

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**



**Sistema Ultrasónico para Topografía Subacuática  
(SUTOS)**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**Javier Torres Guzmán**

**Cartago, Junio de 2006**

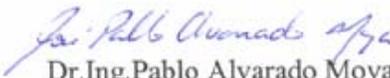
**INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA**  
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**  
**TRIBUNAL EVALUADOR**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal

  
Ing. Eduardo Interiano Salguero

Profesor lector

  
Dr. Ing. Pablo Alvarado Moya

Profesor lector

  
Ing. Luis P. Méndez Badilla

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago 26 de Junio 2006

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema, así como la información que haya suministrado la institución para la que se realizará el proyecto, y aplicando e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad por el contenido de este Anteproyecto.

Cartago, 29 Junio 2006

*Javier Torres G.*

Javier Torres Guzmán  
Cédula: 6-0313-0195

## **Resumen**

Este proyecto se desarrolla en el contexto de diseño de un sistema prototipo guiado por GPS, que permita la medición de niveles de sedimentación en embalses.

Las mediciones que realice este dispositivo registrarán los datos de profundidad y coordenadas (latitud y longitud) en los puntos de medición delimitados por una ruta programada por un operador a través de un computador.

El presente trabajo se concentra el desarrollo del módulo que permita realizar la medición y registro del nivel profundidad de los sedimentos en un embalse, denominado “Sistema ultrasónico para topografía subacuática”, SUTOS.

La medición del nivel de profundidad se realiza partiendo del hecho de que las ondas sonoras al chocar con los objetos producen reflexiones, denominadas ecos, la diferencia del tiempo entre la señal ultrasónica de salida y el retorno de la señal de eco, con el fin de obtener como resultado la profundidad a la que se encuentra el fondo de embalse.

Palabras clave: registro, profundidad, topografía, sedimentos, ultrasonido, ondas y ecos

## **Summary**

This project is developed in the context of design of a system prototype guided by GPS that allows the measurement of levels of sedimentation in dams.

The measurements that each device will make a register of the data of depth and coordinates (latitude and length) in the points of measurement, delimited by a route programmed by an operator through a computer.

The present work concentrates the development of the module that allows to make the measurement and registry of the level depth of sediments in a dam, denominated "ultrasonic System for subaqueous topography", SUTOS.

The measurement of the level of depth of makes starting off of the fact that the sound waves when hitting the objects produce denominated reflections echoes, the difference of time between the ultrasonic signal of exit and the return of the echo signal, with the purpose of obtaining like result the depth to which is the dam bottom.

Key words: registry, depth, topography, sediments, ultrasound, waves and echoes

Este trabajo se lo dedico a Dios, por ser el cerrajero que abre las puertas de mi destino, una a la vez. A mis papás y hermanos por estar estos 25 años siempre conmigo, en los buenos momentos y más aún en los no tan buenos.

Abuelita y abuelito para ustedes en el cielo.

Le agradezco al Ing. Luís P. Méndez Badilla y a la Escuela de Ingeniería Electrónica del ITCR, por darme la oportunidad de realizar este proyecto y a todos los profesores de la escuela que nunca me negaron su tiempo y conocimiento.

Jacqueline gracias por tu apoyo y comprensión. A mis amigos y compañeros que siempre ofrecieron su ayuda y colaboración incondicional, gracias, éxitos en su carrera y que Dios los bendiga a todos.

## INDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Problema existente.....	1
1.2 Importancia de la solución.....	3
1.3 Solución proyectada.....	4
Capítulo 2 Meta y objetivos.....	8
2.1 Meta.....	8
2.2 Objetivo general.....	8
2.3 Objetivos específicos.....	8
Capítulo 3 Marco teórico.....	9
3.1 Descripción del proceso a mejorar.....	9
3.2 Antecedentes bibliográficos.....	11
3.2.1 Ecosonda multihaz.....	11
3.2.2 Transductores y sensores ultrasónicos.....	12
3.2.3 Principios físicos relacionados.....	13
Capítulo 4 Metodología.....	15
4.1 Reconocimiento y definición del problema.....	15
4.2 Obtención y análisis de la información.....	15
4.3 Evaluación de alternativas.....	16
4.4 Implementación de la solución.....	17
4.4.1 Selección del Transductor.....	17
4.4.2 Circuito controlador.....	17
4.4.3 Circuito de transmisión y recepción de ultrasonido.....	17
4.4.4 Programa para la PC del operador.....	17
4.5 Evaluación del desempeño.....	18
4.6 Reevaluación y rediseño.....	19
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución.....	20
5.1 Selección de la solución final.....	20
5.2 Descripción del hardware implementado.....	26
5.2.1 Circuito conmutador.....	26
5.2.2 Circuito amplificador de ecos.....	32
5.2.3 <i>Hardware</i> para el microcontrolador.....	34
5.3 Descripción del software desarrollado.....	36
5.3.1 Programación del microcontrolador PIC16LF877A.....	36
5.3.2 Programa para la PC del operador.....	40

<b>Capítulo 6: Análisis de Resultados .....</b>	<b>43</b>
<b>6.1 Resultados .....</b>	<b>43</b>
6.1.1 Medición 1 .....	43
6.1.2 Medición 2 .....	45
6.2 Análisis .....	47
<b>Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>53</b>
7.1 Conclusiones .....	53
7.2 Recomendaciones .....	55
<b>Bibliografía .....</b>	<b>56</b>
<b>Apéndices.....</b>	<b>58</b>
A.1 Glosario y abreviaturas .....	58
A.2 Hoja de información del proyecto .....	59
A.3 Antecedentes prácticos .....	60
A.3.1 Sistema de control de trayectoria guiado por GPS para un módulo estimador de profundidad de embalses para el I.C.E. ....	60
A.3.2 Sistema de navegación guiado por GPS para submarino prototipo (SNSP) 61	
A.3.3 Diseño de un sonar para el monitoreo de la formación de sedimentos en embalses.....	62
<b>Anexos .....</b>	<b>63</b>
B.1 Hoja de datos de transductor HX123TR.....	63
B.2 Hoja de datos del transductor TC2111.....	66
B.3 Hoja de datos Amplificador diferencial AD505 .....	69
B.4 Hoja de datos MOSFET IRFZ20.....	71

**INDICE DE FIGURAS**

Figura 1. 1	Esquema de una planta hidroeléctrica.....	1
Figura 1. 2	Ejemplo de reflexión de ondas sonoras en el agua .....	4
Figura 1. 3	Diagrama de bloques del sistema en general.....	5
Figura 1. 4	Diagrama de bloques del SUTOS.....	6
Figura 3. 1	Diagrama de flujo para el método de medición con varilla .....	10
Figura 3. 2	HX1200TR Ultrasonic Transceiver [7].....	12
Figura 3. 3	Esquema de transmisión y recepción ultrasónica [7].....	13
Figura 5. 1	Circuito recomendado por HEXAMITE para el HE123TR [7].....	20
Figura 5. 2	Ch1: señal de control. Ch2: Tx y Rx del transductor. ....	22
Figura 5. 3	Diagrama de bloques para el <i>hardware</i> de la solución final. ....	25
Figura 5. 4	Diagrama de bloques, convertidor CD-CD.....	26
Figura 5. 5	Circuito conmutador para transmisión con el TC2111 .....	27
Figura 5. 6	Señal alterna en el secundario antes del diodo D.....	30
Figura 5. 7	Señal aplicada al modelo del transductor TC2111.....	31
Figura 5. 8	Diagrama esquemático para la operación del AD0605 .....	32
Figura 5. 9	Diagrama esquemático completo del circuito de TX/RX .....	33
Figura 5. 10	Diagrama esquemático del circuito para el microcontrolador .....	35
Figura 5. 11	Diagrama de flujo para la aplicación del microcontrolador.....	39
Figura 5. 12	Aplicación de control del SUTOS para el operador de la PC .....	40
Figura 5. 13	Configura puerto serien en la aplicación de control del SUTOS ...	41
Figura 5. 14	Diagrama de flujo para el programa de la PC del operador .....	42

**Figura 6. 1 Ch1: señal de control, 4 pulsos. Ch2: Tx y Rx del transductor.....44**

**Figura 6. 2 Ch1: señal de control, 6 pulsos. Ch2: Tx y Rx del transductor.....44**

**Figura 6. 3 Ch1: señal de control, 3 pulsos. Ch2: Tx y Rx del transductor.....46**

**Figura 6. 4 Ch1: señal de control, 2 pulsos. Ch2: Tx y Rx del transductor.....46**

**INDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 5. 1 Condiciones para la prueba del HE123TR .....</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 5. 2 Comparación de transductores .....</b>	<b>23</b>
<b>Tabla 5. 3 Especificaciones técnicas del TC2111 de Reson Inc.[17] .....</b>	<b>24</b>
<b>Tabla 5. 4 Dimensiones de los toroides utilizados.....</b>	<b>28</b>
<b>Tabla 5. 5 Especificaciones para microcontroladores de MICROCHIP .....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 6. 1 Condiciones para la medición 1 del HE123TR .....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 6. 2 Condiciones para la medición 2 del HE123TR .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 6. 6 Resultados de las pruebas de los toroides .....</b>	<b>50</b>

## Capítulo 1: Introducción

### 1.1 Problema existente

En Costa Rica existen varios embalses construidos con el fin de proveer el agua para la operación de las plantas hidroeléctricas, según la ARESEP<sup>1</sup>, el 72,0% de la producción de energía eléctrica producida en el país, hasta el año 2000, proviene plantas hidroeléctricas [2].

La eficiencia económica en la producción de este tipo de energía radica, entre otros factores, en la cantidad y presión del líquido dentro de los embalses. La acumulación de sedimentos puede comprometer el funcionamiento de las turbinas y afectar el nivel de las aguas, provocando incluso pérdidas de líquido por rebalse.

Es por esto que se hace necesario conocer el estado de la formación de sedimentos en el fondo del embalse, ya que estos alteran ambos factores, cantidad y presión del líquido. En la Figura 1. 1 se observa una vista lateral, general, de la estructura de funcionamiento de una planta hidroeléctrica.

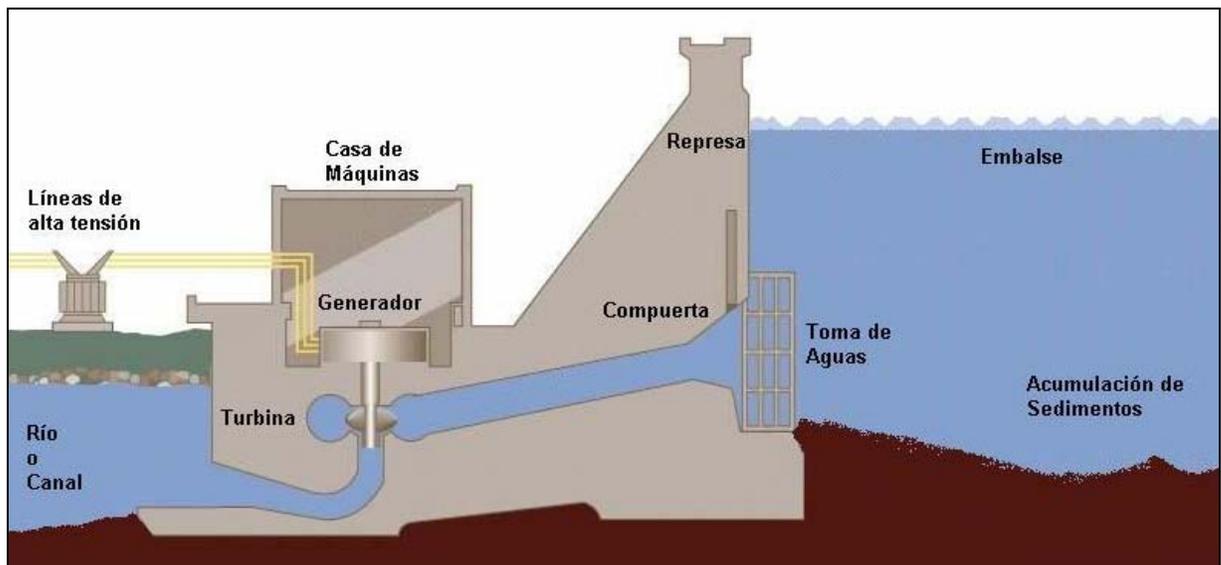


Figura 1. 1 Esquema de una planta hidroeléctrica.

---

<sup>1</sup> Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos

## Capítulo 1 Introducción

---

Los sedimentos están compuestos de materia orgánica (principalmente arena, tierra, piedras, árboles, etc.) y basura arrastrada por los ríos que sirven de afluente a los embalses.

La acumulación de sedimentos en el fondo del embalse ocasiona una disminución de la presión que el agua ejerce en las turbinas, provocando pérdidas económicas por la cantidad de energía que se deja de producir.

La sedimentación del fondo del embalse es motivo de una constante inversión económica y de recurso humano, dedicada a la limpieza de las turbinas y a la medición del nivel de sedimentos con métodos poco eficientes e imprecisos.

La falta de un método preciso o de un sistema que permita medir la formación de sedimentos en el fondo del embalse, provoca pérdidas millonarias cada año a empresas como el ICE (Instituto Costarricense de Electricidad), encargadas de la producción de energía hidroeléctrica, a partir de embalses para la captación del líquido [8].

## **1.2 Importancia de la solución**

La formación de sedimentos en el fondo de un embalse es un problema de todos los días, que se agrava en la época de lluvias. Esto provoca que se pierda capacidad en la retención de las aguas en el embalse, misma que se necesita en la época seca.

Por este motivo, se desea desarrollar un sistema para determinar la profundidad a la que se encuentran los sedimentos en los embalses, denominado (SUTOS). Este sistema forma parte de un proyecto a largo plazo, encaminado a la obtención de un prototipo autónomo que permita conocer con precisión las coordenadas (en el sistema GPS<sup>2</sup>) y la profundidad de un punto específico de una ruta, programada por un operador a través de un computador.

Entre los beneficios que ofrece este sistema a una empresa dedicada a la generación de energía hidroeléctrica, están:

- Ahorro de recurso económico y humano a la hora de medir el nivel de sedimentos. Reducción del tiempo de muestreo de sedimentos
- Mayor aprovechamiento de la maquinaria encargada de la extracción de sedimentos
- Mayor captación de agua para la generación de energía.

---

<sup>2</sup> Global Positional System

### 1.3 Solución proyectada

El proyecto que aquí se plantea tiene como fin, realizar un sistema que permita la medición rápida y eficiente de nivel de sedimentación en un embalse, con la capacidad de acoplarlo al sistema de navegación GPS para obtener lecturas tridimensionales (latitud, longitud y profundidad) en un punto específico en un embalse, tanque o cualquier masa de agua.

El método a desarrollar es el de la “ecosonda”, en el que un transductor<sup>3</sup> emite una señal ultrasónica orientada al fondo del embalse, esta onda emitida choca con el fondo (sedimentos), esto provoca una reflexión de la onda sónica emitida, lo que comúnmente se conoce como eco, ver Figura 1. 2.

El transductor no solo opera como transmisor ultrasónico, sino también como un micrófono ultrasónico (sumergible) capaz de capturar el eco producido por la reflexión de la onda sónica emitida.

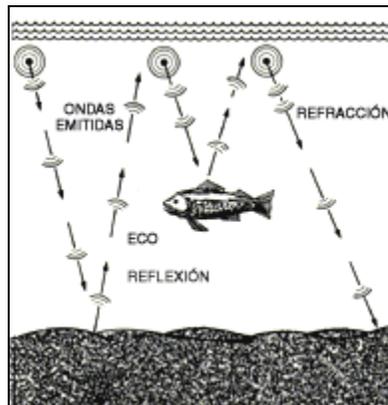


Figura 1. 2 Ejemplo de reflexión de ondas sonoras en el agua

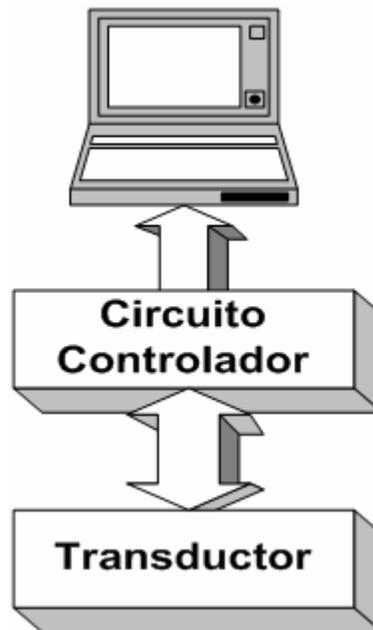
El sistema a diseñar usará un microcontrolador para controlar la transmisión y determinar el valor del tiempo entre la salida de la señal ultrasónica del transductor y el momento en que el eco retorna al mismo.

---

<sup>3</sup> Dispositivo que convierte una señal eléctrica de alta frecuencia en una onda acústica.

La señal recibida debe ser procesada, de manera que se pueda determinar su amplitud y fase, y medir qué porcentaje de la señal original fue recuperado, con el fin de tener un criterio más preciso de la medición realizada, comparando los tiempos de recorrido de la señal con la porción de señal que regresa al transductor.

En la Figura 1. 3 se muestra de forma general la estructura del SUTOS, en donde el circuito controlador es el medio de comunicación entre transductor y el computador del operador del sistema.



