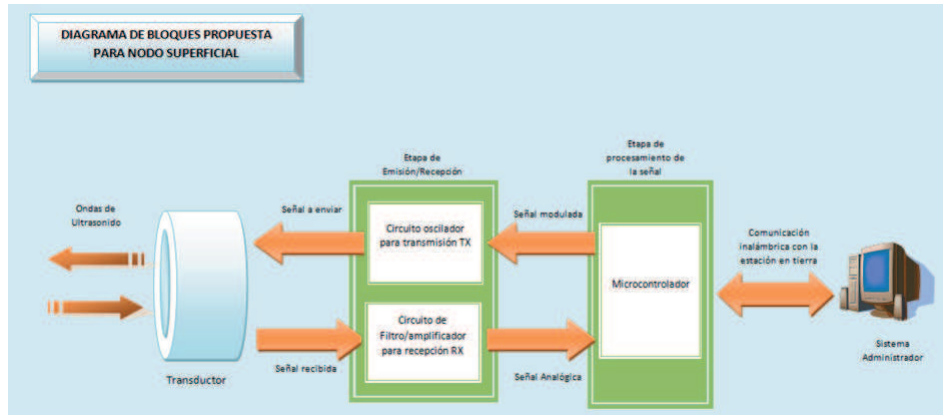


Figura 2: Diagrama de bloques de la propuesta de diseño para el prototipo del dispositivo.

el cual generará señales con haces muy focalizados y con intensidades de transmisión que no alcancen mas allá de centenares de metros, de la misma forma se pretende que la transmisión de datos sea eficiente, que se reduzca el costo de construcción en forma considerable y que tenga un bajo consumo de energía.

La propuesta de diseño consiste en tres etapas: etapa del transmisor, el cual se compone de un transductor piezocerámico que se encarga de enviar y recibir el ultrasonido; etapa del transceptor analógico el cual consta de dos bloques, uno de transmisión y otro de recepción, finalmente la etapa del procesamiento de la señal, la cual incluye la conversión analógico a digital y digital analógico, así como la implementación de una técnica de modulación, tentativamente FSK. Vease Figura 2.

Las metas para este periodo se fueron modificando a medida que se investigaba más a fondo sobre cada una de las etapas de la propuesta de diseño. Así pues, este artículo se centrará en describir los resultados hasta la fecha actual, los cuales corresponden al diseño y construcción del transductor de ultrasonido. En la sección II, se describen las características que se tomaron en cuenta para el diseño de nuestro transductor, en la sección III se habla sobre la construcción del transductor y finalmente en la sección IV se describen los resultados.

2. Diseño del Transductor

En ésta sección se describen los aspectos básicos que se tomaron en cuenta para el diseño de nuestro transductor ‘hecho en casa’ a bajo costo, el cual es un dispositivo que transforma energía eléctrica en energía mecánica, en este caso ultrasonido.

2.1. Piezocerámicos

En 1880, Jacques and Pierre Curie descubrió una característica poco usual de ciertos minerales cristalinos. Cuando son sometidos a una fuerza mecánica, los cristales empiezan a polarizarse y cuando son expuestos a un campo eléctrico los cristales se alargan o acortan (expanden) de acuerdo a la polaridad y en proporción a la fuerza del campo. Este comportamiento es llamado efecto piezoeléctrico y efecto piezoeléctrico inverso, respectivamente [15]. En el siglo XX los investigadores empezaron a fabricar materiales sintéticos que presentaban el efecto piezoeléctrico usando cerámicas poli cristalinas o polímeros sintéticos. Estos materiales son relativamente baratos de fabricar, son físicamente fuertes y son inertes químicamente. La composición común incluye titanato de circonato y titanato de bario por sus propiedades de gran sensibilidad y soporta altas temperaturas [15].

Para preparar una cerámica piezoeléctrica, polvos de óxidos del componente metálico son mezclados en proporciones específicas, se calienta para formar un polvo uniforme. El polvo es mezclado con un aglutinante y se forma un elemento estructural para realizar la forma deseada (discos, varillas, platos, etc). El elemento es encendido por un tiempo específico y una temperatura programada, durante la cual las partículas del polvo se sintetizan y el material toma una estructura cristalina densa. Los elementos se enfrían, reciben las especificaciones de acuerdo a la forma y los electrodos son aplicados a las superficies adecuadas [15].

