



CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

**DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA
MEDICIÓN DE ESPEORES POR ULTRASONIDO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA
EN LA ESPECIALIDAD DE MECATRÓNICA**

PRESENTA

ING. LUCIANO NAVA BALANZAR



SANTIAGO DE QUERÉTARO, AGOSTO 27, 2010.

Agradecimientos

A Dios por darme la vida y porque él es quien guía mis pasos.

A mi familia por todo el apoyo y confianza que me han brindado; especialmente a mis padres, que me inculcaron valores y me enseñaron que todo lo que uno se propone en la vida se puede lograr, por los consejos que me dieron y por haber estado ahí cuando más los necesité gracias de todo corazón. Este logro también es de ustedes.

A CIDESI, por contribuir en mi formación profesional y por darme la oportunidad de superarme, conjuntamente a todos los compañeros de Investigación y Posgrado.

Al Dr. Carlos Pedraza Ortega, Dr. Manuel Bandala Sánchez, Dr. Tomás Salgado Jiménez, Dr. Luis Govinda García Valdovinos y Dr. Juan Manuel Ramos Arreguín, por haber aceptado revisar mi tesis y ser sinodales en mi examen de grado.

A mi asesor, Dr. Jesús Carlos Pedraza Ortega por darme la confianza nuevamente de trabajar en conjunto, por fortalecer mis experiencias académica y vivenciales; pero especialmente por darme su amistad y por supuesto al MC Jorge Alberto Soto Cajiga por ser mi tutor y amigo.

A mis amigos que han sido parte importante en esta etapa de mi vida y en muchas más. Gracias por su amistad.

Finalmente, pero no menos importante, Claudia Castro quien ha estado junto a mí, en buenas y malas rachas, por brindarme su tiempo y mostrar siempre un lado afable hacia mí.

Índice

AGRADECIMIENTOS	I
ÍNDICE.....	II
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 ANTECEDENTES.....	9
1.2 DEFINICIÓN DEL PROYECTO.....	11
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	11
1.4 OBJETIVOS	12
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	13
1.6 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	14
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	16
2.1 ULTRASONIDO.....	16
2.2 GENERACIÓN DE ULTRASONIDO.....	16
2.3 TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDO.....	17
2.4 TIPOS DE TRANSDUCTORES.....	19
2.5 SISTEMAS BÁSICOS DE TRANSMISIÓN ULTRASÓNICA.....	20
2.5.1 <i>Método por Pulso-Eco</i>	20
2.5.2 <i>Método por Onda continua</i>	21
2.5.3 <i>Método por resonancia</i>	21
2.6 ENSAYO DE ULTRASONIDO	22
2.7 BLOQUES DE CALIBRACIÓN.....	22
2.8 ARQUITECTURA DE UN EQUIPO DE ULTRASONIDO.....	24
2.9 GENERACIÓN DEL PULSO DE ALTO VOLTAJE NEGATIVO.....	27
2.9.1 <i>Transistores</i>	27
2.9.2 <i>Fuentes de voltaje</i>	29
2.10 CIRCUITO RECEPTOR DE ULTRASONIDO.....	30
2.10.1 <i>TR/Switch</i>	30
2.10.2 <i>Circuito Amplificador de Control Variable</i>	30
2.10.3 <i>Amplificadores Operacionales</i>	32

2.10.4	<i>Convertidor Analógico a Digital</i>	33
2.10.5	<i>Multiplexor</i>	34
2.11	PROCESADORES	35
2.11.1	<i>Microcontrolador</i>	36
2.11.2	<i>FPGA</i>	36
2.12	DISEÑOS DE PCB´s	38
CAPÍTULO III. DESARROLLO DE PROTOTIPO		40
3.1	REQUERIMIENTOS DE DESARROLLO	40
3.2	CIRCUITO PULSADOR	41
3.3	CIRCUITO RECEPTOR.....	47
3.4	CIRCUITO DIGITALIZADOR.....	52
3.5	VISUALIZACIÓN DE DATOS.	55
3.6	DISEÑO DE PCB.....	56
3.7	MULTIPLEXIÓN DE OCHO CANALES	58
3.8	CONTENIDO BÁSICO DE UN EQUIPO DE ULTRASONIDO.....	61
CAPÍTULO IV. PRUEBAS Y RESULTADOS		62
4.1	PRUEBAS CON PROTOTIPO DESARROLLADO.....	62
4.2	PRUEBAS CON EQUIPO COMERCIAL USB-UT350.....	67
4.3	COMPARACIÓN ENTRE LOS DOS SISTEMA	71
4.4	PRUEBAS EN INMERSIÓN.....	75
4.5	RESULTADOS DEL PROTOTIPO DESARROLLADO	77
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....		82
5.1	CONCLUSIONES	82
5.2	TRABAJO FUTURO.....	83
BIBLIOGRAFÍA.....		84
ANEXOS.....		86
	ANEXO 1: NORMA DE PEMEX NRF-060-PEMEX-2006.....	87
	ANEXO 2: PUBLICACIÓN EN CONIELECOMP 2010.....	95

ANEXO 3: PUBLICACIÓN EN CONGRESO DE INGENIERÍA UAQ 2010.....	101
ANEXO 4: PROYECTO EN ALTIUM DESIGNER SUMMER 2009.....	111

Lista de tablas

Tabla 1. Comparación de transistores.....	28
Tabla 2. Tipos de VCA.	31
Tabla 3. Convertidores analógico digital.	33
Tabla 4. Microcontroladores comerciales.....	36
Tabla 5. FPGA's comerciales.	37
Tabla 6. Características que se deben de cumplir de acuerdo a normatividad.	40
Tabla 7. Tiempo de vuelo del prototipo desarrollado.	66
Tabla 8. Tiempo de vuelo del equipo comercial.....	70
Tabla 9. Valores estadísticos del prototipo.....	72
Tabla 10. Datos estadísticos del sistema comercial.....	72
Tabla 11. Calculo de espesores para el prototipo desarrollado.	79
Tabla 12. Precisión y exactitud del prototipo.....	80