**Figura 1. 3** Diagrama de bloques del sistema en general

Realizada la medición en el punto deseado el valor medido, se almacena en la memoria del microcontrolador, esperando que el operador genere la orden de envío a través del puerto serie hacia un computador. El operador manipula la recepción de los datos provenientes del microcontrolador, mediante un programa computacional diseñado para la recepción y la tabulación de estos datos.

En la Figura 1. 4 se observa el diagrama de bloques del sistema de medición de profundidad de sedimentos para embalses SUTOS.

En este se muestra la estructura básica interna del circuito controlador con los elementos para la generación de la señal ultrasónica, la recuperación de las señales de eco y el transductor, mostrado como transmisor y micrófono ultrasónico.

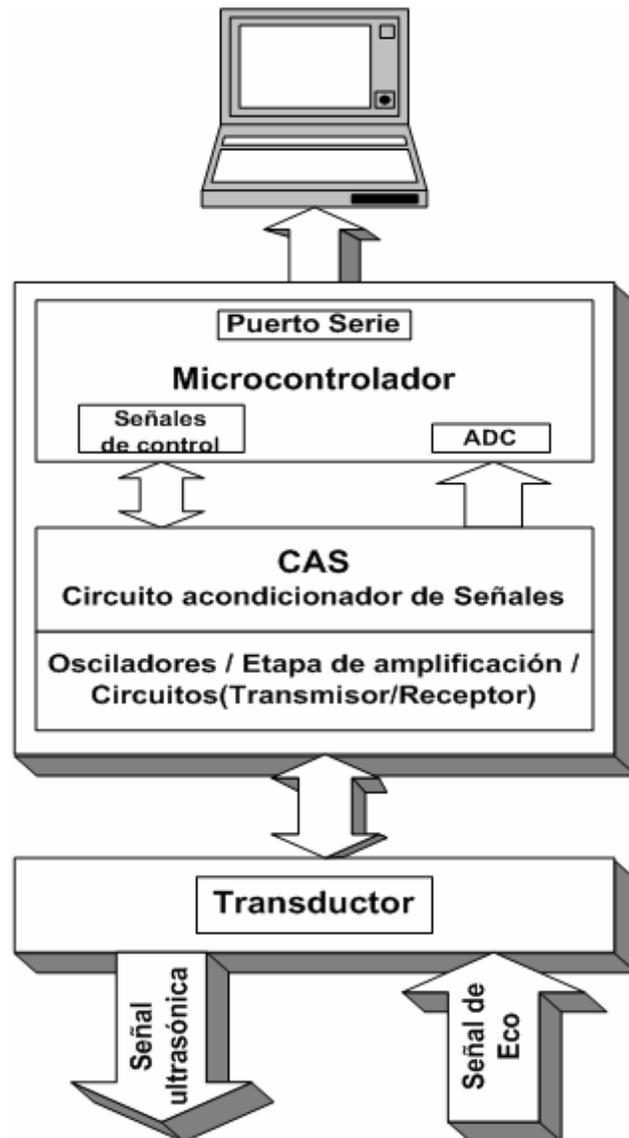


Figura 1. 4 Diagrama de bloques del SUTOS

Entre los principales criterios que se tomaron en cuenta para la implementación del SUTOS están:

- Alcance del eco: 0m-100m.
- Frecuencia de operación: 20kHz – 300kHz (podría ser mayor).
- Ecosonda (Transmite y recibe) o transmisor y receptor separados.
- El costo económico esté dentro del presupuesto del proyecto.
- Utilice tecnología de operación compatible con la tecnología al alcance del proyecto.
- Que la alimentación del dispositivo permita que sea portátil y resistente al agua.

## **Capítulo 2 Meta y objetivos**

### **2.1 Meta**

Desarrollo de un sistema ultrasónico de medición de niveles de profundidad subacuática, que pueda ser aplicado para medir la acumulación de los sedimentos que vierten las afluentes a un embalse.

### **2.2 Objetivo general**

Construir un sistema ultrasónico para topografía subacuática, a partir del concepto de operación de una ecosonda.

### **2.3 Objetivos específicos**

- Construir un circuito que asegure el acople y operación del transductor seleccionado.
- Diseñar un programa computacional, donde el usuario reciba los datos de las mediciones provenientes del circuito, hasta un computador.
- Desarrollar programas y rutinas de prueba para verificar la operación del circuito en la comunicación con el computador.
- Diseño y construcción de las tarjetas de circuito impreso para el sistema implementado.
- Diseñar el programa necesario para la tabulación de las mediciones realizadas por el sistema.

## Capítulo 3 Marco teórico

### 3.1 Descripción del proceso a mejorar

Durante muchos años los empleados encargados de la medición de profundidad han empleado el método la varilla graduada en la toma de medidas para estimar el nivel de los sedimentos en los embalses a los que el ICE debe de dar mantenimiento, producto de la generación de energía eléctrica.

En la Figura 3. 1 se presenta el diagrama de flujo del proceso de medición de profundidad aplicando el método de la varilla graduada. Como se muestra en el diagrama es un proceso sencillo, pero, es sumamente tedioso e impreciso. Los tiempos en la adquisición de los datos de profundidad son extremadamente largos, varían con la profundidad, debido a que al aumentar ésta, se tarda más sumergiendo la varilla.

La veracidad de los datos se ve comprometida a medida que transcurren las horas en la toma de las mediciones, debido al cansancio físico de la persona que está sumergiendo la varilla, el comportamiento del oleaje del lago producto del viento y en general de las condiciones climatológicas presentes durante la medición.

Este método resulta económicamente poco rentable, debido a que por lo menos tres personas deben estar en una lancha a la hora de realizar las mediciones.

El uso del SUTOS permitirá que las mediciones se realicen en una fracción del tiempo actual y dependan como máximo de un operario para el sistema. Esto gracias a que las mediciones en un punto del embalse se realizan en cuestión de segundos, permitiendo evaluar mayor cantidad de puntos en menor tiempo y con mediciones muy precisas.

En este caso no se pretende mejorar el proceso de medición de profundidad con la varilla graduada, sino, sustituirlo completamente por el uso del SUTOS.

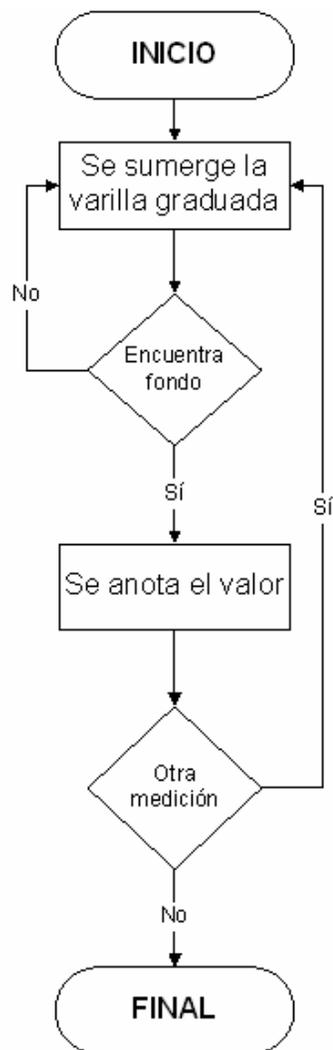


Figura 3. 1 Diagrama de flujo para el método de medición con varilla graduada

## 3.2 Antecedentes bibliográficos

### 3.2.1 Ecosonda multihaz

El principio de funcionamiento de la ecosonda se basa en la medida del tiempo que tarda una onda acústica en recorrer la distancia entre el punto de partida y el fondo del mar o cualquier otro objeto o superficie donde se refleja, y su retorno al punto inicial. La emisión y recepción acústica se realiza generalmente a través de un transductor que convierte pulsos eléctricos en variaciones acústicas y viceversa.

Desde 1960, la mayoría de los barcos de altura<sup>4</sup> van provistos de una ecosonda de precisión. En la actualidad las ecosondas se acompañan con el análisis por computadora para obtener una imagen instantánea del relieve bajo la quilla<sup>5</sup> del barco [4].

Actualmente modelos de ecosondas como la Marca Kongsberg-Simrad, modelo EM 300, utilizan 135 haces por banda y apertura de cada haz de  $1^\circ \times 2^\circ$ , con frecuencia de transmisión de 30 kHz para un alcance de hasta 5.000 m de profundidad, permitiendo una alta resolución (500 puntos por  $m^2$ ). Esta es una herramienta muy utilizada para la exploración de fondos marinos, reconocimientos arqueológicos, topografía del lecho marino, etc. [14]

---

<sup>4</sup> Se refiere a barcos que navegan en aguas muy profundas

<sup>5</sup> Es la parte inferior del barco, que esta sumergida en el agua

### 3.2.2 Transductores y sensores ultrasónicos

La Figura 3. 2 muestra el sensor ultrasónico HX 1200TR de marca HEXAMITE, diseñado para aplicaciones subacuáticas. Transmite señales de 160dB con un haz angosto de de  $\pm 9^\circ$  a 200kHz. Tiene un nivel de sensibilidad de recepción de -180dB/V/microbar<sup>6</sup>. El rango de recepción de ecos es de 0.1m a 25m, según las especificaciones del fabricante el dispositivo trabaja con circuitos de excitación de muy bajo costo y hace la aclaración que la distancia de operación varía con el cristal que se utiliza para generar la transmisión ultrasónica [7].



Figura 3. 2 HX1200TR Ultrasonic Transceiver [7]

En la Figura 3. 3 se observa las formas de onda para la activación del dispositivo; la gráfica A representa una señal de control aplicada al circuito de disparo de la ecosonda, iniciando en T0 en estado alto (5V), y pasando luego a un nivel bajo (0V), generando con esto una señal ultrasónica en la ecosonda durante ese pulso de activación.

Asumiendo que exista un objeto (sedimentos) a una distancia “X” del transductor, la señal ultrasónica provocará ondas de eco que eventualmente regresarán a la ecosonda. El eco que captado es amplificado 1000 veces (gráfica B) y comparado digitalmente con la señal ultrasónica de salida (gráfica C).

El tiempo T1 es el tiempo transcurrido entre el pulso de activación en T0 y el regreso de la señal reflejada en el objeto. Midiendo la diferencia entre T1 y T0, se puede determinar, indirectamente, la distancia al objeto que provocó la reflexión.

---

<sup>6</sup> Unidad de presión (bar)

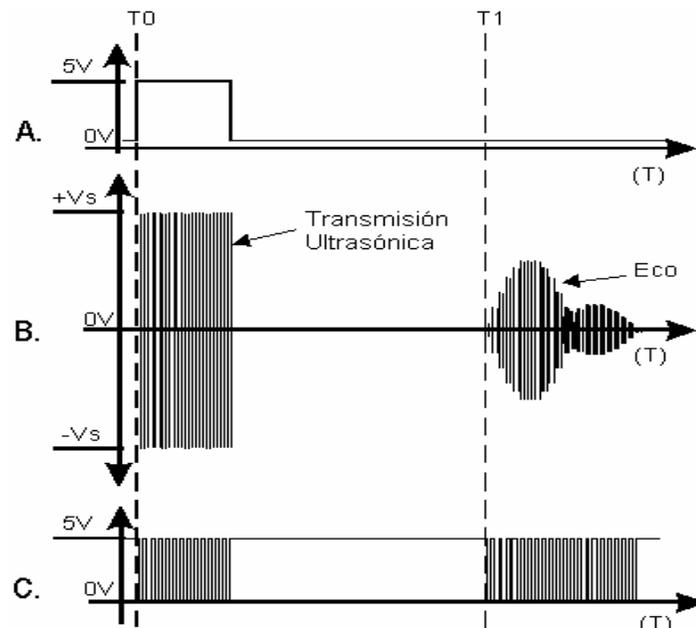


Figura 3.3 Esquema de transmisión y recepción ultrasónica [7]

Este sensor ultrasónico también se puede encontrar como un transductor (referido a transmisor) y micrófono ultrasónico equivalentes para las características antes mencionadas.

### 3.2.3 Principios físicos relacionados

#### a) Propagación del sonido en el agua.

Las ondas sonoras y ultrasonoras se transmiten en el mar a una velocidad entre 1 400 y 1 600 metros por segundo, mientras que en la atmósfera la velocidad de propagación es de 340 metros por segundo.

En los primeros 50 metros de profundidad se encuentra que la acción de la presión sobre la velocidad del sonido es mínima, y como la temperatura suele mantenerse constante, no afecta a la velocidad.

Estas características del sonido en el agua de mar pueden aplicarse análogamente al agua dulce o agua “fresca”, presente en la mayoría de los embalses [16].

### **b) Cristal piezoeléctrico**

Al someter un cristal piezoeléctrico a deformaciones mecánicas, aparece en él una polarización que da origen a un campo eléctrico. Análogamente, la aplicación de un campo eléctrico se acompaña de vibraciones elásticas del material [15], consecuencia del denominado efecto piezoeléctrico inverso. De este modo, al excitar un cristal con un campo eléctrico alterno, el cristal oscilará con la misma frecuencia de excitación que el campo, y su amplitud tomará valores extremos para ciertas frecuencias, denominadas “de resonancia”.

### **c) Reflexiones de ondas**

Para realizar una medición adecuada es necesario conocer la manera en la que las ondas del sonido se reflejan ante la presencia de objetos. Para ello se requiere de un análisis estadístico de este comportamiento para poder discriminar entre lo que son ecos deseados o simples niveles de ruido del medio en el que se está operando.

## Capítulo 4 Metodología

### 4.1 Reconocimiento y definición del problema

Para una mejor comprensión del problema fue necesario iniciar una investigación sobre los métodos comúnmente utilizados para la medición de profundidad en tanques y embalses, y los métodos de reconocimiento o topografía subacuática.

El intentar medir la profundidad de la piscina en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica con una varilla graduada con una cinta métrica en un costado, fue suficientemente tedioso, sobre todo por la lluvia que imperaba. Esta experiencia permitió conocer los contratiempos que conlleva el realizar una medición de profundidad, con el método de la varilla graduada.

De ahí la necesidad de buscar una solución que brinde comodidad y precisión al realizar una medición para estimar la distancia entre la superficie del agua y el fondo del espacio donde está confinada, ya sea una piscina o un embalse.

### 4.2 Obtención y análisis de la información

La información obtenida en trabajos finales de proyectos de graduación, libros de la biblioteca José Figueres Ferrer y búsquedas en Internet, permitieron dimensionar la magnitud del problema y el planteamiento de una posible solución.

Producto de esa información se logró obtener una clasificación de los diferentes tipos de transductores que se encuentran en el mercado, las características de los materiales piezoeléctricos utilizados en el desarrollo de transductores, ecosondas y sonares en general.

### 4.3 Evaluación de alternativas

La información obtenida del informe de proyecto de graduación, “Diseño de un sonar para el monitoreo de la formación de sedimentos en embalses”, del Ing. Alexander Gdo. Bolaños García y de la página del Hexamite, fabricante del transductor *HE123TR* aportaron información para generar las pruebas para descartar o no el uso de este transductor en el proyecto.

Para el desarrollo de estas pruebas con el transductor fue necesario generar programas y *hardware* de prueba a nivel del microcontrolador PIC 16LF877A, además de usar el monitor del puerto serie del programa PICC Compiler de CCS<sup>7</sup>.

La información encontrada fue filtrada a través de los criterios de diseño que están dentro de las expectativas o metas que se persiguen con el desarrollo de este proyecto.

---

<sup>7</sup> Custom Computer Services, Inc.

## **4.4 Implementación de la solución**

### **4.4.1 Selección del Transductor**

Se realizó una investigación sobre los posibles proveedores de transductores tipo ecosonda, tomando en cuenta precios, disponibilidad, tiempo de entrega, tamaño del dispositivo o dispositivos, consumo de potencia eléctrica, frecuencia y profundidad máxima de detección.

### **4.4.2 Circuito controlador**

El circuito controlador se desarrollo entorno al PIC seleccionado y la implementación de la tarjeta de circuito impreso que facilitara su operación, en las áreas de comunicación vía puerto serie, entradas y salida digitales, y canales de ADC.

### **4.4.3 Circuito de transmisión y recepción de ultrasonido**

Se realizaron pruebas a diferentes circuitos montados en *protoboard* para la transmisión y recepción; con el fin de determinar el circuito que se acoplara a los criterios de diseño del sistema.

Una vez seleccionado el circuito se procedió a realizar el montaje de este en una tarjeta de circuito impreso.

### **4.4.4 Programa para la PC del operador**

Para este programa se realizaron rutinas de programación a nivel de la PC y el microcontrolador para probar la comunicación entre estos dispositivos.

#### 4.5 Evaluación del desempeño

La evaluación del desempeño del sistema se realizó de una manera modular, ejecutando pruebas a cada uno de los bloques funcionales del circuito controlador y del programa de control. Una vez comprobada la operación de un módulo se procedió a continuar con la etapa siguiente a este.