2.2. Tipos

Aunque existen varios estándares, los piezocerámicos pueden clasificarse en 6 tipos creados por DOD-STD-1376A [16] y que fueron reemplazados por MIL-STD-1376B en 1995 y discontinuado en 1999. Aunque el estándar no es oficialmente usado, la mayoría de los fabricantes aun usan ese estándar como guía. Las propiedades de cada tipo son [16]:

TIPO I .Una composición modificada de titanato de circonato generalmente recomendada para aplicaciones acústicas de media o alta potencia. Su “resistencia” a la depolarización a alta conductividad y/o a una tensión mecánica alta lo hacen adecuado para aplicaciones acústicas de inmersión profunda.

Tipo II .Una composición modificada de titanato de circonato para obtener una gran sensibilidad pero no es adecuada para una conductividad alta por su calentamiento dieléctrico. Este material es más adecuado para dispositivos pasivos como los hidrófonos, también tiene ventajas como una mejor estabilidad de tiempo.

Tipo III . Similar al Tipo I pero incorpora para su uso una alta conductividad por sus bajas pérdidas. Su dependencia a las pérdidas mecánicas y dieléctricas es reducida sustancialmente, sin embargo, un Tipo I puede ser una mejor opción por su gran actividad electromecánica.

Tipo IV . Composición modificada de titanato de bario para uso en aplicaciones de conductividad moderada. Se caracteriza por una actividad piezoeléctrica y una temperatura Curie más baja que otra composición de titanato de circonato.

Tipo V .Una composición intermedia del TIPO II y VI

Tipo VI .Similar al Tipo II con más sensibilidad y constante dieléctrica, reduce la temperatura de Curie.

Los seis tipos de cerámicas pueden ser también clasificados en dos grandes grupos: cerámicas fuertes y suaves. Las cerámicas fuertes tienen pérdidas mecánicas y dieléctricas bajas y son generalmente mejores para producir una señal mientras que las cerámicas suaves tienen gran pérdida dieléctrica, bajos factores de calidad mecánica y pobre linealidad, pero son generalmente mejores en la recepción de la señal [14]. Las cerámicas suaves producen desplazamientos largos y señales de un ancho de banda amplio pero tienen mucha histéresis y son más susceptibles a la depolarización. Para redes de comunicación debajo del agua donde un transductor es usado para transmitir y recibir, un elemento que sea bueno haciendo las dos áreas es deseable. Decidimos utilizar una cerámica fuerte de Tipo I debido a sus bajas pérdidas mecánicas y dieléctricas y su alto acoplamiento electromecánico, lo que lo hace eficiente tanto para transmitir como para recibir. También la cerámica

de titanato de circonato (PZT) es la más usada por su gran sensibilidad y operación a altas temperaturas. Un PZT típico puede soportar 12 Vpp CA por 0.001 pulgadas del grueso de su pared sin afectar mucho sus propiedades electromecánicas. Un grosor de 0.1 pulgadas da un máximo voltaje de 1200 Vpp o 425 Vrms.[18].