Lista de figuras

Figura 1. Diablo Instrumentado.....	9
Figura 2. Esquema del Prototipo.....	12
Figura 3. Transductor de Ultrasonido.....	18
Figura 4. Señal Real de Ultrasonido.	19
Figura 5. Estructura de un equipo básico de ultrasonido [10].	25
Figura 6. Estructura de un equipo médico de ultrasonido [11].	26
Figura 7. Clasificación de transistores.....	28
Figura 8. Estructura de un VCA.	31
Figura 9. Esquema de un amplificador operacional básico.....	32
Figura 10. Estructura interna de un multiplexor.....	34
Figura 11. Diagrama bloques del circuito pulsador.	42
Figura 12. Señales de alta frecuencia.....	43
Figura 13. Esquema de circuito pulsador.....	43
Figura 14. Esquemático de alto voltaje	44
Figura 15. Diseño esquemático del circuito pulsador.....	45
Figura 16. Tarjeta de circuito pulsador	45
Figura 17. Pulso negativo.....	46
Figura 18. Respuesta del transductor	47
Figura 19. Diagrama a bloques del circuito receptor.....	48
Figura 20. TR/ Switch.....	49

Figura 21. Esquemático de circuito receptor.....	50
Figura 22. Diseño PCB del circuito receptor.	51
Figura 23. Señal filtrada.	51
Figura 24. Diagrama a bloques del circuito digitalizador.....	52
Figura 25. Esquemático del ADC.	53
Figura 26. Esquemático del FPGA parte 1.....	54
Figura 27. Esquemático del FPGA parte 2.....	55
Figura 28. Esquemático del Microcontrolador.....	56
Figura 29. Prototipo preliminar.....	57
Figura 30. Top Layer.....	58
Figura 31. Bottom Layer.....	58
Figura 32. Diagrama a bloques del multiplexor.....	58
Figura 33. Señales de control para el multiplexor.	59
Figura 34. Diseño esquemático del circuito multiplexor.	60
Figura 35. Diseño PCB del Multiplexor.....	60
Figura 36. Arquitectura básica propuesta.....	61
Figura 37. Prototipo final.....	62
Figura 38. Patrón escalonado de acero 1020	63
Figura 39. Interfaz en LabView.	63
Figura 40. Interfaz para tres transductores.	64
Figura 41. Señales del prototipo.	65

Figura 42. Equipo comercial USB-UT350.	68
Figura 43. Software de adquisición del equipo USB-UT350.	69
Figura 44. Señal de equipo comercial.	69
Figura 45. Prueba por contacto en 6.35mm.	73
Figura 46. Prueba por contacto en 12.7mm.	73
Figura 47. Prueba por contacto en 19.05mm.	74
Figura 48. Prueba por contacto en 25.4mm.	74
Figura 49. Prueba por Inmersión en 6.35mm.	75
Figura 50. Prueba por Inmersión en 12.7mm.	76
Figura 51. Prueba por Inmersión en 19.05mm.	76
Figura 52. Prueba por Inmersión en 25.4mm.	77
Figura 53. Prototipo final.	81
Figura 54. Prototipo final con multiplexor.	81

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El uso de tuberías es el método tradicional para la transportación de hidrocarburos, por lo que la industria petrolera se ve obligada a ejecutar programas de mantenimiento y reposición constantes de sus ductos. En México se cuenta con más de 50,000 Km de ductos de gas y petróleo, donde algunas de estas tuberías fueron colocadas en las décadas de 1930 y 1940, y muchas más se construyeron en las siguientes dos décadas 1950 y 1960 [1], con el paso del tiempo la corrosión del material, el movimiento de suelos, entre otros factores, comprometen la integridad estructural de las tuberías, por lo que es necesario realizar inspecciones periódicas de dichas tuberías. La manera de realizar una inspección es con un equipo especial llamado “Diablo Instrumentado” o conocido mundialmente como “PIG” (Pipeline Inspection Gauge), en la Figura 1 se muestra un diablo instrumentado.

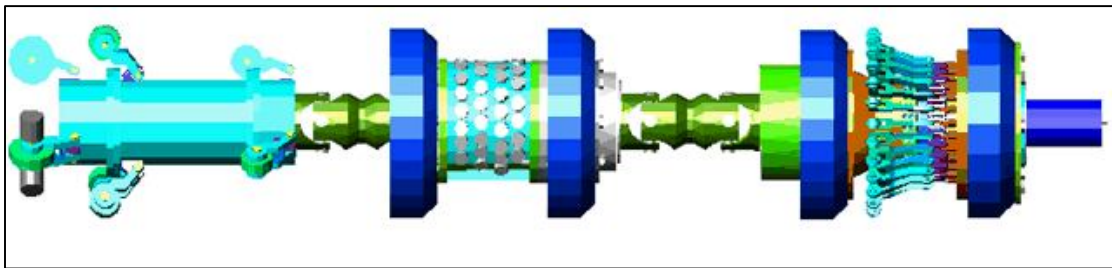


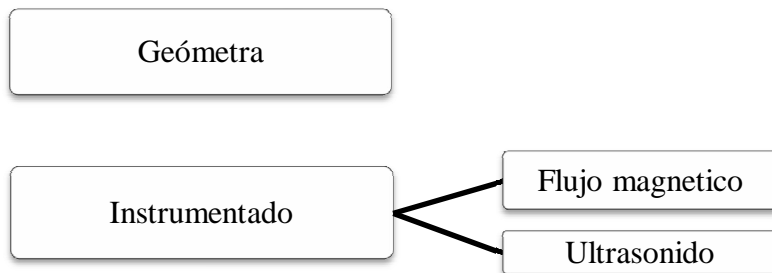
Figura 1. Diabolo Instrumentado.

El Diabolo Instrumentado es un instrumento que se introduce en un tubo y viaja a través de él, impulsado por el flujo que transporta, donde una de sus limitaciones es el espacio que se tiene para el equipo instrumental.

En la actualidad, el nivel de integración alcanzado con el desarrollo de la microelectrónica ha hecho posible el desarrollo de sistemas complejos embebidos en un

solo circuito integrado (SOC, System on a Chip), mejorando de manera notoria características como velocidad, confiabilidad, consumo de energía y el espacio físico de diseño electrónico en encapsulado. Siendo estos beneficiados los sistemas de instrumentación por el continuo incremento en el nivel de integración.