Las pruebas para evaluar el funcionamiento de los módulos se dividieron de la siguiente manera:

- Circuito oscilador/excitador de transductor para la transmisión: pruebas orientadas a verificar la frecuencia de operación, los niveles de tensión de la onda ultrasónica de salida del transductor.
- Circuito Filtro/Amplificador: verificar que el filtrado y los niveles de ganancia para la señal recibida sea óptimos. Mediciones de amplitud, margen de ruido, etc.
- Almacenamiento y envío al puerto serie de los datos: escribir datos en la memoria *RAM* del microcontrolador y direccionarlos hacia el puerto serie para su envío al computador.
- Circuito regulador de tensión: convierte de 12VCD a 5VCD para los dispositivos que requieran este valor de tensión para su operación
- Comunicación Serie: se realizaron rutinas para probar el adecuado funcionamiento de la comunicación entre el computador y el microcontrolador.

#### **4.6 Reevaluación y rediseño**

Cada una de las pruebas realizadas fue documentada con el fin de seguir un proceso metodológico de mejoramiento continuo de cada módulo, hasta llegar al sistema final. Esta documentación permitirá un manejo claro de la información relacionada al estado del proyecto y será una guía en la detección de errores y en las correcciones posteriores que requiera el diseño, para su mejoramiento y expansión.

Las limitaciones actuales del proyecto están en función del consumo de potencia vrs profundidad de alcance, y frecuencia de resonancia del transductor. Para esta solución planteada se pretende lograr los 50m de profundidad efectiva en la detección de sedimentos en el fondo del embalse.

Por tanto el próximo diseño deberá partir de esa profundidad hasta lograr, por lo menos, los 100m de alcance en la localización de sedimentos.

## Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

### 5.1 Selección de la solución final

La primera etapa del proyecto se dedicó exclusivamente a determinar el estado del primer transductor, el HE123TR de HEXAMITE. Para esto fue necesario desarrollar el *hardware* recomendado por el fabricante [7], Figura 5. 1, necesario para lograr un circuito que oscilara a 23kHz, así como la programación del microcontrolador para poder controlar los tiempos de transmisión y recepción de las señales de ultrasonido.

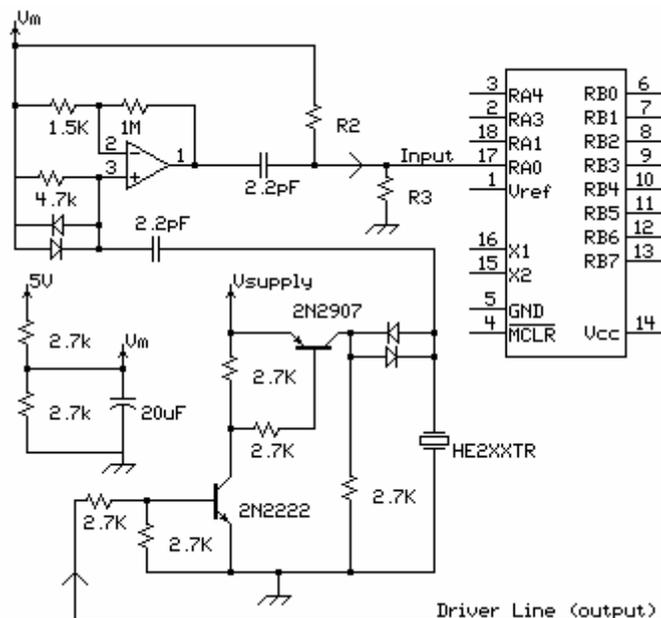


Figura 5. 1 Circuito recomendado por HEXAMITE para el HE123TR [7]

Las pruebas realizadas para determinar la profundidad de la piscina del ITCR, con el *hardware* implementado, consistían en ubicar el transductor en un punto de la piscina. Conociendo de antemano la profundidad se podía estimar el tiempo que tardaría la señal de eco en retornar a la fuente de ultrasonido (transductor HE123TR).

## Capítulo 5 Descripción detallada de la solución

---

Para observar la señal transmitida y los ecos recibidos se utilizó un Osciloscopio Marca TEKTRONICS, el *hardware* construido para el PIC 16LF788A, que permite aprovechar la comunicación vía puerto serie entre la PC y el microcontrolador, para controlar los diferentes parámetros de la prueba junto con el monitor del puerto serie instalado en la PC.

La Figura 5. 2 muestra en el canal 1 del ORC, la señal de control enviada por el microcontrolador para excitar el transductor, en el canal 2 del ORC se muestra la señal transmitida por el transductor proyectado hacia el fondo de la piscina. El recuadro en el canal 2 muestra el lapso de tiempo donde se debería de haber presentado la recepción de uno o varios de los ecos de la señal ultrasónica transmitida. Esta prueba fue realizada bajo las condiciones de la Tabla 5. 1.

**Tabla 5. 1** Condiciones para la prueba del HE123TR

Temperatura del agua:	24.2 C°
Profundidad:	1.74m
Velocidad del Sonido aprox.:	1489.491 m/s
Tiempo aprox. de respuesta de ecos:	2.336ms
Extensión cable coaxial RG59/75ohm	2.1m

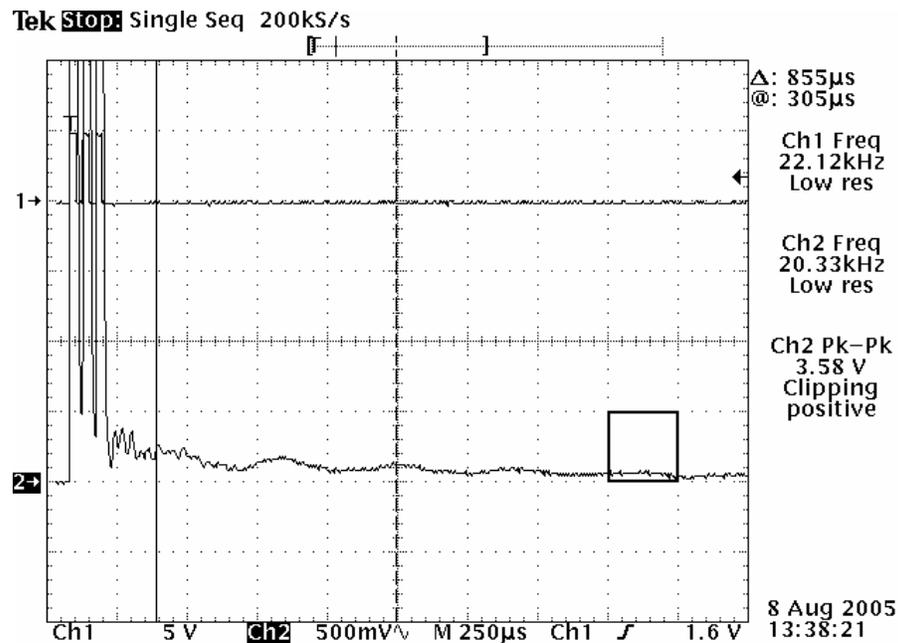


Figura 5. 2 Ch1: señal de control. Ch2: Tx y Rx del transductor.

Estos resultados permitieron determinar que el transductor operaba de manera defectuosa, ya que las lecturas del osciloscopio mostraban la señal de transmisión, pero nunca se obtuvo recepción alguna, ni en la línea del transductor, ni en la etapa de amplificación de la señal recibida.

Contrario a lo esperado el transductor entra en un estado de generación de replicas de los pulsos aplicados, con una amplitud menor al 1% de la original. Esto hace imposible apreciar o identificar los ecos que se deben de producir al chocar las ondas de ultrasonido contra el fondo de la piscina.

Este hecho provocó grandes contratiempos, debido a que tuvo que iniciarse una búsqueda de un transductor apto para el proyecto, tanto en materia económica, como en aspectos de potencia eléctrica de operación, frecuencia de resonancia, directividad de la señal transmitida, sensibilidad de recepción, máxima profundidad de alcance y tiempos de entrega del producto.

## Capítulo 5 Descripción detallada de la solución

La Tabla 5. 2 muestra la comparación de los transductores que cumplen varios de los parámetros de selección. Los dispositivos que se muestran en la tabla no se encuentran disponibles en el país, su tiempo de entrega es de aproximadamente 6 semanas.

**Tabla 5. 2** Comparación de transductores

Dispositivo	Potencia Máx (W)	Profundidad de Operación (m)	Frecuencia (kHz)	Fabricante (Precio \$)
 TC2120	2000	50	50	RESON Inc.[17] (No disponible)
 TC2111	50	50	200	RESON Inc.[17] (340)
 HE1200TR	50	25	200	HEXAMITE [7] (215)
 HE1495TX/RX	5	10	245-495	HEXAMITE [7] (215)

## Capítulo 5 Descripción detallada de la solución

---

De todos los dispositivos de la Tabla 5. 2, el TC2111 de Reson Inc [17], fue el seleccionado por ser compacto, con un consumo de potencia relativamente bajo, precio, tiempo de entrega (3 semanas), frecuencia de resonancia y profundidad de operación. La Tabla 5. 3, muestra las principales características del transductor TC2111 adquirido para la realización del proyecto SUTOS.

**Tabla 5. 3** Especificaciones técnicas del TC2111 de Reson Inc.[17]

TECHNICAL SPECIFICATIONS	
Resonant Frequency:	200KHz $\pm$ 3KHz
Transmitting sensitivity:	163dB $\pm$ 3dB (re 1 $\mu$ Pa/V at 1m)
Receiving Sensitivity:	-190dB $\pm$ 3dB (re 1V/ $\mu$ Pa)
Impedance:	200ohm $\pm$ 60ohm at 200kHz
Beam width:	18° $\pm$ 3°
Beam shape:	Conical
Max input power:	50W (at 1% duty cycle)
Operating depth:	30m
Survival depth:	50m
Operating temperature range:	+2°C to +35°C
Storage temperature range:	-30°C to +50°C
Cable (length and type):	10m Coax 2*1 (O.D. 5mm) - pigtail
Weight in air, with cable:	0,4kg
Housing:	PVC with union nut

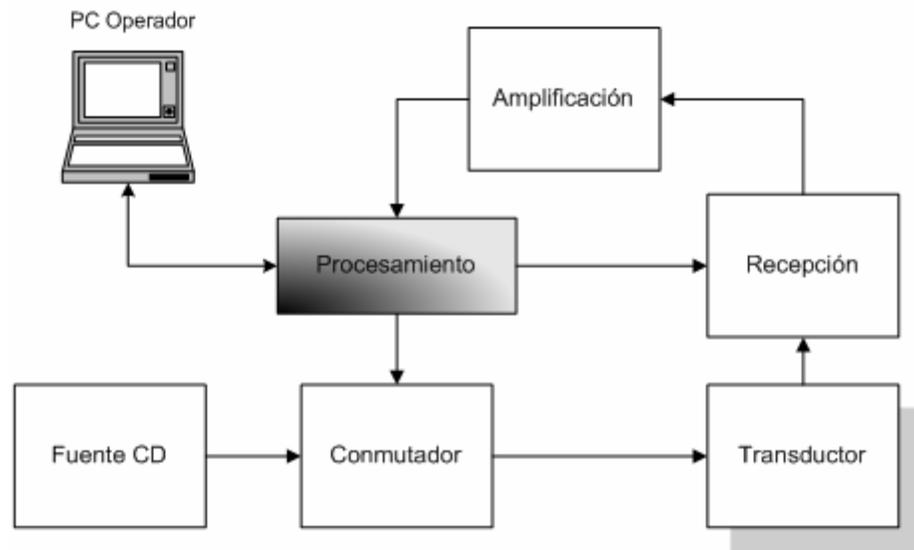
Extracto de la hoja de datos del fabricante.

Por otro lado la compra de este transductor representó un completo rediseño del *hardware* fabricado anteriormente, tanto para la frecuencia de resonancia, como para la potencia de operación del dispositivo.

En este punto la implementación del *hardware* estaba en función de la frecuencia de resonancia del transductor, 200kHz, y la potencia máxima de operación, 50W, todo esto dentro del contexto de diseño de un prototipo final que sea completamente portátil y resistente a la humedad extrema.

## Capítulo 5 Descripción detallada de la solución

En síntesis el *hardware* implementado posee una etapa de conmutación de tensión CD a CD (Convertidor CD-CD), una etapa de transmisión de la señal de ultrasonido y una de recepción de ecos, la etapa de amplificación de la señal recibida, y la etapa de procesamiento (en el microcontrolador) de los ecos recibidos para convertirlos en valores de distancia recorrida (profundidad) de la onda de ultrasonido para transmitirlos a la PC. La programación en el microcontrolador hace posible la integración y control de cada uno de estos módulos, como se observa en la Figura 5. 3.



**Figura 5. 3** Diagrama de bloques para el *hardware* de la solución final.

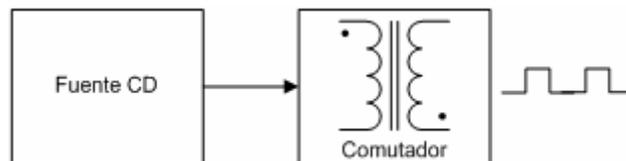
## 5.2 Descripción del *hardware* implementado

### 5.2.1 Circuito conmutador

El transductor utilizado posee una frecuencia de resonancia de 200kHz, esto quiere decir que requiere de una señal de tensión pulsante a esta frecuencia de resonancia para el cristal piezoeléctrico del transductor.

Una de las limitaciones del proyecto, es que la aplicación final debe ser portátil, lo que sugiere el uso de baterías para brindar la potencia eléctrica necesaria para el funcionamiento del sistema. Esta limitante genera un problema de extrema atención en el diseño del *hardware*, el hecho de convertir la tensión de CD de las baterías utilizadas, en tensión CD pulsante para provocar las vibraciones en el transductor, que generen las ondas de ultra sonido que se desplazaran en el agua.

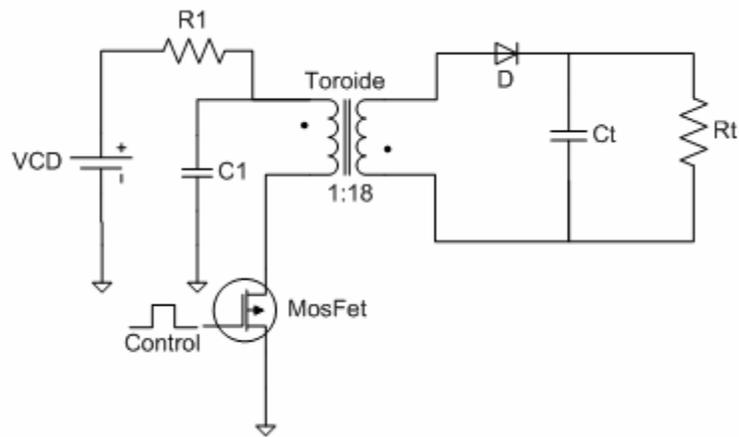
El circuito conmutador es un convertidor de CD a CD. Además permite el aislamiento de impedancias entre la entrada y la salida, esto gracias al transformador que forma parte del circuito, como se observa en el diagrama de la Figura 5. 4.



**Figura 5. 4** Diagrama de bloques, convertidor CD-CD

El circuito de la Figura 5. 5, muestra el modelo del circuito conmutador implementado para producir la transmisión de ondas de ultrasonido a través del transductor, este último modelado por el circuito paralelo formado por el  $C_t$  y  $R_t$ . Este circuito paralelo se conoce como modelo de carga para un sensor piezoeléctrico [9], en donde la capacitancia  $C_t$  está determinada por el área, el ancho y la constante dieléctrica del dispositivo; la resistencia  $R_t$  se determina por la capacidad de disipación de energía estática del material.

Usando el medidor LCR en el laboratorio, la capacitancia en paralelo medida, para el TC2111 es de 1,387nF y la resistencia paralela es de 190 $\Omega$ .



**Figura 5. 5** Circuito conmutador para transmisión con el TC2111

Con el modelo de capacitor y resistencia en paralelo del transductor, se puede calcular el valor de la inductancia asociada a este, a través de la ecuación 5.1.

$$L = \frac{1}{\omega^2 C_t} \quad (5.1)$$

$$L_t = \frac{1}{(2\pi \cdot 200000)^2 138.7 \times 10^{-12}} = 0.456mH$$

Con el valor de la inductancia del transductor ( $L_t$ ), se procedió a seleccionar el transformador para realizar el circuito conmutador, tomando en cuenta que el mejor acople de impedancias entre el transductor y el circuito se obtiene cuando la relación de la inductancia del secundario y la inductancia del transductor es de 1.

Se eligió utilizar un núcleo toroidal para la elaboración del transformador, ya que este tipo de núcleos es usado para los transformadores de pulso, debido a su buena respuesta para aplicaciones de alta frecuencia [1].

El toroide utilizado es del tipo J ya que posee baja resistividad volumétrica y un núcleo de bajas pérdidas para frecuencias desde 1kHz hasta 1MHz [1]. El índice de inductancia  $A_L$  varía según las dimensiones del toroide como se aprecia en la Tabla 5.4.