2.3. Geometría

Después de seleccionar el tipo de cerámica necesaria para la aplicación, la selección de la geometría es el siguiente paso importante. El costo del piezocerámico puede variar significativamente de acuerdo a su geometría. No solo porque algunas formas son más difíciles de hacer sino también porque la manera de polarizarlos también se vuelve más complicada. La geometría y la dirección de la polarización determinan la dirección de radiación de las señales acústicas así como las propiedades electromecánicas del elemento cerámico por sí mismo, así como su frecuencia de resonancia, capacitancia, voltaje y desplazamiento. Cómo son afectadas exactamente depende del tipo de geometría seleccionada. Para la comunicación debajo del agua, las cerámicas son usualmente omni-direccionales en el plano horizontal para reducir la reflexión de la superficie y la parte inferior [19]. Un anillo con expansión radial provee omni-direccionalidad 2D en el plano perpendicular a los ejes y omni-direccionalidad en los planos a través de los ejes solo si la altura del anillo es pequeña comparada con la longitud de onda del sonido sienta enviada a través del medio. Si el anillo es muy alto, la extensión a lo largo de los ejes y los modos de flexión del anillo pueden ser un problema [19]. Un elemento cerámico de anillo con expansión en modo radial puede ser hecho de varias cerámicas juntas, proporcionándole un mejor acoplamiento electromecánico, potencia de salida y eficiencia eléctrica, que los anillos cerámicos de una sola pieza. Sin embargo son más difíciles de hacer, y suelen ser más caros que los anillos de una sola pieza. Para nuestro transductor, seleccionamos un anillo transductor Tipo I modificado con una resonancia en modo radial, 26 mm de diámetro externo, 22 milímetros de diámetro interno y 2.54 mm el grosor, con una altura de 13 mm, su frecuencia de resonancia es de 43 KHz +- 1.5. Específicamente, adquirimos el modelo SMC26DD22H13111 de Steiner and Martins, Inc. [12]. En México nos fue imposible encontrar un lugar donde vendieran este tipo de piezocerámicos, así que recurrimos a este proveedor en Estados Unidos. Vease Figura 3

Para un anillo de expansión radial, la frecuencia de resonancia se produce



Figura 3: Piezocerámico SMC26DD22H13111

cuando la circunferencia es aproximadamente igual a la longitud de onda de operación. La frecuencia de resonancia y anti-resonancia ocurre en el valor mínimo y máximo, respectivamente. En el aire, la frecuencia de resonancia se encuentra entre 42 y 42.5 KHz.

3. Construcción del Transductor

Aunque el piezocerámico es la parte más importante del transductor, existen otros aspectos a tomar en cuenta para la construcción del mismo. Los cables para transmitir, el encapsulado para protegerlo de agentes externos y la reducción de ruido no deseado, son aspectos en los que hay que tener especial cuidado.

3.1. Cableado

El cableado que consideramos inicialmente para agregárselo al piezocerámico fue el cable eléctrico calibre 18 AWG sin embargo, este tipo de cable es poco eficiente para la transmisión de datos ya que tiende a actuar como antena y por lo tanto es receptor de ruido electromagnético el cual puede afectar a la señal a enviar y recibir. Véase fig. 6(b). Por esta razón, elegimos cables de tipo blindado, esto mejora el desempeño del transductor. Para soldar los cables, utilizamos soldadura convencional de estaño, aunque los fabricantes recomiendan usar soldadura con al menos 3% de plata no



Figura 4: Piezocerámico soldado.

fue posible para nosotros conseguir ese tipo de soldadura. Tuvimos especial cuidado al momento de soldar, ya que los fabricantes del piezocerámico advierten que si se expone por mucho tiempo al calor del cautín, las propiedades piezoeléctricas de éste pueden verse afectadas [12].

3.2. Reducción de ruido no deseado

En la prueba inicial de encapsulamiento no se tomó en cuenta este parámetro, al realizar las pruebas de envío y recepción no se logró captar nada. Sin embargo, anteriormente se habían hecho pruebas con los transductores sin encapsular. Se colocaron en un tubo de PVC, uno en cada extremo y se logró captar la señal de forma exitosa aunque algo atenuado. En un piezocerámico de tipo anillo solo son deseadas las ondas de presión que se generan en la superficie externa, dado que las ondas que se producen arriba, abajo y en el centro están desfasadas con las que se crean en el exterior y esto provoca gran interferencia. Para evitar esto decidimos utilizar discos de corcho como tapa, los cuales absorben la radiación de éstas superficies. Véase figura 5

3.3. Encapsulado

El piezocerámico necesita ser encapsulado para evitar el contacto con cualquier fluido conductivo. Inicialmente buscamos un material con una densidad similar a la del agua, ya que un material con una densidad similar tendrá propiedades acústicas similares [14]. Para una prueba inicial, probamos



Figura 5: Las tapas de corcho adheridas a los piezocerámicos

con resina pre acelerada [13], pero ésta resultó ser demasiado densa para nuestra aplicación e ineficiente por lo que optamos por otro material. Véase figura 6