Los Diablos Instrumentados que se usan para lograr estas tareas pueden dividirse de la siguiente manera:



En la actualidad CIDESI se encuentra desarrollando este tipo de tecnología (Diablo geómetra y diablo de ultrasonido), y por ello surge la necesidad de utilizar un sistema electrónico para la medición de espesores por la técnica de ultrasonido.

En el mercado existen diferentes aparatos comerciales para la medición de espesores por la técnica de ultrasonido, sin embargo, al ser equipos comerciales sus tamaños son predefinidos, su arquitectura está muy bien protegida y es completamente cerrada, por lo que surge la necesidad de desarrollar un equipo de ultrasonido propio.

Por otro lado, existe muy poca bibliografía de cómo se constituye electrónicamente el sistema de ultrasonido, entre las cuales destacan, fundamentos de ultrasonido [2], una patente de un circuito integrado en el cual la transmisión y recepción digital de la onda de ultrasonido es procesada en dicho circuito integrado [3] y así se pueden encontrar diferentes trabajos pero ninguno que exponga su arquitectura real.

De los principios básicos de ultrasonido se sabe que para la excitación de un transductor es necesario generar un pulso de voltaje negativo [4] y con ello obtener información de lo

que se está inspeccionando, así para excitar a un transductor se utiliza un amplificador de potencia [5], sin embargo, la información referente al circuito receptor es muy ambigua.

Por otro lado, existe también bibliografía del desarrollo de un PIG, su estructura y la manera de cómo se realiza una inspección en un ducto [6], todo esto es lo que se encuentra en la bibliografía, sin embargo, en ninguna de estas referencias se define detalladamente la arquitectura y funcionamiento de un sistema de ultrasonido.

1.2 Definición del proyecto

En la actualidad existen sistemas para medir espesores pero electrónicamente son de arquitectura cerrada, es decir, los fabricantes protegen bien sus sistemas. Algunos de ellos son de costo accesible pero para este proyecto no son de utilidad, por el tamaño, la forma y dado que en la aplicación se requiere tener el control total de los dispositivos electrónicos del sistema, para manipular las señales de ultrasonido a conveniencia.

Es por ello que surge la necesidad de desarrollar un prototipo electrónico para la medición de espesores, con el objetivo de tener el control de todo el sistema y adaptarlo a nuestras necesidades.

1.3 Justificación

La inspección de tuberías en México, es realizada por compañías extranjeras principalmente BJ Services Company, Rosen, General Electric (GE) y Tuboscope, las cuales ofrecen el servicio de inspección de ductos utilizando diablos instrumentados, donde el costo de un servicio de inspección oscila entre USD\$ 1,000-10,000 por kilometro. Dado que dicha tecnología es cerrada, no se adaptan a la necesidad, es necesario desarrollar por completo el prototipo de inspección por ultrasonido, para el cual se presenta el siguiente esquema.

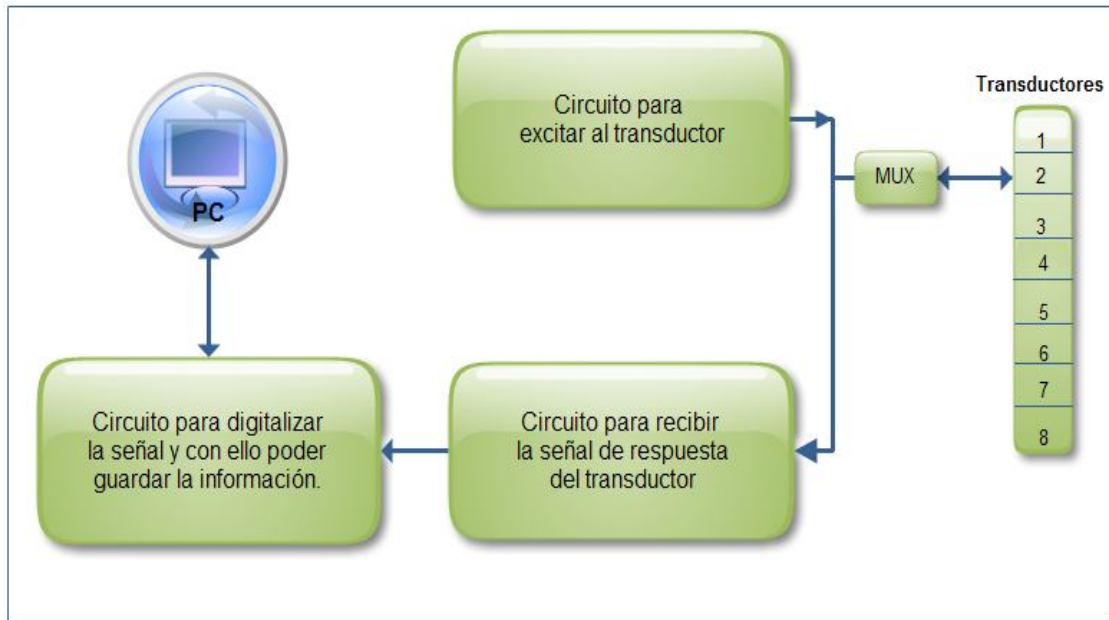


Figura 2. Esquema del Prototipo.

1.4 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es desarrollar un prototipo electrónico para la medición de espesores por la técnica de ultrasonido para ocho canales.

Los objetivos específicos que se tienen son los siguientes:

- Pruebas con equipos comerciales para analizar las señales de un transductor de ultrasonido.
- Análisis, búsqueda y selección de componentes electrónicos.
- Diseño de circuito electrónico pulsador-receptor digitalizador.
- Diseño compacto y desarrollo de tarjetas electrónicas.
- Diseño e implementación de algoritmos para adquisición de las señales de ultrasonido.
- Pruebas en laboratorio.
- Comparación de resultados experimentales del prototipo contra un sistema comercial de laboratorio.