**Tabla 5.4** Dimensiones de los toroides utilizados

Toroide #	Diámetro externo (cm)	Diámetro interno (cm)	Ancho (cm)	$A_L$ mH/1000 Vueltas
1	0.9525	0.475	0.4572	2110
2	1.27	0.714	0.477	2750
3	1.27	0.792	0.635	2990

La ecuación 5.2 permite calcular el número de vueltas en el secundario que permita un valor de inductancia cercano al de  $L_t$ , para obtener el mejor acople de inductancias.

$$N = 1000 \sqrt{\frac{L_t(mH)}{A_L(mH/1000vueltas)}} \quad (5.2)$$

$$N = 1000 \sqrt{\frac{0.456(mH)}{2110(mH/1000vueltas)}} = 14.7 \cong 15vueltas$$

El número de vueltas en el primario debe ser el mínimo para hacer que la ecuación 5.2 tenga validez. Por eso se utilizó una vuelta de alambre de cobre # 22, calibre suficiente para el manejo de la corriente del bobinado del secundario y la vuelta del primario.

La resistencia  $R_1 = 10\Omega/10W$ , fue utilizada para mantener una corriente constante de alrededor de  $I_D = 850mA$  en el MOSTET IRFZ20, utilizado para realizar la conversión de CD a CD a través de una señal pulsante control a 200kHz, proveniente del microcontrolador. El MOSFET seleccionado posee una resistencia en conducción D-S, de solo  $0.1\Omega$ , hasta 15A y una alta respuesta en frecuencia (ver anexo 4).

La conmutación de encendido y apagado del MOSFET a la frecuencia del microcontrolador generan un una tensión de rizado cercano a 1.5 voltios en lado del primario, que se ve aumentada 15 veces del lado del secundario; por lo que se recurrió la uso del capacitor  $C_1 = 47\mu F$ , para mejorar considerablemente este rizado.

El uso del diodo D, en el circuito conmutador, se fundamenta en la necesidad de eliminar la componente negativa de la señal alterna resultante en el secundario, como lo muestra la Figura 5. 6. Esto con el fin de aplicar una señal cuadrada a la frecuencia de resonancia del transductor, logrando que en el pulso positivo de la señal el campo eléctrico aplicado al transductor lo fuerce a vibrar y tenga tiempo de liberar toda la energía mecánica durante el tiempo en bajo de la señal cuadrada.

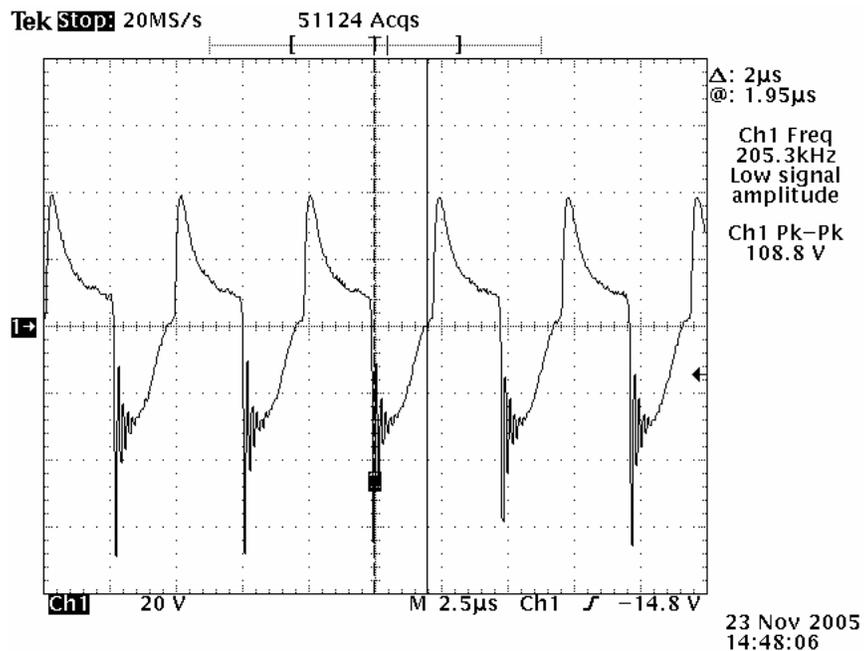


Figura 5. 6 Señal alterna en el secundario antes del diodo D.

Un diodo de respuesta rápida adicionado en serie entre el transductor y el secundario del toroide funcionó como recortador de media onda, dando como resultado la señal mostrada en la Figura 5. 7, aplicada al modelo del transductor TC2111.

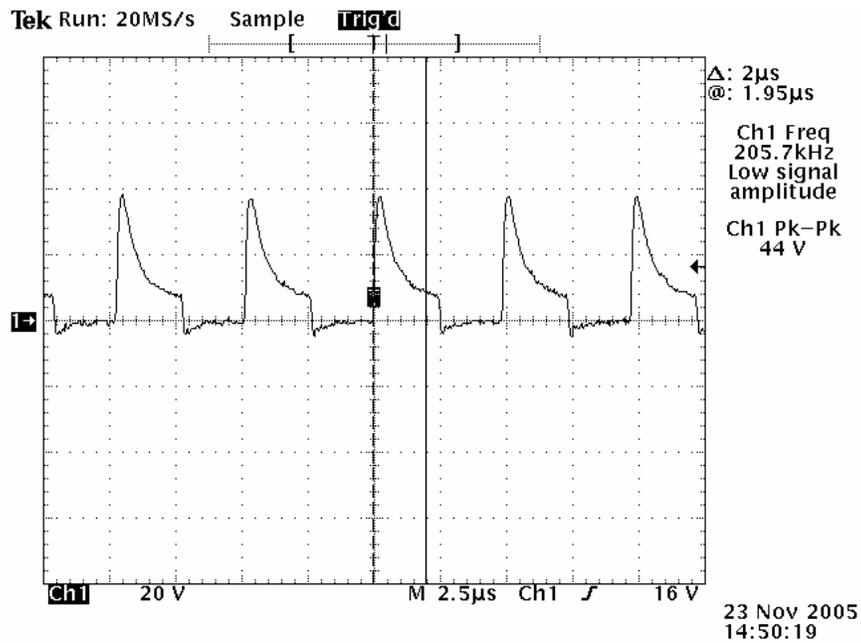


Figura 5.7 Señal aplicada al modelo del transductor TC2111.

La señal obtenida es muy cercana a la que se requiere para operar el transductor a la mitad de la potencia, esto es aproximadamente a  $50V_{P-P}$ , ya que la potencia máxima es 50 W y la resistencia  $190\Omega$ .

### 5.2.2 Circuito amplificador de ecos

El circuito amplificador de ecos se basa en el uso del dispositivo AD605, un amplificador diferencial de bajo ruido, doble canal y ganancia variable lineal en dB, utilizado comúnmente en aplicaciones de ultrasonido, mediciones de señales de baja intensidad en ambientes ruidosos y en equipos portátiles, ya que solo utiliza una fuente de CD de 5V, en un encapsulado tipo DIP (*Dual In line Package*) de 16 pines.

El valor de la amplitud de las señales de ecos que se pueden recibir oscila entre los 200 y 300mV. Esta señal es sumamente ruidosa por lo que la etapa de filtrado de ruido y amplificación de la señal recibida es necesaria a la hora de discernir entre una señal de eco recibida o ruido ambiente del entorno de la medición.

La Figura 5. 8, muestra el diagrama esquemático de conexiones para la operación con los dos amplificares del encapsulado, aprovechando el doble de ganancia en esta configuración. La entrada de control *On/Off* es manejada por el microcontrolador, permitiendo habilitar o no el amplificador, para operar de manera óptima en la parte de transmisión y recepción.

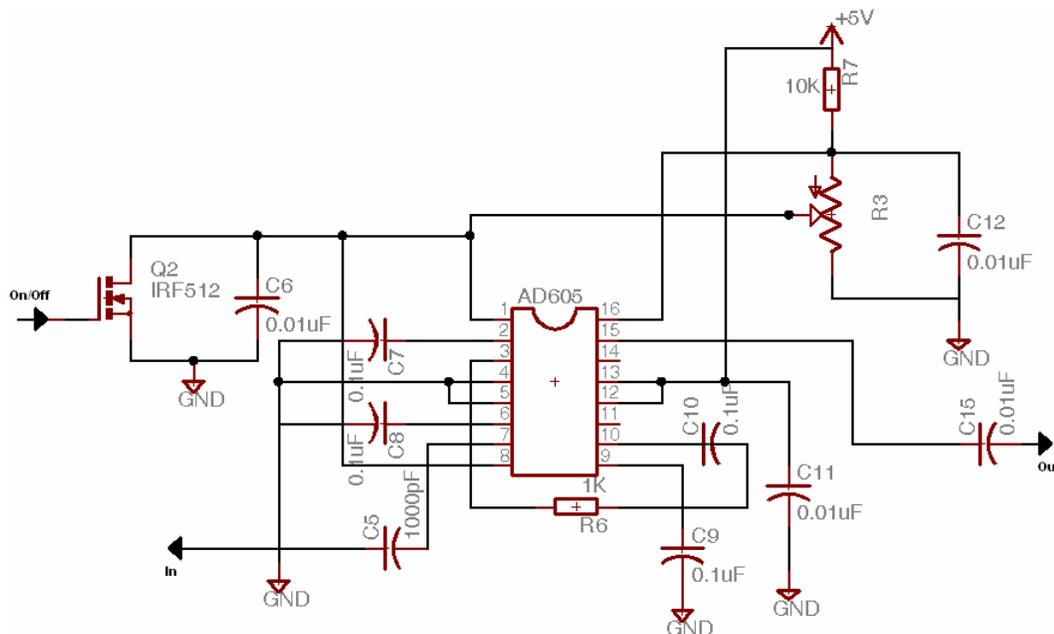


Figura 5. 8 Diagrama esquemático para la operación del AD0605

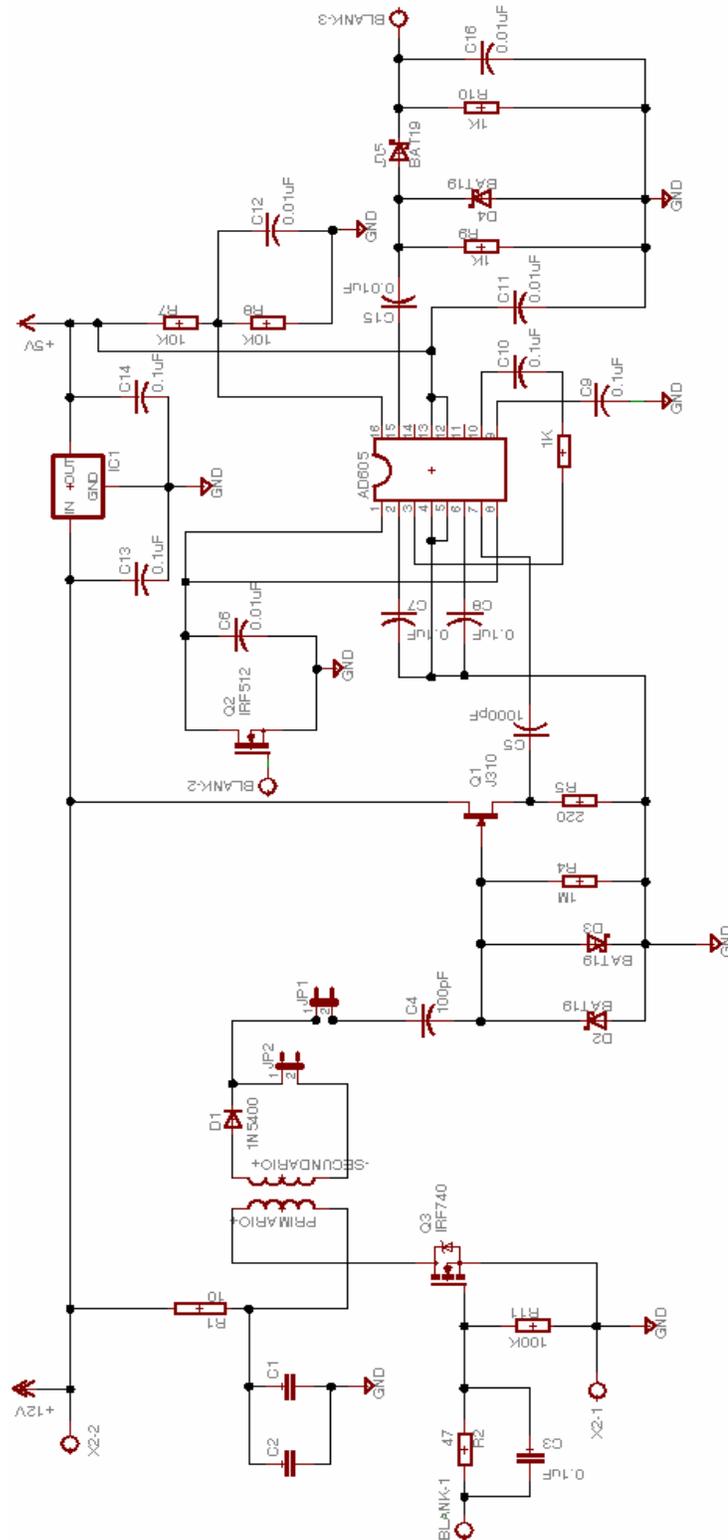


Figura 5.9 Diagrama esquemático completo del circuito de TX/RX del SUTOS

### 5.2.3 Hardware para el microcontrolador

El microcontrolador se encarga de generar la señal de 200kHz para la conmutación del MOSFET en el circuito conmutador, además genera las señales de control necesarias para activar y desactivar el circuito amplificador de ecos, controla la comunicación entre la PC y el SUTOS y la captura de las señales provenientes del amplificador mediante un canal de ADC (*Analog to Digital Converter*).

Este circuito fue diseñado con el fin de obtener el mayor provecho de las prestaciones de este tipo de microcontrolador, como lo muestra el extracto de la hoja de datos del fabricante MICROCHIP, para el PIC16LF877A, en la Tabla 5. 5.

**Tabla 5. 5** Especificaciones para microcontroladores de MICROCHIP

Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I <sup>2</sup> C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F876A	14.3K	8192	368	256	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F877A	14.3K	8192	368	256	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2

La serie LF utilizada en el proyecto tiene las mismas características de la serie F, con la ventaja que posee un menor consumo de potencia, ideal para aplicaciones portátiles o que requieran bajo consumo de potencia eléctrica.

El uso del MAX233 para controlar la comunicación entre las dos líneas de la comunicación serie del microcontrolador y el conector proveniente de la PC. Este tipo de controlador viene en un encapsulado de 18 pines tipo DIP, integrando los capacitores que normalmente se usarían en el MAX232, permitiendo el diseño de aplicaciones más compactas y portátiles, ya que utiliza sólo una fuente de 5V CD.

El circuito diseñado se integró en una placa para circuitos impresos o *PCB* (*Print Circuit Board*). El proceso de elaboración inició desde la concepción del circuito completo a diseñar, hasta el uso del *software* para pasar del diseño esquemático al diseño en *PCB*.

## Capítulo 5 Descripción detallada de la solución

El diagrama esquemático de la Figura 5. 10, muestra los diferentes circuitos implementados para la operación y control del mismo microcontrolador. Este *hardware* hace posible la utilización de los 33 pines de entrada/salida, los 8 canales para el ADC, LED's indicadores de estado de salidas, comunicación serie, dos frecuencias de operación (cristales de 10 y 20MHz), y conexión para pantalla LCD en configuración de 8 bits de datos.