El material elegido, fue un elastómero de uretano por su densidad similar a la del agua, dándole una textura de goma que actúa como impermeabilizante. Con este material obtuvimos muy buenos resultados. Nos dimos cuenta que la forma del molde para encapsular influía en la eficiencia del transductor, específicamente en modo de recepción, dándonos un mejor resultado una forma semiesférica (previamente habíamos probamos una forma cilíndrica). Para lograr esta forma utilizamos como molde una pelota de tenis. Véase figura 8

4. Resultados

4.1. Caracterización

Las primeras experimentaciones se dieron antes del encapsulado cuando se tuvo que caracterizar los piezocerámicos, es decir, se tomaron las mediciones necesarias para verificar que la frecuencia de resonancia así como la

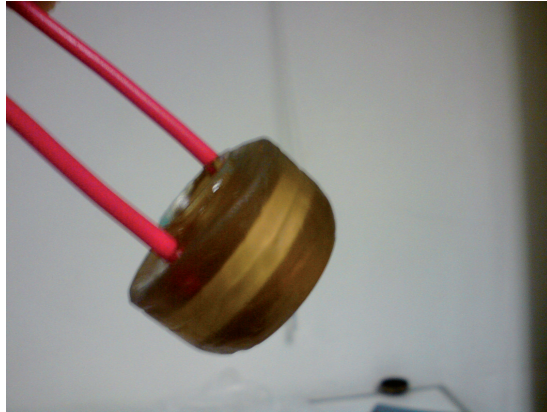


Figura 6: Primer encapsulado con resina pre acelerada

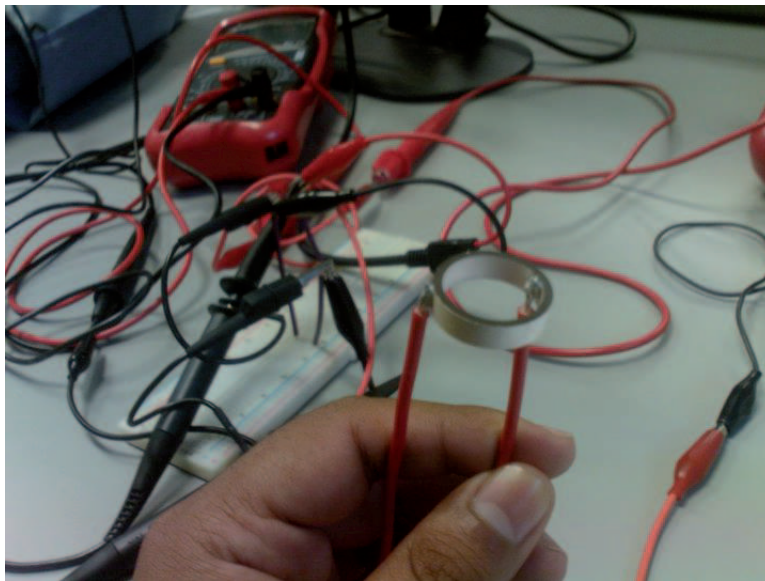


Figura 7: con cable eléctrico calibre 18



Figura 8: Transductor con encapsulado semiesférico

impedancia fueran las establecidas por el fabricante. Los resultados obtenidos del primer piezocerámico que encapsulamos observamos en las gráficas de impedancia y resonancia ciertos picos de inestabilidad. Una vez encapsulados los resultados fueron regulares, por lo que optamos por caracterizar un nuevo par de piezocerámicos y repetir el proceso con más control para ver si se podía mejorar la eficiencia de éstos. En las figuras 8 y 9 se pueden apreciar la frecuencia de resonancia e impedancia de los nuevos piezocerámicos, cabe mencionar que elegimos de entre un grupo de seis los que mejor resultado arrojaron. Como podemos ver, el mínimo valor de impedancia se da cuando el piezocerámico alcanza su máxima resonancia en 42.3 KHz para el piezocerámico 3 y 42.5 para el piezocerámico 4.