1.5 Alcances y Limitaciones

El alcance de este proyecto es realizar los objetivos planteados, en este tipo de proyectos resulta ser muy compleja la parte experimental por el ambiente donde finalmente se va a implementar el sistema y en donde se hacen las pruebas experimentales, es por ello que este proyecto tiene los siguientes alcances y limitaciones:

Alcances:

- Estudio de las señales de ultrasonido en equipos comerciales.
- Estudio de la arquitectura de un sistema de ultrasonido.
- Desarrollo de un sistema para medir espesores.
- Diseño electrónico se adaptará al espacio que se tenga, dado que se tienen restricciones en espacio y en forma.
- Uso de dispositivos electrónicos recientes, para optimizar espacio y consumo de corriente.
- Control total del sistema de ultrasonido.
- Manejo de 8 transductores por cada sistema
- Pruebas en haz recto
- Validación del prototipo con un patrón escalonado utilizando la técnica de contacto y la técnica de inmersión.

Limitaciones:

- Pruebas únicamente con haz recto.
- Pruebas únicamente para medición de espesores.
- Validación del prototipo en laboratorio.
- Desarrollo de código y modificaciones para el FPGA y μ C complejo.
- Rediseño del PCB complejo.
- Voltaje máximo para excitar al transductor es de 200V negativo.
- Frecuencia de adquisición del sistema es de 50MHz.

- Tiempo de procesamiento de la señal adquirida es limitado.
- No se cuenta con una carcasa para un diablo ultrasónico.

Como se podrá observar, existen limitaciones y restricciones importantes en el desarrollo del prototipo que se deben principalmente, al tipo de aplicación, particular de señales de ultrasonido para medición de espesores y que deberán de ajustarse a las normatividades en el área a las necesidades específicas del proyecto de medición de espesores mediante ultrasonido del CIDESI.

1.6 Organización de la tesis

Esta tesis se encuentra dividida en 5 capítulos, los primeros dos contienen la introducción y el marco teórico, el tercero está dedicado al desarrollo del prototipo, el cuarto capítulo presenta las pruebas y validación del prototipo y el último capítulo está dedicado a las conclusiones. A continuación se hace una breve descripción del contenido de cada uno de ellos:

En el capítulo 1 se presenta los antecedentes del tema de tesis, partiendo de ella se define el proyecto, se dan los objetivos tanto generales como específicos, se justifica el porqué de la realización de este proyecto, se plantean los alcances y limitaciones.

En el capítulo 2 se inicia con la explicación de ultrasonido, como se genera el ultrasonido, tipos de transductores, utilidad del ultrasonido en los ensayos no destructivos. Partiendo del ultrasonido se analiza la estructura interna de un equipo de medición de espesores por ultrasonido, se analizan sus bloques funcionales como son; circuito pulsador, circuito receptor, eliminación del impulso de alto voltaje en la señal de respuesta, filtrado de la señal, implementación de un convertidor analógico digital y por último la digitalización de la señal para poder mostrarla en una PC o poder guardarla.

Se inicia con el desarrollo de todo el prototipo en el capítulo 3, partiendo con el circuito pulsador que es para excitar al transductor de ultrasonido. El circuito receptor se compone

de cuatro partes importantes, eliminación del impulso de alto volate de la señal de respuesta, filtrado de la señal para eliminar ruido, amplificación y acondicionamiento de la señal para que pueda ser leída por con convertidor analógico digital. Finalmente la etapa de visualización y/o almacenamiento de la información.

En el capítulo 4 presentan las pruebas realizadas con un equipo comercial, pruebas realizadas con el prototipo propuesto, se realiza una comparación entre los dos equipos con respecto a los resultados presentados mediante la técnica de contacto, también se presentan resultados en inmersión con los dos equipos y por último se presentan las especificaciones técnicas del prototipo desarrollado.

Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones sobre los resultados obtenidos y sobre el prototipo desarrollado, se plantean trabajos futuros en base a los resultados obtenidos y a los requerimientos de CIDESI.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Ultrasonido

Se llama Ultrasonido al sonido generado por encima de lo que el humano oye (típicamente 20KHz) [2]. Sin embargo, la gama de frecuencia normalmente empleada en pruebas ultrasónicas no destructivas es de 100KHz a 50MHz [7].

En 1928, Sergei Y. Sokolov, científico ruso y conocido por muchos como el padre de los ensayos ultrasónicos, estudió el uso de ondas ultrasónicas para detectar defectos en objetos metálicos. Fue desarrollando su idea a finales de los años 20, en un tiempo en que no disponía de la tecnología requerida para ello. Demostró que las ondas de sonido se podían utilizar como una nueva forma de microscopio basándose en el principio de la reflexión. Sokolov pensó que un “microscopio” que usara ondas de sonido con una frecuencia de 3000 MHz tendría una resolución igual que un microscopio óptico [8].

2.2 Generación de ultrasonido.

Hay muchas formas de generar ultrasonido, en principio se podría usar también los mismos métodos mecánicos usados en la generación de sonido audible. Sin embargo ellos, así como otros métodos parecidos, no son aplicados en los ensayos no destructivos donde se usan otros principios físicos como lo son [9]:

- ❖ Electrostricción: Cuando es generado un campo eléctrico en un material que tiene sus dominios orientados al azar, estos tienden a orientarse en el sentido del campo y así se provoca una deformación mecánica en el cristal, esta deformación se utiliza para generar ondas ultrasónicas.
- ❖ Magnetostricción: Tienen la propiedad de contraerse o dilatarse bajo la influencia de un campo magnético, esta dilatación y contracción se puede usar para generar

ondas ultrasónicas. El empleo de la magnetoestricción está limitado a la emisión y recepción de frecuencias ultrasónicas bajas, aproximadamente de 200 KHz, por lo que este método es el más usado en el ensayo de concreto.

- ❖ Efecto piezoeléctrico: La piezoelectricidad es electricidad inducida mediante presión; esta propiedad es una característica de algunos compuestos cristalinos naturales y algunos materiales hechos por el hombre. Como su nombre lo indica, se desarrolla una carga eléctrica por el cristal cuando se le aplica una presión e inversamente, cuando se le aplica un campo eléctrico, el cristal se deforma. Los cristales piezoeléctricos muestran varios modos de deformación. Los tipos más comunes de materiales piezoeléctricos utilizados en las unidades de rastreo son el cuarzo, sulfato de litio, y cerámicas polarizadas como el titanio de bario, titanato de plomo zirconato y metanobato de plomo. Uno de sus empleos es para inspección de metales.