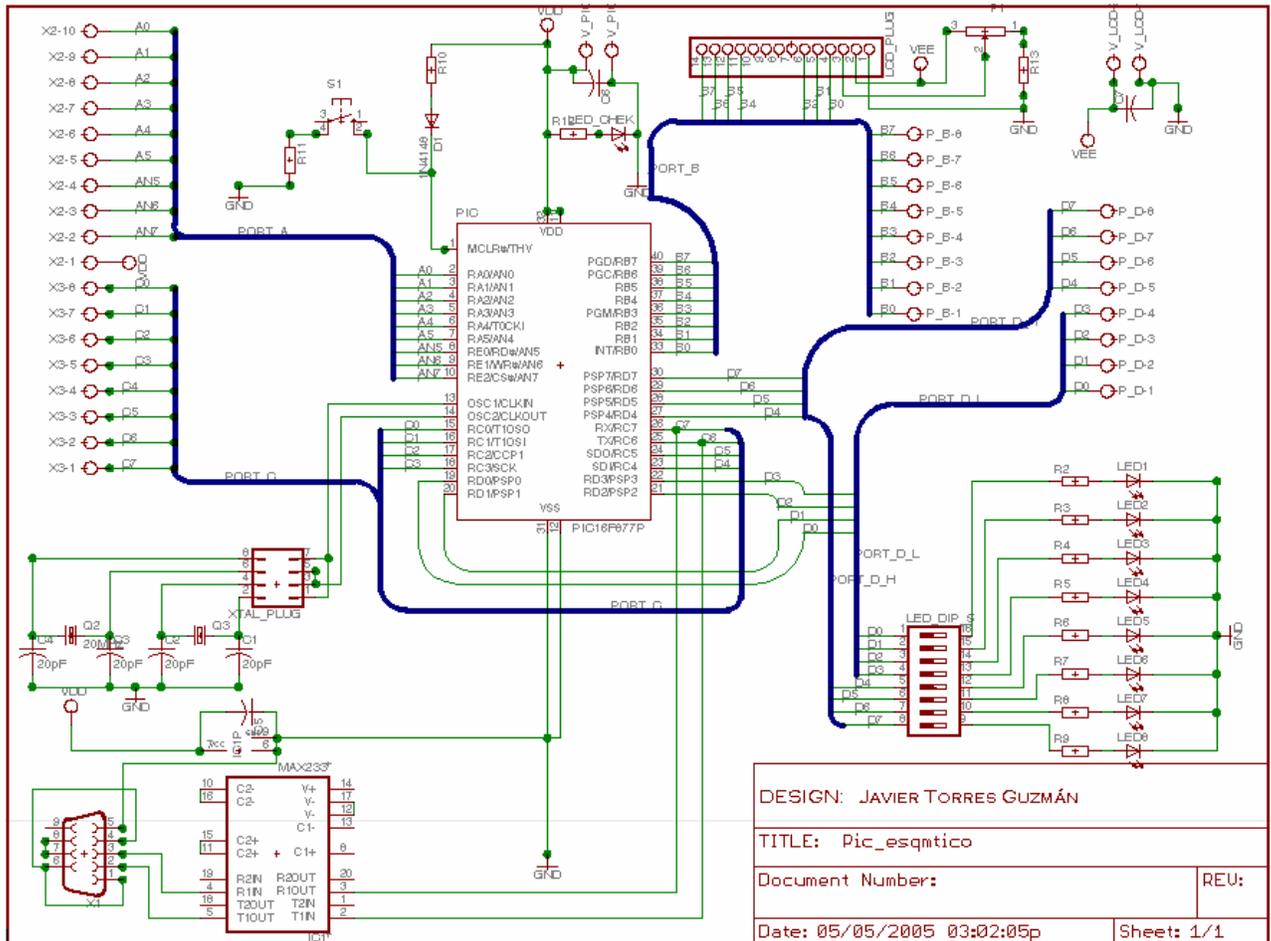


Figura 5. 10 Diagrama esquemático del circuito para el microcontrolador

### 5.3 Descripción del *software* desarrollado

#### 5.3.1 Programación del microcontrolador PIC16LF877A

Como se ha venido mencionando, el microcontrolador realiza la función de administrador de operación de los diferentes dispositivos que integran el SUTOS. Por esto la programación de este debe ser tal que permita al operador únicamente preocuparse por solicitar una medición en el punto y desplazamiento deseados, mientras en el microcontrolador se administra la operación del circuito conmutador, la generación de la señal de 200kHz para este, la habilitación o no del circuito amplificador de ecos, la captura, procesamiento y envío de los datos recibidos como ecos hasta la PC del operador que solicitó la medición.

El programa utiliza tres rutinas de interrupción para su operación además de otras rutinas para el cálculo de la distancia y habilitación del amplificador.

##### a) Rutina de lectura y escritura del puerto serie.

Esta rutina utiliza la interrupción que se genera en el microcontrolador cuando se recibe un dato en el puerto serie. Se realiza la captura del caracter correspondiente a una instrucción enviada por el operador de la PC, y se procede a ejecutar esa instrucción llamando correspondiente a la instrucción.

##### b) Rutina para generación de la señal de 200kHz.

Esta rutina habilita la interrupción del Timer 2, produciendo una señal de 200kHz para la conmutación del MOSFET. Además le permite al operador controlar en número de ciclos de la señal que desea utilizar en la transmisión, a través del tiempo  $T_x$ , la cantidad de estos varía en función de la profundidad.

##### c) Rutina para habilitar el amplificador de ecos recibidos

Una vez que se realiza la transmisión de ondas ultrasónicas se espera una fracción de tiempo para iniciar esta rutina que habilita el circuito del amplificador para la recepción de los ecos recibidos. Esto para que no exista un traslape en entre la señal transmitida y el amplificador de ecos.

**d) Rutina de inicio de Medición**

Esta rutina solo espera que el operador envíe la señal de inicio de *hardware*, una vez recibida, el sistema realiza un chequeo interno de la memoria de datos disponible, y regresa al operador un mensaje confirmación que el *hardware* está listo para la captura de datos.

**e) Rutina de control de tiempos**

Como se mostró en la Figura 3. 3, el tiempo  $T_0$  marca el inicio de un cronómetro en microsegundos, tomando en cuenta el tiempo de transmisión y se detiene en el momento  $T_1$ , en que se detecta una entrada en el canal de ADC. Esta rutina calcula la diferencia entre el  $T_1$  y el  $T_0$ , y posteriormente calcula la distancia a la que se encuentra el objeto que provocó la reflexión de la onda de ultrasonido, mediante la ecuación 5.3, tomando en cuenta que el tiempo registrado es el doble, ya que es el tiempo que tarda la señal ultrasónica en ir y venir. Por tanto la distancia finalmente se determina despejando “d” de la ecuación 5.4.

$$v = \frac{d}{t} \quad (5.3)$$

$$vt = 2d \quad (5.4)$$

Si el sistema no recibe un dato en un lapso de tiempo correspondiente al tiempo de ida y vuelta de la señal, a máxima profundidad de estimación, se toma como un dato no válido y el sistema incrementa el número de pulsos transmitidos del envío anterior, para realizar una nueva medición. Si esta situación continúa después de 30 segundos se envía un mensaje de error al operador, indicándole que la profundidad a medir sobrepasa las capacidades del equipo.

**f) Rutina de lectura de ADC**

Genera una interrupción cuando se presenta una señal analógica procedente del amplificador de ecos. Las señales recibidas en el canal de ADC seleccionado, son convertidas en valores discretos proporcionales a la magnitud de la entrada analógica en un momento determinado. Los valores capturados son almacenados en un arreglo de posiciones de memoria para luego ser transmitidas a un archivo de texto a la PC del operador a través del programa diseñado para este fin.

La Figura 5. 11 muestra el diagrama de flujo para las diferentes funciones realizadas por el programa del microcontrolador. Combina las acciones realizadas dentro del microcontrolador, con las instrucciones giradas por el operador a través del puerto serie de la PC.

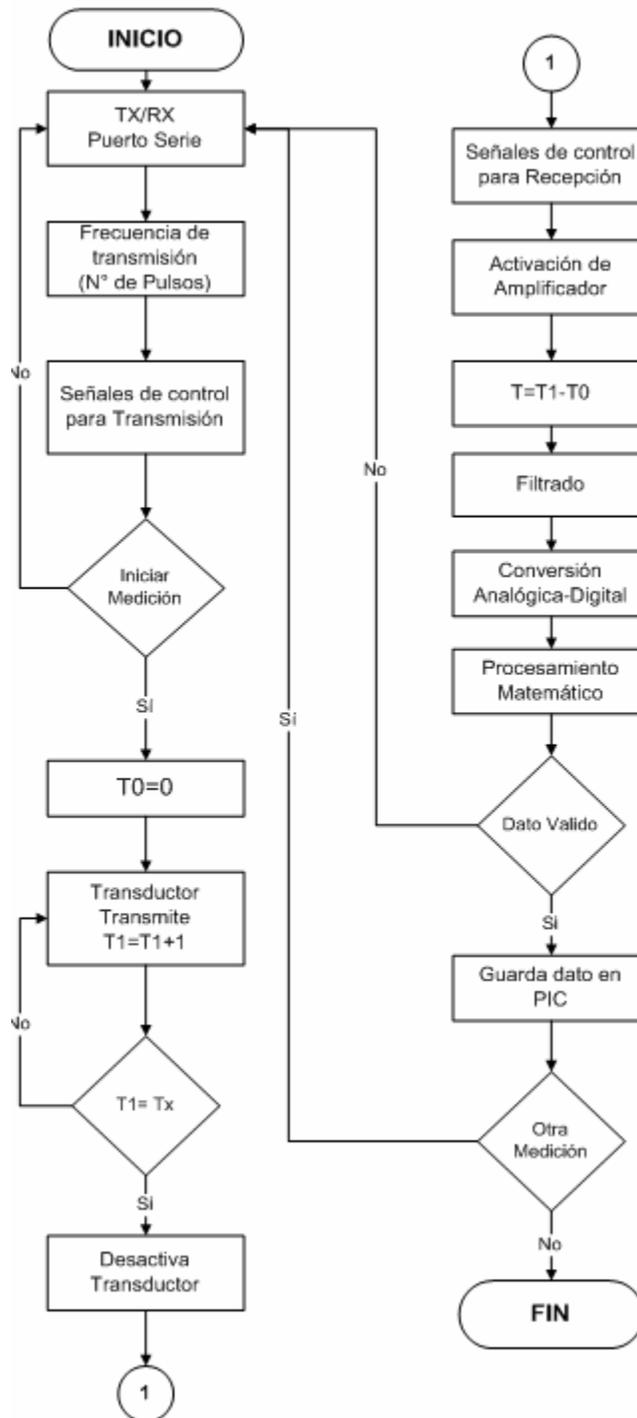


Figura 5. 11 Diagrama de flujo para la aplicación del microcontrolador

### 5.3.2 Programa para la PC del operador

El programa desarrollado para la PC del operador, le permite a este configurar la longitud (E) y latitud (N), del punto de origen de la medición, ya que el módulo final estarán disponibles a través del sistema GPS. Además permite indicar el desplazamiento que se realizará, para que cada muestra que realice el sistema genere un dato actualizado de longitud, latitud y profundidad, junto con la hora específica de cada medición.

La Figura 5. 12, muestra la pantalla principal para el operador, que también le permite configurar a través de cuál puerto serie desea conectar el equipo del SUTOS a la PC. El botón de inicio es para que el microcontrolador evalúe el espacio en la memoria para realizar mediciones. El operador recibe un mensaje de confirmación o de error. Por último el botón de captura le envía la señal al microcontrolador, para que realice mediciones de forma continua, hasta que el operador presione nuevamente captura, la medición se detiene.

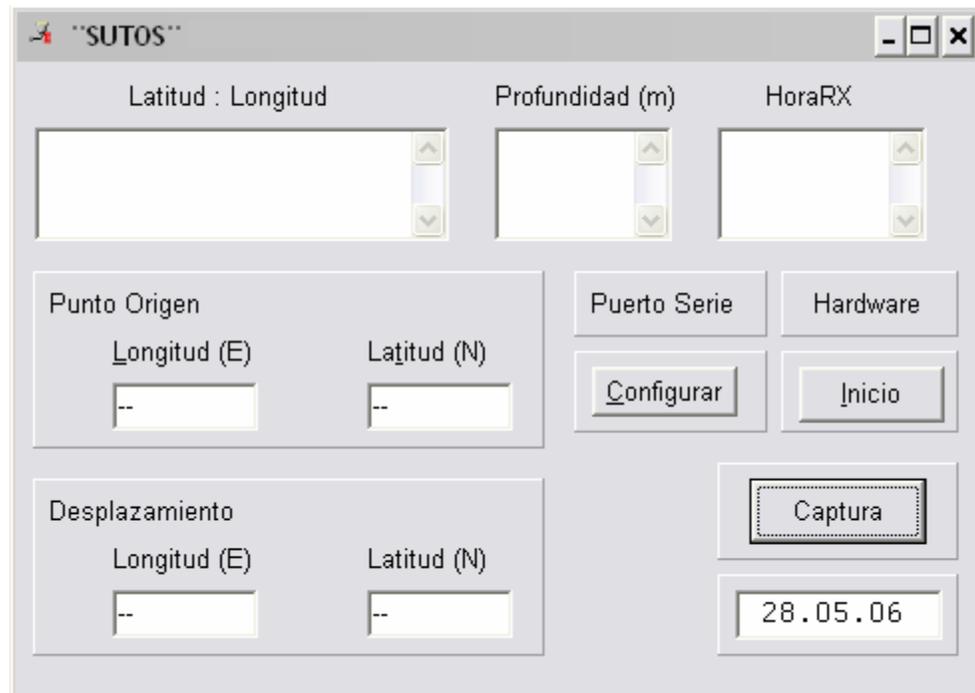
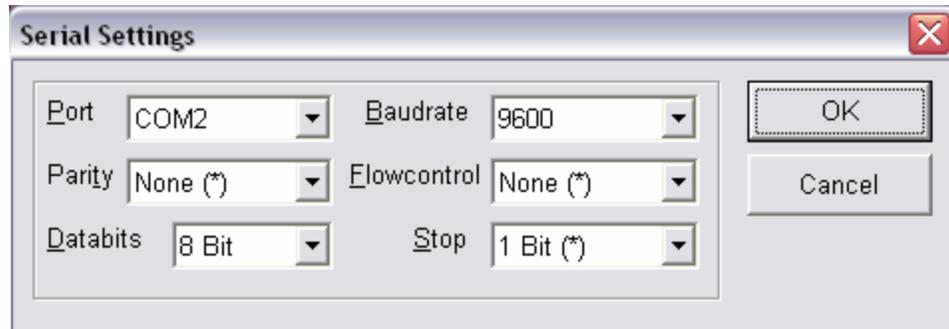


Figura 5. 12 Aplicación de control del SUTOS para el operador de la PC

En la Figura 5. 13 se observa la aplicación para la configuración del puerto serie que comunica a la PC con el *hardware* del SUTOS.



**Figura 5. 13** Configura puerto serien en la aplicación de control del SUTOS

El programa permite que los datos recibidos del microcontrolador se registren en un archivo de texto (.txt) para su posterior análisis por parte del operador. La Figura 5. 14 muestra a través del diagrama de flujo, la secuencia de operación del programa diseñado usando Delphi V5.0.

Las rutinas que ejecuta este programa se limitan a enviar señales de solicitud de funciones específicas, al microcontrolador, una vez presionado el botón correspondiente.



Figura 5. 14 Diagrama de flujo para el programa de la PC del operador

## Capítulo 6: Análisis de Resultados

### 6.1 Resultados

#### 6.1.1 Medición 1

Para la primera medición, Tabla 6. 1, se esperaba recibir una señal con una amplitud y/o patrón que representara un eco de la seña trasmitida en aproximadamente 2.336ms, este tiempo es el equivalente a un recorrido de ida y vuelta de la señal de ultrasonido emitida desde el transductor, para la profundidad de la piscina en ese punto, como se observa en la Figura 6. 1 y Figura 6. 2.

**Tabla 6. 1** Condiciones para la medición 1 del HE123TR

Temperatura del agua:	24.2 C°
Profundidad:	1.74m
Velocidad del Sonido aprox.:	1489.491 m/s
Tiempo aprox. de respuesta de ecos:	2.336ms
Extensión cable coaxial RG59/75ohm	2.1m

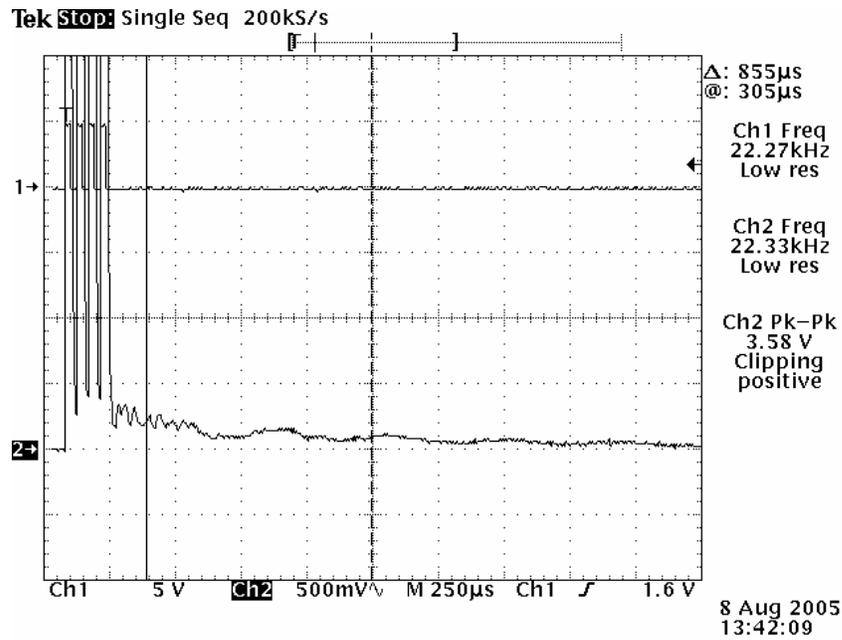


Figura 6. 1 Ch1: señal de control, 4 pulsos. Ch2: Tx y Rx del transductor.

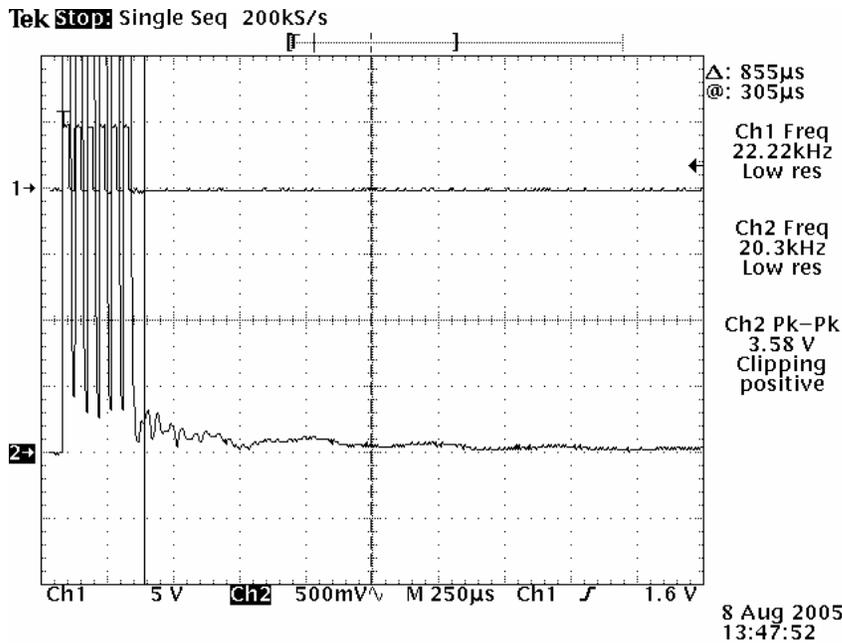


Figura 6. 2 Ch1: señal de control, 6 pulsos. Ch2: Tx y Rx del transductor.