Una vez seleccionados procedimos a encapsularlos siguiendo el proceso descrito anteriormente, posteriormente los caracterizamos nuevamente y pudimos observar que la frecuencia de resonancia cambio de 42 KHz a 36.02 KHz para los dos piezocerámicos. Esto debido a la masa agregada del encapsulado. El decremento de la impedancia fue proporcional.

4.2. Pruebas de Transmisión y Recepción

Las pruebas se realizaron en un ambiente controlado, un recipiente de 1 metro de longitud con una profundidad de 10 cm. Conectamos uno de los transductores al generador de funciones aplicándole una señal en la frecuencia de resonancia obtenida durante la caracterización, 36.06 KHz a 23 Vpp. El receptor lo conectamos a un osciloscopio para observar la respuesta en

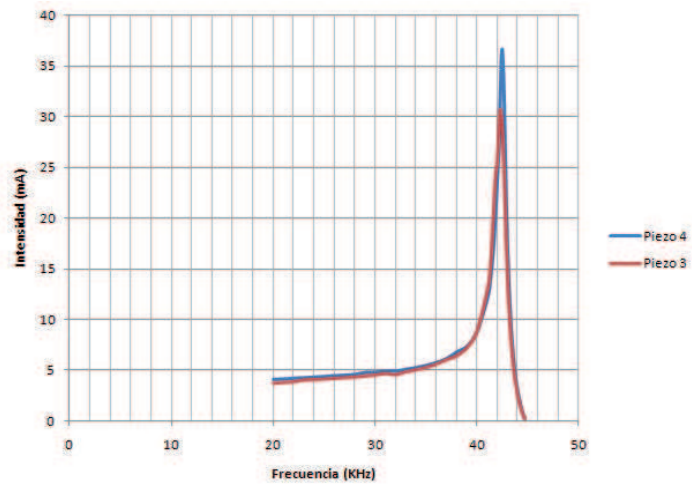


Figura 9: Frecuencia de resonancia de los piezocerámicos elegidos.

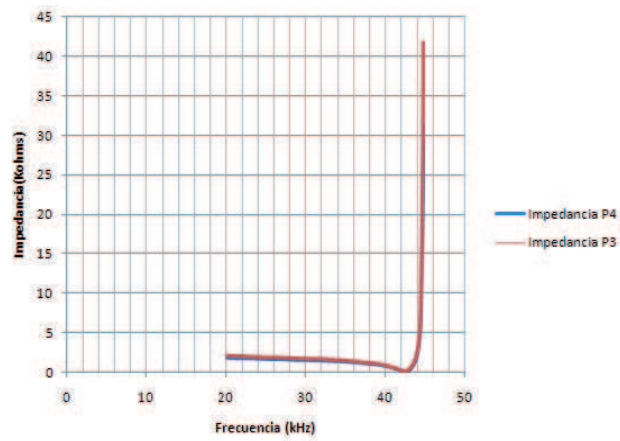


Figura 10: Impedancia de los piezocerámicos



Figura 11: Pruebas en un ambiente controlado, el osciloscopio y un generador de funciones

frecuencia y en Voltaje pico a pico recibido. Véase Figura 11

Se realizaron pruebas a diferentes distancias dentro del recipiente, y en cualquier punto se estabiliza recibiendo la frecuencia enviada por el emisor, un V_{pp} mínimo de 1.02 y un máximo de 3 V_{pp} . Cabe mencionar que se aplicaron frecuencias $\pm 1\text{Khz}$ alrededor de la frecuencia de resonancia dándonos resultados óptimos. Como prueba final comprobamos la eficiencia del último encapsulado comparando nuestro primer transductor con el transductor final, se colocaron a la misma distancia del transmisor. Observamos una mejora notable en la calidad de la señal recibida en el transductor final. El primer prototipo recibió 480 mV pp mientras que el otro 3.04 V_{pp} . Véase figura 12

Concluimos afirmando que la selección de los piezocerámicos fue la adecuada. También comprobamos la factibilidad de la transmisión ultrasónica subacuática. El costo de construcción por transductor fue de \$125 pesos.