La generación y detección de las ondas ultrasónicas para inspección se logra por medio de un elemento transductor que actúan a través de un acoplante. El elemento transductor esta contenido dentro de un dispositivo conocido como unidad de rastreo (o algunas veces como palpador). Los elementos piezoeléctricos son los más usados en los transductores para inspección ultrasónica.

2.3 Transductor de Ultrasonido

Un transductor es un dispositivo capaz de convertir de una energía a otra, el transductor de ultrasonido convierte la energía eléctrica en energía mecánica en forma de sonido y viceversa [2].



Figura 3. Transductor de Ultrasonido.

Un transductor de ultrasonido cuenta con una cerámica resonante definido para cierta frecuencia, a este cristal se le aplica un impulso eléctrico que ocasiona resonancia en el cristal a la frecuencia definida, de esta manera se generan las ondas de ultrasonido. Posteriormente la misma cerámica (o puede ser otra) recibe las ondas de sonido reflejado en el material en inspección y las convierte a una señal eléctrica, la cual es manipulada para obtener información de interés.

La señal real de un transductor de ultrasonido se muestra en la Figura 4 donde la información de interés para la medición de espesores en dicha figura es el tiempo de vuelo (t_s) y se determina midiendo la diferencia de tiempo entre ecos, lo más fácil es utilizar compuertas que midan el tiempo en que ocurre el primer pico o borde del eco de referencia y del segundo eco, para así determinar el espesor del metal utilizando la siguiente fórmula:

$$T = \frac{Ct_s}{2} \quad (1)$$

Donde:

T = Espesor del Material.

C = Velocidad del Sonido en el Material.

t_s = Tiempo de Vuelo (TOF).

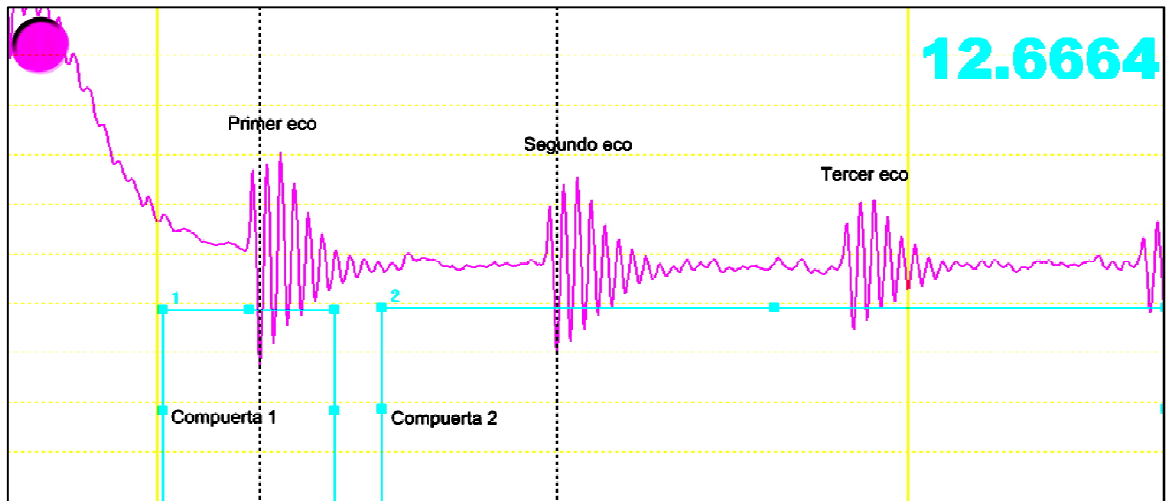


Figura 4. Señal Real de Ultrasonido.

Por regla general todos los parámetros de los transductores de ultrasonido son diseñados para una excitación negativa [7]. Los voltajes de excitación máximos deben ser limitados con aproximadamente 50 voltios por milésima del espesor del elemento piezoeléctrico del transductor, los elementos de baja frecuencia son gruesos y los elementos de alta frecuencia son delgados.

2.4 Tipos de Transductores.

De acuerdo a la manera como se propaga el haz, los palpadores pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- ✓ De haz recto: La transmisión de los ecos son perpendiculares a la superficie de la pieza en inspección.
- ✓ De haz angular: Consisten esencialmente en un transductor de haz recto puesto sobre una cuña de pastico con cierto ángulo y con ello se consigue una incidencia angular de los ecos sobre la superficie de la pieza en inspección.

Los palpadores pueden ser clasificados también de acuerdo a la técnica de inspección que se utilice:

- ✓ De contacto: el palpador se coloca directamente sobre la pieza usando un medio de acople para transmitir el sonido a través de la pieza en inspección.
- ✓ Por inmersión: la pieza de prueba y el transductor están inmersos en un líquido.

De acuerdo al número de cristales piezoeléctricos que contiene el palpador puede ser clasificado como:

- ✓ Un solo cristal como emisor y receptor.
- ✓ Doble cristal, uno emisor y otro receptor.
- ✓ Múltiples cristales para aplicaciones especiales.

2.5 Sistemas básicos de transmisión ultrasónica

Para llevar a cabo la transmisión del ultrasonido existen tres métodos básicos:

- Pulso-eco.
- Onda continua (Transparencia).
- Resonancia.

2.5.1 Método por Pulso-Eco

Consiste en hacer incidir impulsos cortos de vibraciones ultrasónicas sobre un cuerpo, de tal forma que la energía reflejada en las discontinuidades o en la pared posterior, proporcionen una buena base para poder valorar el tiempo transcurrido de ida y vuelta del impulso y permita así, determinar la distancia a la cual se encuentran las discontinuidades desde la superficie o pared posterior, este método aplica para las técnicas de contacto e inmersión.

2.5.2 Método por Onda continua

En este método se emplean dos palpadores, uno que emite y otro que recibe. El método se fundamenta en las variaciones que se producen en la transmisión de la energía ultrasónica como consecuencia de la presencia de discontinuidades o cambios de microestructuras, que quedan en la pantalla del equipo.

Sus aplicaciones pueden ser en materiales con acabado superficial burdo o con una atenuación elevada que ocasionan que la onda al llegar a la pared posterior sea tan débil que al hacer el viaje de regreso no sea detectada, otra aplicación es cuando las caras o superficies de un material no son paralelas, también puede utilizarse en uniones soldadas donde las condiciones geométricas y orientación de las discontinuidades probables hace impráctico del método de reflexión.