### 6.1.2 Medición 2.

Se realizaron varias mediciones aumentando o disminuyendo el número de ciclos aplicados para la transmisión, esto sin ningún éxito en la recepción de los ecos. En la medición 2, Tabla 6. 2, el patrón de medición fue el mismo que el en la medición 1, la diferencia es la profundidad, que se disminuyó a 1.35m, lo que implica que los ecos se recibirían en 1.8ms, en la Figura 6. 3 y Figura 6. 4, se muestra como permanecen componentes de ruido en el transductor tras la aplicación de tres pulsos y no es posible interpretar si existen ecos, debido a que no se puede diferenciar entre las ondas de ruido del transductor y los posibles ecos recibidos.

**Tabla 6. 2** Condiciones para la medición 2 del HE123TR

Temperatura del agua:	24.2 C°
Profundidad:	1.35m
Velocidad del Sonido aprox.:	1489.491 m/s
Tiempo aprox. de respuesta de ecos:	1.8ms
Extensión cable coaxial RG59/75ohm	2.1m

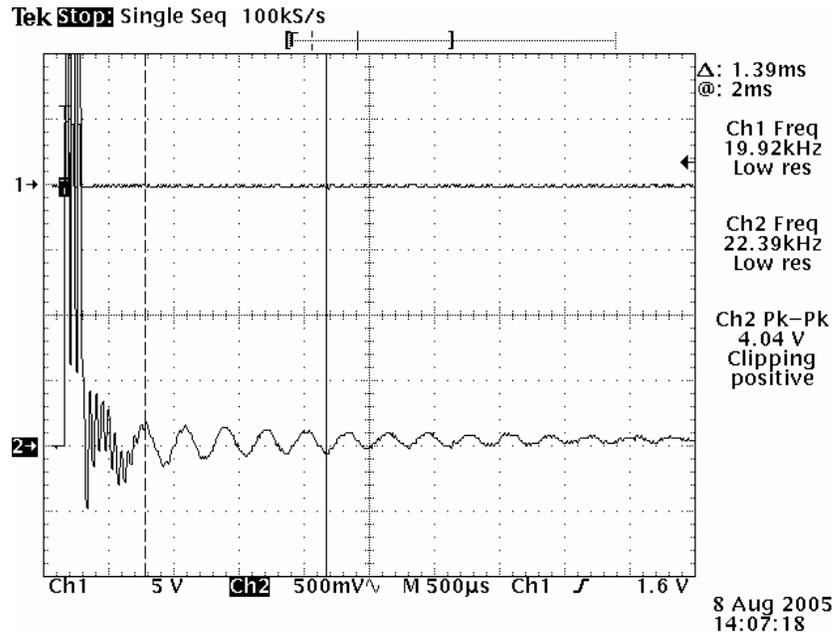


Figura 6. 3 Ch1: señal de control, 3 pulsos. Ch2: Tx y Rx del transductor.

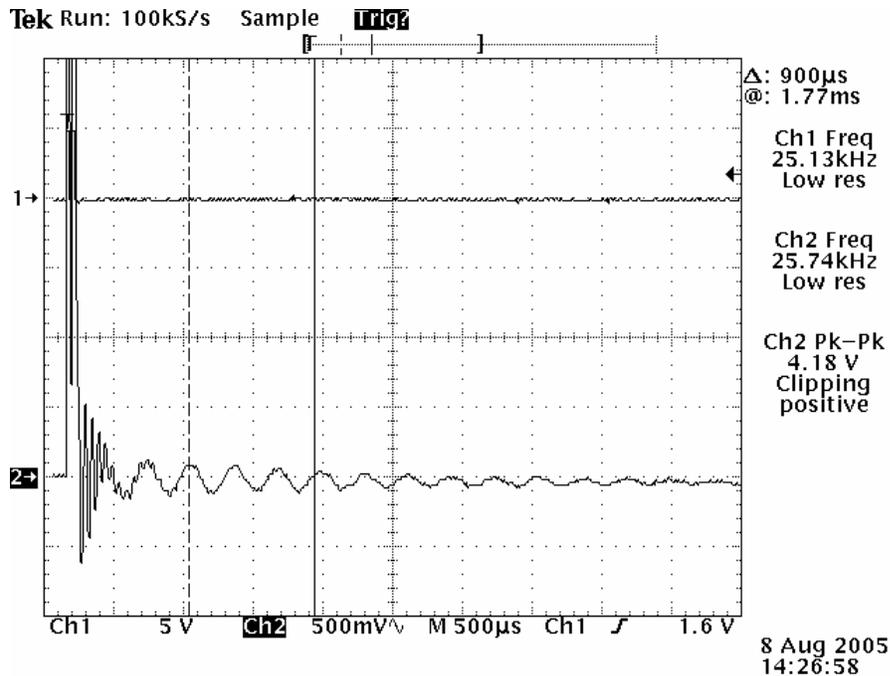


Figura 6. 4 Ch1: señal de control, 2 pulsos. Ch2: Tx y Rx del transductor.

## 6.2 Análisis

En el ámbito nacional no existen productos comercialmente disponibles relacionados con el muestreo de acumulación de sedimentos o medición de profundidad a través de señales de ultrasonido. Por ello la solución planteada resulta innovadora y atractiva para un posterior desarrollo de un sistema más complejo que pueda ser comercialmente rentable.

El aporte del estudiante en el proyecto es más de un 90% de diseño del sistema, debido a que se tuvo que investigar sobre los diferentes dispositivos que conforman el sistema, elaborar los circuitos, elaborar y desarrollar las pruebas de campo, reevaluación y rediseño de la solución.

La primera parte de este proyecto estuvo orientada a la realización de pruebas que permitiera determinar el grado de operación del transductor HE123TR de marca HEXAMITE que fue probado usando el circuito recomendado por el fabricante en caso de usar un microcontrolador de la marca Microchip.

El *hardware* de este circuito fue montado sobre una *protoboard*. Este circuito consiste en un oscilador a partir de dos transistores bipolares, uno PNP y otro NPN, operando de manera simultánea e inversa, uno respecto al otro. Esto permite obtener un generador de pulsos cuadrados con una amplitud entre cero voltios y la tensión de la fuente de alimentación. Esta es la señal de excitación de transmisión que se le aplica al transductor. La transmisión se controla mediante la aplicación de una señal cuadrada de 23.5kHz, proveniente del microcontrolador; cuando la señal es igual cero voltios el oscilador se detiene y el circuito entra en la etapa de recepción.

Ambas etapas, transmisión y recepción están aisladas entre sí por diodos de recuperación rápida, colocados en antiparalelo, para obtener un desacople real entre de la etapa de recepción, mientras se transmite y viceversa.

La etapa de recepción está compuesta por un amplificador diferencial con una ganancia para la tensión de entrada igual a 670 veces. La salida del amplificador está conectada a un canal de ADC del microcontrolador. En este circuito el microcontrolador realiza el control de la transmisión y la captura de los valores de los ecos recibidos en forma analógica para convertirlos a valores discretos (señales digitales).

La experiencia generada con las pruebas realizadas tanto en la parte de *software* como en la parte de *hardware*, sirvieron de base a la hora de seleccionar un nuevo transductor, que permitiera estimar la profundidad, utilizando un equipo portátil para su operación.

El nuevo transductor TC2111 de Reson Inc. permite la transmisión de ondas de ultrasonido y recepción de ecos hasta 50m de profundidad [17].

El alcance en la estimación de la profundidad está directamente en función de la potencia por lo que se hace necesario que el circuito permita entregar una potencia máxima de operación de 50W (según el fabricante) durante la transmisión al transductor.

Esto complicó el diseño portátil del circuito final, ya que se debe cumplir con potencia requerida en un equipo compacto. Desde la concepción del proyecto se definió que la alimentación del sistema completo sería de 12VCD, por lo que fue necesario implementar circuitos que conviertan de 12VCD, a 5VCD para los circuitos de control del sistema y de 12VCD a tensión pulsante para la transmisión del transductor. Los 5VCD son necesarios para el microcontrolador, el circuito del amplificador y otros dispositivos como el MAX233 para la comunicación vía puerto serie.

La etapa de desarrollo del circuito conmutador, se trabajó en función de lograr convertir 12VCD a una tensión pulsante de 50-100V<sub>RMS</sub>, para operar el transductor a una potencia desde 12.5W hasta 50W. El primer diseño de este circuito, contempló el uso del toroide 1, de ferrita de tipo J, con las dimensiones mostradas en la Tabla 5. 4, esta muestra las dimensiones de los toroides y la constante  $A_L$  respectiva. Estos toroides fueron probados con diferentes cantidades de vueltas arrolladas en el secundario, para la generación de tensión RMS, de la amplitud antes mencionada.

Todos los toroides utilizados en las pruebas para este circuito son del tipo J, y poseen un factor de pérdidas de  $15 \times 10^{-6} @ 0.1\text{MHz}$ .

Una vez arrollado el toroide a probar en el circuito conmutador, se colocaba en el circuito, mostrado en la Figura 5. 5, usando el modelo de circuito paralelo para el transductor, esto con el fin de no dañar el TC2111 durante las pruebas del circuito.

Para desarrollar las pruebas con los toroides se utilizó una tarjeta de circuito impreso que integra el circuito conmutador, una etapa de desacople de impedancias entre el transductor y el amplificador, el circuito amplificador y el circuito regulador de tensión que convierte de 12VCD a 5VCD para el amplificador y los demás dispositivos que operan a 5VCD. Este circuito impreso posee dos puentes selectores para escoger usar el modelo capacitor-resistencia en paralelo del TC2111, o bien la conexión a través de la terminal coaxial que se conecta con el TC2111.

La Tabla 6. 3, muestra un resumen de las mediciones realizadas a los diferentes toroides utilizados para el circuito excitador del TC2111, tal como se aprecia en ésta, las pruebas realizadas con el modelo capacitor-resistencia en paralelo fueron satisfactorias, es decir se alcanzó la tensión RMS deseada.

Una vez que se cambió del circuito del modelo del TC2111, al transductor real, los valores obtenidos de tensión RMS, cayeron en todos los toroides por debajo de los  $7V_{RMS}$ . Como es de esperar esta tensión alcanzada a la salida del circuito conmutador, no es suficiente para excitar el transductor para provocar que este realice la transmisión de ondas ultrasónicas. Este problema se presentó en todos los toroides utilizados, aún con diferentes cantidades de vueltas en los arrollados del primario y secundario.

**Tabla 6. 3** Resultados de las pruebas de los toroides

Toroide	Vueltas Primario	Vueltas Secundario	Modelo paralelo TC2111 $V_{RMS}$	Transductor TC2111 $V_{RMS}$
1	1	16	80	5.24
2	2	32	103.5	6.89
3	6	48	97.56	4.34

Dentro del circuito impreso mostrado en la Figura 5. 9, que contiene el circuito conmutador, se probaron los circuitos de desacople de impedancias, el amplificador y el regulador de tensión, todos estos funcionaron de manera correcta.

El problema que se presenta con los diferentes toroides usados en el circuito excitador del TC2111, no está ubicado en la parte del diseño del circuito mismo, sino en la concepción de la idea de un dispositivo portátil. Esto debido a que primero debería de haberse probado este circuito con toroides de dimensiones más grandes, con números de vueltas considerablemente mayores, menor consumo de corriente en el primario, mayor eficiencia en la tensión entregada por el secundario. Todo esto usando en núcleos toroidales con muy bajas pérdidas por frecuencias o bien núcleos laminares de con características similares, para determinar el dispositivo con mejor desempeño.

En resumen, para operar de manera adecuada el transductor TC2111, se debe de utilizar una fuente de tensión CD variable (no importa su tamaño), con una entrega de corriente máxima de entre 5 y 10 amperios, esto con el fin de determinar la tensión a la entrada del circuito conmutador, necesaria para hacer oscilar el TC2111. Esto permitiría dejar de lado por un momento, la demanda de potencia del transductor y centrarse en la recepción y manipulación de los ecos recibidos.

Una vez obtenido una respuesta satisfactoria en la función del transductor, buscar la forma de hacer lo mismo, teniendo la certeza de su funcionamiento, de una manera portátil y liviana para su transporte.

Con relación a los objetivos inicialmente planteados, se logró el desarrollo del circuito, ver Figura 5. 9, que permitiría emitir señales ultrasónicas, recibir y manipular los ecos recibidos. Si bien es cierto la etapa del conmutador no se logró poner en operación, las demás etapas de *hardware* y de *software* alcanzaron el nivel de desarrollo deseado.

Es decir el circuito del microcontrolador, que permite el control del circuito transmisor/receptor y la comunicación vía puerto serie con la PC del operador, funciona de manera correcta, probando su desempeño en el desarrollo de las pruebas para el HE123TR y el TC2111, debido a que permite una rápida programación en lenguaje C para Microchip, acceso a los pines de conexión para las terminales de Entrada/Salida, digital y analógicas y la posibilidad de comunicación “*Plug and Play*” vía puerto serie con la PC.

Todo este *hardware* y su operación, está asociado a las rutinas anteriormente mencionadas (en la descripción de la solución), para el microcontrolador y el programa de la PC. El programa desarrollado para la PC permite la comunicación bidireccional entre el microcontrolador y la PC.

Todas las rutinas de ejecución e interrupciones del microcontrolador, así como el programa del operador funcionan de manera correcta. El programa de la PC captura los valores que le envía el microcontrolador vía puerto serie, y los muestra en tiempo real al operador.

El difícil acceso al campo (embalse) para la realización las pruebas con el TC2111, fue un factor a tomar en cuenta, ya que de funcionar completamente todo el sistema, se necesita un ambiente controlado para la pruebas preliminares y la operación en el campo final. Esto trae consigo el dilema de la movilización de equipos muy caros y delicados, a ambientes cargados de humedad, lluvia y polvo entre otros. Permisos y demás requisitos de seguridad para permanecer en las instalaciones de un embalse de generación hidroeléctrica, con el agravante de tener que tener que buscar puntos donde se pueda ir aumentando la profundidad, a medida que se logra una medición optima en un punto determinado.

## Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

- 1 Se demostró que el transductor HE123TR, puesto a disposición para el proyecto, no funcionó. Este dispositivo entra en un régimen de replicas de baja amplitud producto de la señal de ultrasonido transmitida, que imposibilita la recepción de ecos.
- 2 El alcance en la transmisión de ultrasonido y recepción de ecos de cualquier transductor, incluido el TC2111, está en proporción directa, con la potencia eléctrica que éste demande para su operación.
- 3 La versatilidad de un sistema portátil de este tipo, se ve comprometida por el consumo de potencia eléctrica y la eficiencia en la entrega de ésta al transductor.
- 4 Los toroides utilizados en el circuito *conmutador*, cumplen con los requisitos para el sistema, tanto en frecuencia de operación como en consumo de potencia; la deficiencia del diseño se encuentra en el cálculo de los valores de vueltas para ambos bobinados, primario y secundario.
- 5 El uso del amplificador diferencial de bajo ruido AD605 permitió el desarrollo compacto del circuito impreso, por su tamaño de encapsulado y usar solo alimentación de 5VCD, monopolar.
- 6 El desarrollo y puesta en operación del circuito impreso para el microcontrolador PIC 16LF877, fue necesario en el proyecto, por la versatilidad que brinda, tanto a en *hardware*, como en *software*.
- 7 El programa de comunicación entre la PC del operador y el sistema SUTOS, es sencillo de configurar y utilizar, a la vez que captura y presenta los datos en tiempo real; incluyendo la longitud, latitud y profundidad del punto donde se realiza la medición.

## **Capítulo 7 Conclusiones y Recomendaciones**

---

- 8 El lugar para realizar las pruebas del sistema final en operación, debe contar con medidas de seguridad tanto para los equipos asociados a la prueba, como para el personal que realiza la prueba.
- 9 La profundidad mínima a la que se debería empezar las mediciones es de 10m en adelante, esto representa un 30% de la potencia del transductor TC2111.

## **7.2 Recomendaciones**

Cabe resaltar que el circuito conmutador diseñado se probó sólo con toroides de ferrita, con dimensiones muy pequeñas, para ajustarse al tamaño de la aplicación portátil. Se deben de realizar esas pruebas a este circuito, utilizando toroides más grandes con mayor eficiencia y entrega de potencia; o evaluar la posibilidad de usar transformadores con núcleos laminares con una respuesta en frecuencia para los 200kHz de frecuencia de resonancia del TC2111.