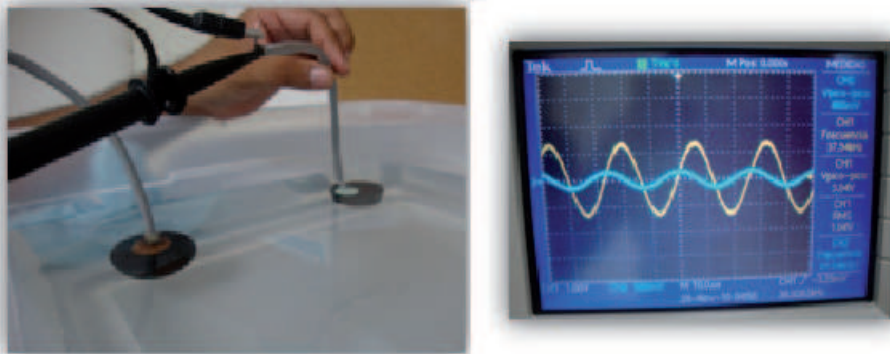


Figura 12: Se observa que el encapsulado semiesférico es más eficiente, la gráfica azul muestra la respuesta del transductor cilíndrico, mientras que la amarilla muestra la respuesta del transductor semiesférico.

Referencias

- [1] R.; Aguiar, P.; Baldi, P.; Lopes, C.V., "Software Modems for Underwater Sensor Networks, °CEANS 2007 - Europe vol., no., pp.1-6, 18-21 June 2007.
- [2] Benson, B. Ying Li Faunce, B. Domond, K. Kimball, D. Schurgers, C. Kastner, R., "Design of a Low-Cost Underwater Acoustic Modem", Embedded Systems Letters, IEEE- Vol.2, pp 58-61, Sept. 2010.
- [3] Torres Guzmán Javier, "Sistema ultrasónico para topografía Subacuática", Instituto Tecnológico de Costa Rica, Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, Junio 2006.
- [4] Godden Luke, "Underwater ultrasonic communication", The University of Queensland, Undergraduate Thesis, 2002.
- [5] B. Benson, G. Chang, D. Manov, B. Graham, R. Kastner, "Design of a Low-cost Acoustic Modem for Moored Oceanographic Applications", Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks, Los Angeles, 2006.

- [6] R. Jurdak, C. Videira, P. Aguiar, P. Baldi, “A comparative analysis and experimental study on wireless aerial and underwater acoustic communications”, Proceedings of the IEEE International Conference on Digital Telecommunications (ICDT), Cap Esterel, August 2006.
- [7] J. G. Proakis, D. G. Manolakis, “Tratamiento Digital de Señales. Principios, algoritmos y aplicaciones”, Prentice Hall, Madrid, 1998.
- [8] Boylestad, Robert L. y Nashelsky, Louis, “Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, Pearson Educación, México, 2003.
- [9] Samir S. Soliman, Mandyam D. Srinath, “Señales y sistemas continuos y discretos”, Segunda edición, Prentice Hall Iberia, S. R. L. Madrid, 1999.
- [10] Mansilla Fabregat Antonio, Desenvolupament, proves de camp i anàlisi de resultats en una xarxa de sensors, Universitat Politècnica de Catalunya, Master Thesis, Ene. 2008
- [11] Malik, N. R, “Circuitos Electrónicos: análisis, diseño y simulación”, Madrid, Prentice Hall, 1996.
- [12] Piezoelectric Ceramic Solutions. <http://www.steminc.com/>
- [13] Especialidades Plásticas del Bajío <http://www.epsacv.com/>
- [14] Sensor Design Fundamentals: Piezoelectric Transducer Design for Marine Use, Airmar Technology Corporation, 2000.
- [15] Piezoelectricity <http://www.americanpiezo.com/>
- [16] Revisión de DOD-STD-1376A, Ad Hoc Subcommittee Report on Piezoceramics, April 1986.
- [17] MIL-STD-1376B (Notice 1), Military Standard Piezoelectric ceramic material and measurements guidelines for sonar transducers, July 1999.
- [18] Morgan ElectroCeramics, <http://www.morganelectroceramics.com>
- [19] C.H. Sherman and J.L. Butler, Transducers and Arrays for Underwater Sound, New York: Springer, 2007