2.5.3 Método por resonancia

La resonancia es la vibración característica de un cuerpo, bajo ciertas condiciones, de acuerdo con una fuerza de excitación proporcionada.

La resonancia acústica de los objetos se encuentra constantemente en la vida diaria, cada objeto tiene su propia nota específica. Esto es un producto del hecho de que las ondas sonoras de ciertas longitudes de ondas se reflejan dentro del objeto, esto se conoce frecuencia de resonancia.

El método de resonancia es el más antiguo de los ensayos no destructivos con los dos lados uniformes y paralelos, aunque puede ser empleado para detectar discontinuidades situadas en el mismo plano que la superficie de inspección.

2.6 Ensayo de Ultrasonido

Las ondas ultrasónicas tienen la propiedad de propagarse en la pieza y ser reflejadas parcial o totalmente por un reflector (un defecto o fondo de la pieza).

El equipamiento utilizado para la aplicación de estas técnicas es capaz de generar, emitir y captar haces de ondas muy bien definidas sujetas a las leyes de reflexión al encontrar en su trayectoria un cambio en las propiedades físicas del medio en el cual se propagan. Al ser captadas, son analizadas según el objetivo del equipamiento y con la determinación del tiempo transcurrido desde su emisión hasta su recepción, puede conocerse la distancia recorrida, al ser la velocidad previamente establecida. Se usan bloques escalonados y/o de referencia para calibrar el equipo.

2.7 Bloques de calibración.

El ensayo ultrasónico es un método de inspección por comparación, es decir, las indicaciones de las discontinuidades son comparadas con las indicaciones artificiales en los patrones de referencia. Los bloques patrones son usados para estandarizar la calibración del equipo y evaluar en forma comparativa las unidades obtenidas de la pieza de ensayo. Los patrones de referencia, hechos de materiales debidamente seleccionados para garantizar su sanidad interna y que satisfagan los requisitos de atenuación, tamaño de grano y tratamiento térmico. Las discontinuidades artificiales son maquinadas muy cuidadosamente para cumplir con tolerancias muy cerradas, entre las más comunes se encuentran: agujeros de fondo plano, barrenos laterales y muescas. Las normas y especificaciones requieren del uso de patrones de referencias fabricados de varias aleaciones, tamaños y formas conteniendo agujeros o muescas de tamaños diversos [9].

El bloque escalonado sirve para efectuar calibraciones cuando se requiere un alto grado de exactitud en la determinación de espesores de la pared: para la verificación del desgaste que se ha tenido por ejemplo, en una tubería en servicio. El número de escalones así como

el intervalo de sus incrementos respectivos estará en función del límite de calibración deseado.

Para calibrar un equipo de ultrasonido se toma un bloque de calibración que contenga un espesor menor y otro mayor al espesor que se va a inspeccionar, es decir, si se va a inspeccionar un espesor de 0.5 in o 0.75 in, se toma una medición en 0.25 in y otra en 1.00 in para calibrar el equipo. Un equipo comercial hace todas sus operaciones internamente. El procedimiento que se debe seguir analíticamente es el siguiente:

El objetivo de este procedimiento es calcular un factor de calibración f_c , para ello se calcula la velocidad del sonido en el material (C_c). Primero se toma el tiempo de vuelo en el espesor menor (ts_{menor}) y después se toma el tiempo de vuelo en el espesor mayor (ts_{mayor}), quedando la siguiente ecuación:

$$C_c = \frac{2 T}{ts_{mayor} - ts_{menor}} \quad (2)$$

Donde:

C_c = velocidad del sonido en el material calculado

T = Espesor del material (Espesor mayor – Espesor menor)

ts_{menor} = *Tiempo de vuelo en el espesor menor*

ts_{mayor} = *Tiempo de vuelo en el espesor mayor*

Una vez obtenidos los tiempos de vuelos (ts_{mayor} y ts_{menor}) y aplicando la ecuación (2) se calcula la velocidad del sonido en el material C_c que se va a inspeccionar y a partir de entonces este dato se debe utilizar para toda la inspección. Posteriormente se calcula el tiempo de vuelo para el espesor menor o espesor mayor, despejando de la ecuación (1) se tiene:

$$ts_{menor_c} = \frac{2 T}{C_c} \quad (3)$$

Donde:

ts_{menor_c} = *Tiempo de vuelo menor calculado*

Así el factor de calibración esta dado por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} f_c &= |t_{s_{menor}} - t_{s_{menor_c}}| && \text{ó} && (4) \\ f_c &= |t_{s_{mayor}} - t_{s_{mayor_c}}| \end{aligned}$$

Y es utilizado de la siguiente manera:

$$T = \frac{c(t_s + f_c)}{2} \quad (5)$$

2.8 Arquitectura de un Equipo de Ultrasonido

Las técnicas más versátiles para los ensayos ultrasónicos de materiales utilizan dos parámetros simultáneamente [9]:

- ❖ La amplitud de las señales obtenidas en discontinuidades internas.
- ❖ El tiempo o desfase requerido por el haz para viajar entre superficies y aquellas discontinuidades.

La mayoría de los sistemas de inspección ultrasónicas incluyen lo siguiente [9]:

- Un generador eléctrico de señales que producen pulsos eléctricos.
- Un palpador (transductor) que emiten u haz de ondas ultrasónicas cuando reciben los pulsos eléctricos.
- Un acoplante que transfiere las ondas del haz ultrasónico a la pieza de prueba.
- Un palpador (que puede ser el mismo que se utilizo para emitir las ondas de ultrasonido) para recibir y convertir las ondas de ultrasonido de las piezas de prueba a pulsos eléctricos.
- Un dispositivo eléctrico para amplificar y si es necesario, demodular o de otra manera modificar las señales del transductor.
- Un dispositivo que despliegue para indicar las características o marcas de salida de la pieza de prueba, usualmente en una pantalla.

- Un reloj electrónico o contador (timer) para controlar la operación de los componentes del sistema, para servir como un punto de referencia primario, y para proporcionar coordenadas del sistema completo.