La experiencia dicta que este tipo de pruebas se vuelven complicadas, a medida que se desea mejorar la precisión en la recepción de los ecos y en el alcance de profundidad del sistema; ya que los equipos de pruebas incluyen, osciloscopio, fuente de tensión, computadora portátil, cables de conexión. El lugar de pruebas debe de estar diseñado o adaptado para este fin, contar con electricidad 110VCA para las fuentes, techo o cobertores impermeables para los equipos, chalecos de protección ante una caída al agua del personal que realiza la prueba. Esta ubicación debe permitir que fácilmente se puedan alcanzar diferentes rangos de profundidad o localización de sedimentos.

El desarrollo del sistema portátil debe darse hasta una vez obtenido un sistema funcional y de conformidad con las necesidades planteadas para la estimación de profundidad. Una vez alcanzada la operación y puesta en marcha del sistema, se puede pensar en integrar todo el sistema en un dispositivo portátil, ligero y resistente al agua, para la aplicación final.

## Bibliografía

1. Amidon Associates Inc. Toroidal Cores [en línea]. Costa Meza, CA 92626 USA. < <http://www.amidoncorp.com/>> [Consulta 2 dic 2005].
2. Autoridad de los Servicios Públicos de Costa Rica. Energía-Electricidad- Proveedores de servicios eléctricos [en línea]. <<http://www.aresp.go.cr/sevicios>> [Consulta 08 Feb 2006]
3. Bolaños García, A. Diseño de un sonar para el monitoreo de la formación de sedimentos en embalses. Proyecto de graduación. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2003
4. Castro, Pamela. Ecosonda [en línea]. <<http://webs.sinectis.com.ar/mcagliani/index.htm>>. [Consulta 06 Set 2005]
5. Coughlin, Robert; y Driscoll, Frederick. Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. 5 ed. México: PRENTICE HALL, 1999
6. Espinoza Jiménez, F. Sistema de navegación guiado por GPS para submarino prototipo (SNSP). Proyecto de graduación. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica, Agosto 2003
7. HEXAMITE, Narrow Beam Underwater Ultrasonic Sensors (Transceiver) and Ultrasonic Signal Conditioner [en línea]. <<http://www.hexamite.com/hx1200tr.htm>>.[Consulta 06 Set 2005]
8. Instituto Costarricense de Electricidad. Por una mejor calidad de vida [pdf]. Dirección de Mercadeo Corporativo y Relaciones Públicas. <[www.grupoice.com](http://www.grupoice.com)>. [Consulta 25 Oct 2005].
9. Karki James. Signal Conditioning Piezoelectric Sensors. Application Report SLoA033A. Texas Instruments, September 2000. (Mixed Signal Products)

10. Kongsberg Simrad As. Seafloor sediment classification software [pdf]. <<http://www.km.kongsberg.com/>>. [Consulta 24 Oct 2005]
11. Kuntsal, E. y Bunker, W. Guidelines for Specifying for Underwater Electroacoustics Transducers. International Transducer Corporation, Santa Barbara, CA: June 1992.
12. Luan Jessica; Development of a Small Sonar Altimeter and Constant Altitude Controller for a Miniature Autonomous Underwater Vehicle. Tesis. Virginia: Polytechnic Institute, Feb. 2005
13. Método de medida de la tensión superficial mediante el uso de la burbuja [en línea]. <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/tension/burbuja/burbuja.htm>> [Consulta 24 Oct 2005]
14. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (España). Ecosonda Multihaz B/O Vizconde De Eza [en línea]. <[http://www.mapa.es/es/pesca/pags/vizconde\\_web/ecosonda.htm](http://www.mapa.es/es/pesca/pags/vizconde_web/ecosonda.htm)>. [Consulta 24 Oct 2005]
15. Morgan ElectroCeramics. Piezoelectricity-Definition and History [en línea]. <<http://www.morganelectroceramics.com/capguide1.html>> [Consulta 06 Set 2005]
16. Propagación del sonido en el agua de mar [en línea]. <[http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/htm/sec\\_8.html](http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/htm/sec_8.html)> [Consulta 24 Oct 2005]
17. Reson Inc. Compact Echosounder Transducer TC2111 [pdf]. <<http://www.reson.com/transducer-tc2111.html>>. [Consulta 06 Set 2005]
18. Salazar Porras, A. Sistema de control de trayectoria guiado por GPS para un módulo estimador de profundidad de embalses para el I.C.E. Proyecto de graduación. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica, Diciembre 2002

## **Apéndices**

### **A.1 Glosario y abreviaturas**

CAS (Circuito acondicionador de señal): una aplicación éste es la de modificar las señales analógicas para permitir un acople eléctrico con componentes digitales.

Circuito impreso: Placa delgada en la cual son colocados los circuitos integrados o componentes, conectados entre sí a través de pistas de cobre.

Eco: Onda sónica reflejada o devuelta, al chocar con un cuerpo, de modo tal que se percibe como distinta de la originalmente emitida.

Frecuencia: En un movimiento periódico, número de vibraciones por unidad de tiempo.

GPS: Sistema de posicionamiento global.

Potencia eléctrica: es una medida de la cantidad de energía por unidad de tiempo (segundos) que se requiere para una determinada aplicación. Se mide en Watts (W).

Puerto serie: Interfaz que puede ser usada para comunicación serie.

Transductor: Dispositivo que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, la dilatación, el sonido, etc., en otro tipo de señal, normalmente eléctrica.

Ultrasonido: Sonido cuya frecuencia de vibraciones es superior al límite perceptible por el oído humano.

Ecosonda: Aparato para medir la profundidad a que está sumergido un objeto utilizando la reflexión de un haz de ultrasonidos.

Embalaje: Caja o cubierta con que se resguardan los objetos que han de transportarse.

Sensor: Dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmite adecuadamente.

## A.2 Hoja de información del proyecto

### Información del estudiante:

**Nombre:** Javier Torres Guzmán

**Cédula:** 6-0313-0195                      **Carné ITCR:** 9925373

**Dirección de su residencia en época lectiva:** De la Capilla de Monseñor Sanabria, 200m sur, casa de alto en ladrillo, Sn Rafael de Oreamuno, Cartago.

**Dirección de su residencia en época no lectiva:** Urbanización El Llano, casa # 8-A, Cariari, Pococí, Limón

**Teléfono en época lectiva:** 817-5116    **Teléfono época no lectiva:** 767-8056

**Email:** [javiert\\_ie@yahoo.es](mailto:javiert_ie@yahoo.es)                      **Fax:** No disponible

### Información del proyecto:

**Nombre del Proyecto:** Sistema para el monitoreo de sedimentación en embalses

**Area del Proyecto:** Procesamiento digital de señales de ultrasonido

### Información de la empresa:

**Nombre:** Escuela de Ingeniería Electrónica

**Zona:** Cartago, Cantón Central, barrio Los Ángeles

**Dirección:** Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago

**Teléfono:** 550-2257              **Fax:** 591-6629              **Apartado:** 159-7050

**Actividad Principal:** Escuela de Ingeniería Electrónica

### Información del encargado en la empresa:

**Nombre:** Ing. Luis P. Méndez Badilla

**Puesto que ocupa:** Director

**Departamento:** Escuela de Ingeniería Electrónica

**Profesión:** Ingeniero en Electrónica    **Grado académico:** Ingeniero Diplomado

**Teléfono:** 550-2257                      **Ext.:** 2114

**Email:** [lmendez@ietec.org](mailto:lmendez@ietec.org)

### **A.3 Antecedentes prácticos**

#### **A.3.1 Sistema de control de trayectoria guiado por GPS para un módulo estimador de profundidad de embalses para el I.C.E.**

Periodo: II Semestre 2002

Realizado por: Ariel David Salazar Porras.

Asesores: Ing. Luis Moya Vargas (ICE)

Ing. Pedro Murillo Fuentes (ITCR)

#### **Objetivo General**

Implementar un prototipo terrestre de un control de trayectoria experimental guiado por GPS para un sistema ultrasónico medidor de profundidad de causes y embalses, hasta el nivel en que el dispositivo pueda seguir una trayectoria almacenada en su memoria.

#### **Objetivos específicos**

1. Realizar un reporte acerca de las características y utilidades a considerar en las tarjetas integradas (GPS Kit #DK-ER101, y la Adapt812DXLT).
2. Investigar sobre sistemas de GPS satelital, local y DGPS.
3. Estudiar la exactitud del kit de GPS en la medición de coordenadas geográficas.
4. Realizar pruebas de campo del funcionamiento del sistema prototipo.

#### **Alcances**

1. El sistema posee una precisión de 1.3 metros.
2. No depende de la latitud o longitud de la medición.
3. El prototipo funciona correctamente a velocidades menores a 27 km/h.

### **A.3.2 Sistema de navegación guiado por GPS para submarino prototipo (SNSP)**

Periodo: II Semestre 2003

Realizado por: Fabio Espinoza Jiménez.

Asesores: Ing. Luis Moya Vargas (ICE)

Ing. Luis Paulino Méndez (ITCR)

#### **Objetivo general**

Diseñar e implementar un algoritmo de navegación, por medio de una señal GPS y el uso de un microcontrolador, para guiar un prototipo móvil a través de una ruta previamente establecida.

#### **Objetivos Específicos**

1. Diseño e implementación de un algoritmo de navegación para guiar un prototipo móvil a través de una ruta.
2. Diseño e implementación del *hardware* de control para los motores del prototipo móvil.
3. Diseño del programa de interfaz entre el usuario y el sistema, para el ingreso de la ruta por seguir.
4. Ensamblaje los kits y el módulo de control para realizar pruebas de funcionamiento.
5. Realizar un recorrido inicial con el GPS y una computadora portátil para determinar una ruta, la cual será utilizada para realizar la prueba del sistema de navegación.

#### **Alcances**

1. Desarrollo e implementación de un algoritmo capaz de guiar un sistema móvil a través de una ruta de hasta 10 puntos.
2. El prototipo o sistema general desarrollado es capaz de guiar al sistema móvil a través de la ruta proporcionada.
3. Diseño de un software funcional para el ingreso de la ruta por parte del usuario del sistema.

### **A.3.3 Diseño de un sonar para el monitoreo de la formación de sedimentos en embalses**

Periodo: II Semestre 2003

Realizado por: Alexander Gdo. Bolaños García

Asesores: Ing. Luis Moya Vargas (ICE)

Ing. Luis Paulino Méndez (ITCR)

#### **Objetivo General**

Diseñar un sistema electrónico capaz de detectar la formación de sedimentos en los embalses de la represa hidroeléctrica.

#### **Objetivos específicos**

1. Buscar y escoger el transductor apropiado que se ajuste al método de medición seleccionado.
2. Diseñar el circuito que se ajuste a las necesidades de funcionamiento del transductor seleccionado.
3. Determinar el buen funcionamiento del transductor seleccionado.
4. Aplicar un banco de pruebas para establecer el correcto funcionamiento de la interfaz microcontrolador-computador.

#### **Alcances**

1. Se determinó que el método de medición que más se ajusta a las necesidades del proyecto es el de medición ultrasónica, siempre y cuando algún transductor de la casa "Hexamite" funcione adecuadamente, o se consiga otro transductor con características similares.
2. Se determinó y demostró que el HE123tr no se ajustó a las características de funcionamiento dadas por el fabricante.
3. Se recomienda reemplazar el HE123tr, por sus dos transductores equivalentes el HE123rx y el HE123tx, en cuyo caso habría que separar las etapas de transmisión y recepción.

Anexos

B.1 Hoja de datos de transductor HX123TR

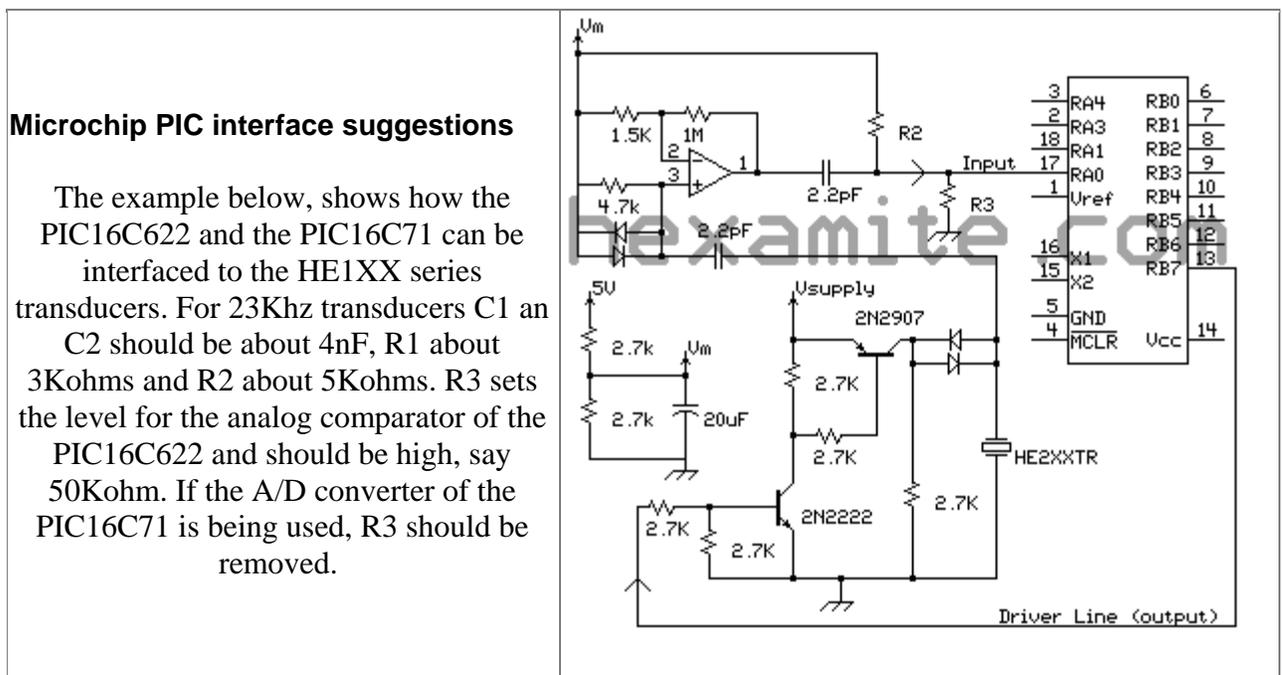
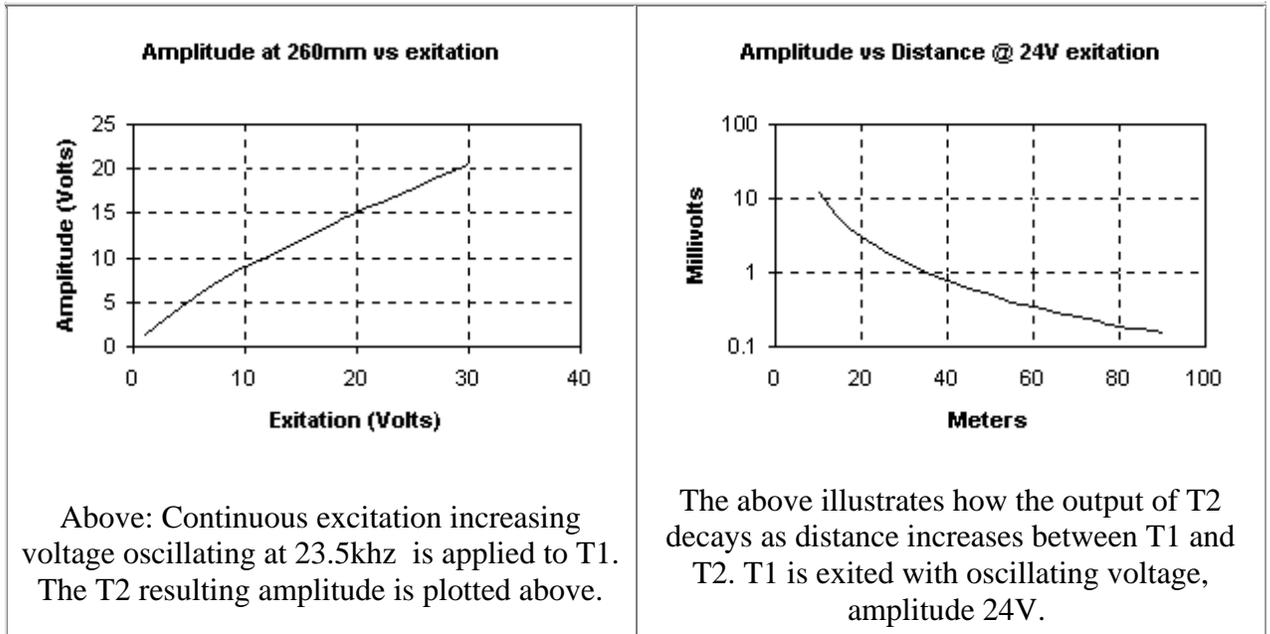
<i>Hexamite</i>	HE123TR Underwater Ultrasonic Transceiver	
-----------------	---	--

The **HE123TR** is designed for underwater applications. It transmits 155db signal Wide Beam  $\pm 35$  degrees at 23.5 KHz. It will receive with high sensitivity level of -30db/V/microbar. Ranges from 0 to 50m transceiver to transceiver operation, and echoes from 0.1m to 25m are achieved with conventional low cost circuitry. It must be noted when applying this transducer for echo analysis, that the crystal settling rate is a limiting factor as to how close an object can be. Single conductor shielded cable extends from the back of this sensor, for connection to a signal conditioner.