En la Figura 5 se muestra el esquema de un equipo básico de ultrasonido [10], en el cual se muestran los elementos del sistema; Transductores, multiplexor y TR/Switches, transmisor y su aparato de formación del haz, generación de alto voltaje, amplificador de bajo ruido, señal y procesamiento de imágenes a una pantalla, salida de audio, convertidor analógico digital, control central del sistema, etc.

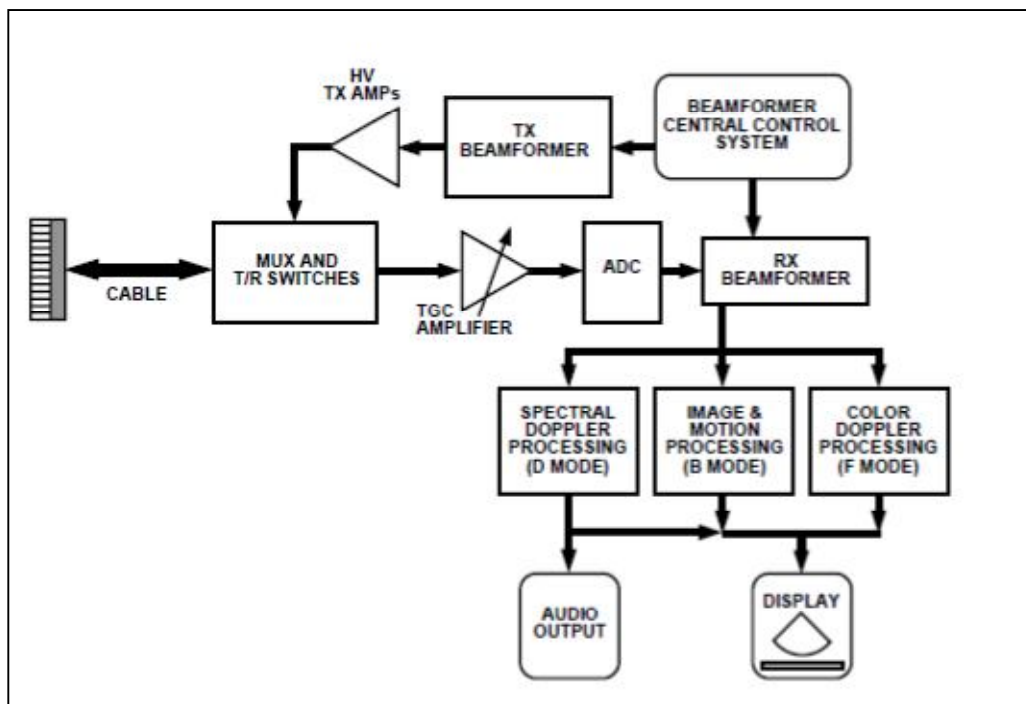


Figura 5. Estructura de un equipo básico de ultrasonido [10].

En la Figura 6 se muestra el esquema de un equipo médico de ultrasonido [11], en el cual se muestran los elementos del sistema; Transductor, multiplexor, generador de alto voltaje, transmisor/receptor (TR/Switches), amplificador de bajo ruido, amplificador de ganancia controlada, convertidor analógico digital, convertidor digital analógico, unidad de control del sistema, procesamiento de la información, protocolos de comunicación, despliegue de la información en una pantalla, salida de audio, fuentes de alimentación, etc.

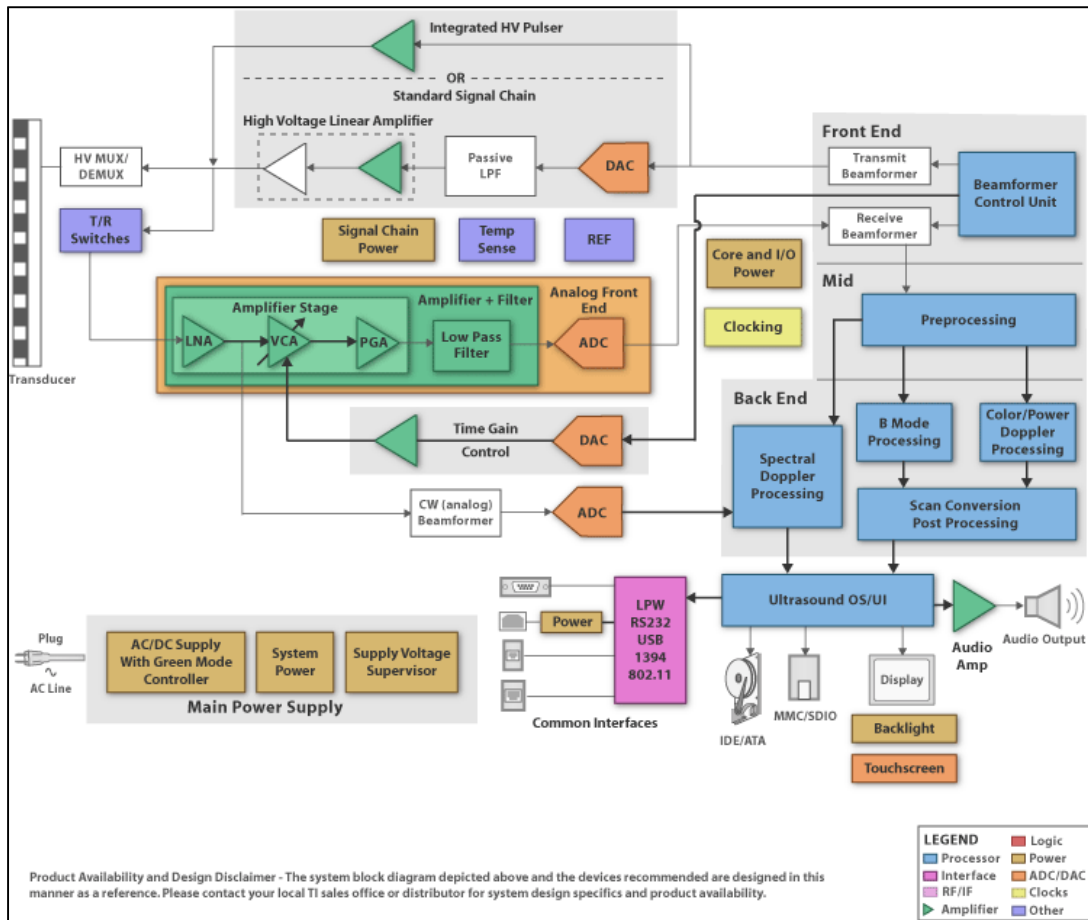


Figura 6. Estructura de un equipo médico de ultrasonido [11].