The HE123 series sensor is protected by a heavy duty chromed brass housing, with 1/8" or 3mm thick walls. The American standard NPT configuration and 3/4" pipe size, readily available mounting accessories make this sensor easy to apply and install.



In the following, two HE123TR transceivers are placed facing each other at a fixed distance. One transceiver referred to as T1 is excited with various voltage levels, and the opposite transceiver referred to as T2 is used to receive the signal. The graphs below plot the output from T2.



Cable length between the HE123 series transducers and a signal conditioner, is left to the user's discretion. At 30m lengths the added environmental noise and signal reduction at 23khz is insignificant.

**Electrical Specifications HE210TR**

<b>Parameters</b>	<b>Values</b>	<b>Units</b>
Operating Frequency	23.5	kHz
Input Voltage	20 (max)	Volts (p-p)
Output (SPL) @20V	155	db
Receive (Sensitivity)	-30	db/V/Ubar
Impedance	300	ohm
Beam Angle	±35	degrees
Bandwidth	1	kHz
Settling Time	8	mS
Temperature	-40 to 100	°C

**Housing HE2XX Series**

<b>Housing</b>	<b>Description</b>	<b>Units</b>
Material Type	Brass	
Protection	NEMA 12 (IP68)	
Diameter	1.05	In
Diameter	27	mm
Length	1.6	In
Length	41	mm
Leads Length (attached)	0.2	meters
Panel Nut Threads	3/4" - 20	NPT

## B.2 Hoja de datos del transductor TC2111



- Small compact design
- Good piezo ceramics

### TC2111

Compact echo sounder transducer

#### TECHNICAL SPECIFICATIONS

Resonant Frequency:	200KHz $\pm$ 3KHz
Transmitting sensitivity:	163dB $\pm$ 3dB (re 1 $\mu$ Pa/V at 1m)
Receiving Sensitivity:	-190dB $\pm$ 3dB (re 1V/ $\mu$ Pa)
Impedance:	200ohm $\pm$ 60ohm at 200kHz
Beam width:	18° $\pm$ 3°
Beam shape:	Conical
Max input power:	50W (at 1% duty cycle)
Operating depth:	30m
Survival depth:	50m
Operating temperature range:	+2°C to +35°C
Storage temperature range:	-30°C to +50°C
Cable (length and type):	10m Coax 2*1 (O.D. 5mm) - pigtail
Weight in air, with cable:	0.4kg
Housing:	PVC with union nut

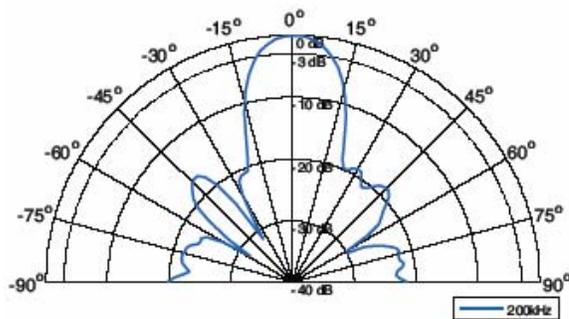




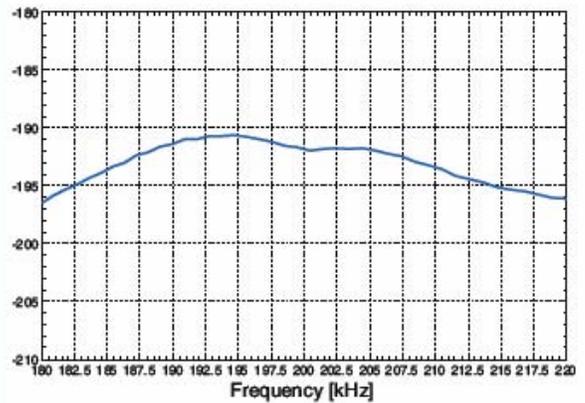
# Transducer TC2111

Compact Echosounder Transducer

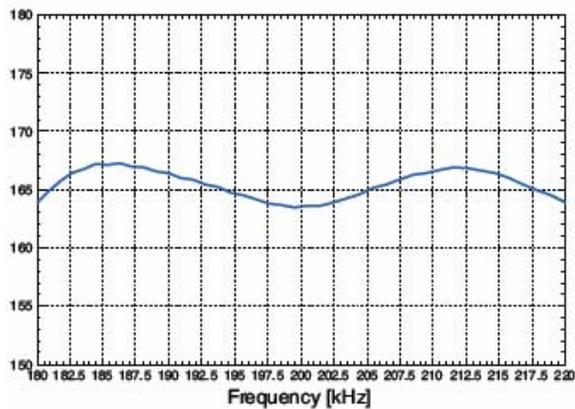
Horizontal Directivity Pattern



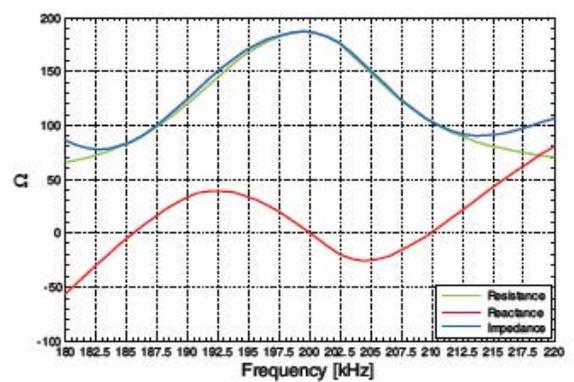
Receiving Sensitivity [dB re 1V/μPa @ 1m]



Transmitting Sensitivity [dB re 1μPa/V @ 1m]



Impedance

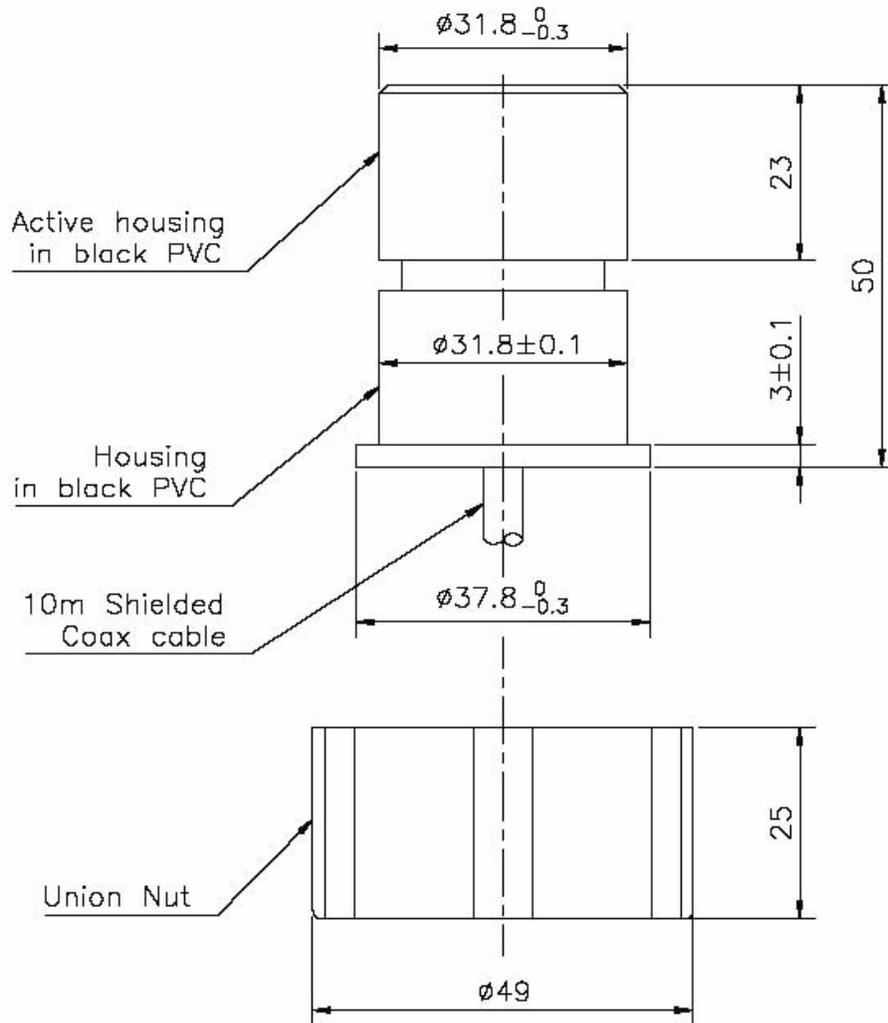




# Transducer TC2111

Compact Echosounder Transducer

Outline Dimensions



RESON reserves the right to change specifications without notice. © 2008 RESON A/S  
For Acoustical Measurement Accuracy please refer to [www.reson.com](http://www.reson.com) or contact sales.



**RESON A/S**  
Denmark  
Tel: +45 4738 0022  
E-mail: [reson@reson.dk](mailto:reson@reson.dk)

**RESON Inc.**  
USA  
Tel: +1 805 964-6260  
E-mail: [sales@reson.com](mailto:sales@reson.com)

**RESON OFFSHORE LTD.**  
Scotland, U.K.  
Tel: +44 1224 709 900  
E-mail: [sales@reson.co.uk](mailto:sales@reson.co.uk)

**RESON GmbH**  
Germany  
Tel: +49 431 720 7180  
E-mail: [reson@reson-gmbh.de](mailto:reson@reson-gmbh.de)

**RESON B.V.**  
The Netherlands  
Tel: +31 (0)10 245 1500  
E-mail: [info@reson.nl](mailto:info@reson.nl)

**RESON Mediterranean SRL**  
Italy  
Tel: +39-051-572-643  
E-mail: [info@reson.it](mailto:info@reson.it)

**RESON-Telenav Electronics Pte. Ltd.**  
Singapore  
Tel: +65-6-872-0836  
E-mail: [sales@reson.sg](mailto:sales@reson.sg)

**RESON SA (PTY) LTD.**  
South Africa  
Tel: +27 21 701-1720  
E-mail: [reson@reson.co.za](mailto:reson@reson.co.za)

[www.reson.com](http://www.reson.com)

Version: B095 051226 / US

B.3 Hoja de datos Amplificador diferencial AD505



Dual, Low Noise, Single-Supply  
Variable Gain Amplifier

**AD605**

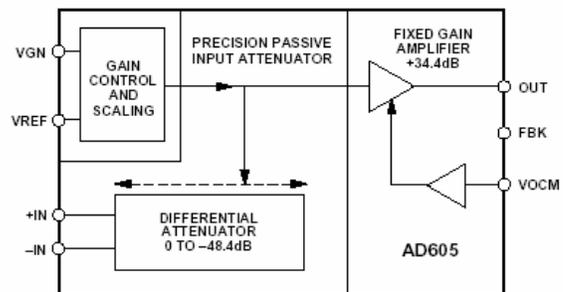
**FEATURES**

- Two Independent Linear-in-dB Channels
- Input Noise at Maximum Gain: 1.8 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , 2.7 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- Bandwidth: 40 MHz (-3 dB)
- Differential Input
- Absolute Gain Range Programmable:
  - 14 dB to +34 dB (FBK Shorted to OUT), through
  - 0 dB to +48 dB (FBK Open)
- Variable Gain Scaling: 20 dB/V through 40 dB/V
- Stable Gain with Temperature and Supply Variations
- Single-Ended Unipolar Gain Control
- Output Common-Mode Independently Set
- Power Shutdown at Lower End of Gain Control
- Single +5 V Supply
- Low Power: 90 mW/Channel
- Drives A/D Converters Directly

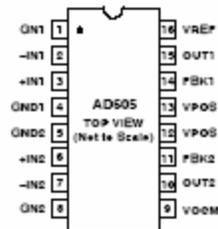
**APPLICATIONS**

- Ultrasound and Sonar Time-Gain Control
- High Performance AGC Systems
- Signal Measurement

**FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM**



**PIN CONFIGURATION**



**PIN DESCRIPTIONS**  
16-Pin Package for Dual Channel AD605

Pin No.	Mnemonic	Description
1	VGN1	CH1 Gain-Control Input and Power-Down Pin. If grounded, device is off, otherwise positive voltage increases gain.
2	-IN1	CH1 Negative Input.
3	+IN1	CH1 Positive Input.
4	GND1	Ground.
5	GND2	Ground.
6	+IN2	CH2 Positive Input.
7	-IN2	CH2 Negative Input.
8	VGN2	CH2 Gain-Control Input and Power-Down Pin. If grounded, device is off, otherwise positive voltage increases gain.
9	VOCM	Input to this pin defines common-mode voltage for OUT1 and OUT2.
10	OUT2	CH2 Output.
11	FBK2	Feedback Pin that Selects Gain Range of CH2.
12	VPOS	Positive Supply.
13	VPOS	Positive Supply.
14	FBK1	Feedback Pin that Selects Gain Range of CH1.
15	OUT1	CH1 Output.
16	VREF	Input to this pin sets gain-scaling for both channels: 2.5 V = 20 dB/V, 1.67 V = 30 dB/V.

**AD605—Typical Performance Characteristics (per Channel)**

( $V_{REF} = 2.5\text{ V}$  (20 dB/V Scaling),  $f = 1\text{ MHz}$ ,  $R_L = 500\ \Omega$ ,  $C_L = 5\text{ pF}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{SS} = +5\text{ V}$ )

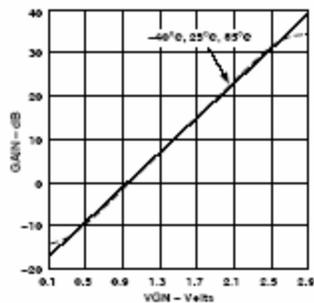


Figure 1. Gain vs. VGN

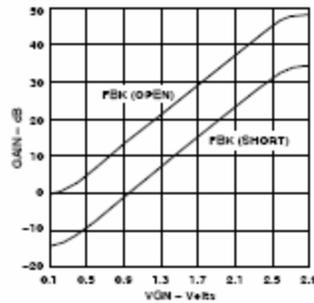


Figure 2. Gain vs. VGN for Different Gain Ranges

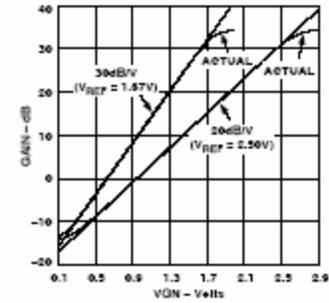


Figure 3. Gain vs. VGN for Different Gain Scalings

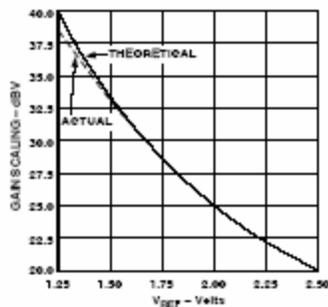


Figure 4. Gain Scaling vs.  $V_{REF}$

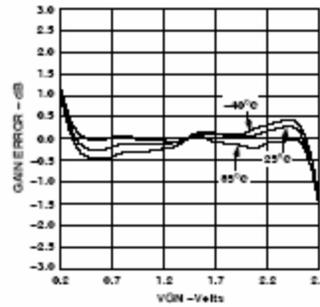


Figure 5. Gain Error vs. VGN at Different Temperatures

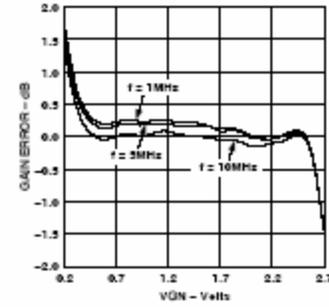


Figure 6. Gain Error vs. VGN at Different Frequencies

B.4 Hoja de datos MOSFET IRFZ20

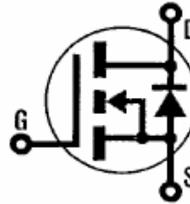
INTERNATIONAL RECTIFIER 

T-39-11

**HEXFET® TRANSISTORS IRFZ20**

**IRFZ22**

**N-Channel  
50 Volt  
Power MOSFETs**



**50 Volt, 0.1 Ohm HEXFET  
TO-220AB Plastic Package**

The HEXFET technology has expanded its product base to serve the low voltage, very low  $R_{DS(on)}$  MOSFET transistor requirements. International Rectifier's highly efficient geometry and unique processing of the HEXFET have been combined to create the lowest on resistance per device performance. In addition to this feature all HEXFETs have documented reliability and parts per million quality!

The HEXFET transistors also offer all of the well established advantages of MOSFETs such as voltage control, very fast switching, ease of paralleling, and temperature stability of the electrical parameters.

They are well suited for applications such as switching power supplies, motor controls, inverters, choppers, audio amplifiers, high energy pulse circuits, and in systems that are operated from low voltage batteries, such as automotive, portable equipment, etc.

**Product Summary**

Part Number	$V_{DS}$	$R_{DS(on)}$	$I_D$
IRFZ20	50V	0.10 $\Omega$	15A
IRFZ22	50V	0.12 $\Omega$	14A

**Features:**

- Extremely Low  $R_{DS(on)}$
- Compact Plastic Package
- Fast Switching
- Low Drive Current
- Ease of Paralleling
- Excellent Temperature Stability
- Parts Per Million Quality