En base a los requerimientos iniciales de diseño del prototipo y a la información presentada en los capítulos uno y dos, se deducen las partes básicas que se necesitan para desarrollar un prototipo de medición; iniciando por la selección del tipo de transductor, generar un impulso de alto voltaje negativo para excitar al transductor, implementar un circuito para acondicionar la señal de respuesta y no afecte el impulso de alto voltaje para leer la información, implementar un filtro para limpiar la señal de respuesta, amplificar la señal para que sea manejable, ajustar la señal para poder leerla con un convertidor analógico a digital, generar una etapa de control y procesamiento de todo el sistema, utilizar un protocolo de comunicación para desplegar la información en una PC y diseñar sus fuentes de alimentación.

Existe una gran variedad de equipos de ultrasonido de diferentes marcas, modelos, tamaños, forma, presentación de resultados, etc. La selección deberá de ser de acuerdo a las necesidades de inspección y al sistema de transmisión apropiado. Sin embargo, el sistema de transmisión pulso-eco es el más utilizado en la actualidad.

2.9 Generación del Pulso de alto voltaje Negativo

Para poder excitar un transductor se requiere generar un pulso de alto voltaje negativo, con una amplitud de -100V a -200V y con una duración de 40ns a 100ns, para lograr esos dos objetivos, es necesario utilizar transistores para poder cambiar entre alto y bajo, y con ello obtener la duración requerida, por ultimo diseñar una fuente de voltaje que tenga el rango de 0 a 200V, que será suministrado a los transistores para que tengan ese voltaje de salida.

2.9.1 Transistores

Un transistor es un dispositivo electrónico semiconductor que puede cumplir con las funciones de amplificador, oscilador, conmutador e interruptor electrónico. Existen diversos tipos de transistores, de los cuales la clasificación más aceptada consiste en:

- ❖ Transistores bipolares o BJT (Bipolar Junction Transistor): el control se hace inyectando una baja corriente en base, en la Figura 7 se muestra el esquema de la clasificación de este tipo.
- ❖ Transistores de efecto de campo o FET (Field Effect Transistor): el control se hace inyectando un voltaje en la compuerta o gate, en la Figura 7 se muestra el esquema de la clasificación de este tipo.

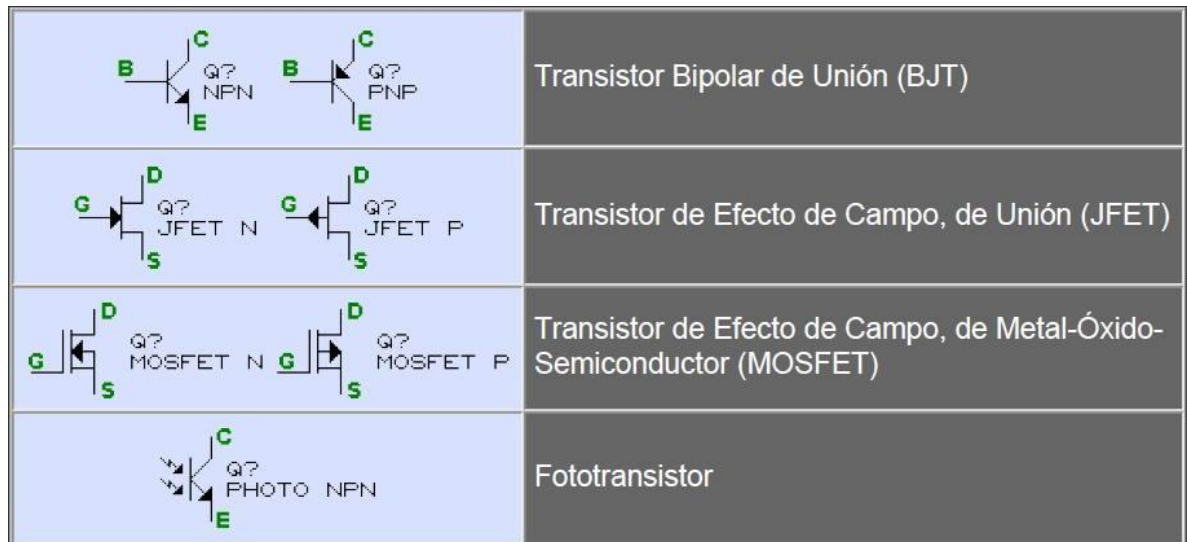


Figura 7. Clasificación de transistores.

Para esta aplicación se requiere utilizar transistores tipo MOSFET en conmutación, ya que el transistor trabaja alternadamente en corte y en saturación, pasa de un estado a otro de forma muy rápida (MHz), así para la generación del pulso de alto voltaje se suelen utilizar este tipo de transistores. En el mercado existen diferentes marcas y modelos de transistores en la Tabla 1 se muestra una comparación de transistores tipo MOSFET de alta velocidad de conmutación.

	TC6320	Si3588DV	CSD16323Q3	Si3529DV
Voltaje de drenaje a fuente.	200V	20V	25V	40V
Voltaje de drenaje a compuerta.	-200V	-20V	0	-40V
Rango de temperatura	-55°C a 150°C	-55°C a 150°C	-55°C a 150°C	-55°C a 150°C
Tiempo encendido	10ns	12ns	5.3ns	2.5ns
Tiempo apagado	20ns	24ns	13ns	8ns

Tabla 1. Comparación de transistores.

2.9.2 Fuentes de voltaje

En electrónica, una fuente de alimentación es un dispositivo que convierte la tensión alterna de la red de suministro, en una o varias tensiones, prácticamente continuas, que alimentan los distintos circuitos del aparato electrónico al que se conecta. En las aplicaciones actuales, por ejemplo en la ingeniería de control, es esencial tomar la decisión adecuada en cuanto a la selección y la planificación de la fuente de alimentación. Una conexión o un dimensionado incorrectos de la fuente de alimentación pueden afectar gravemente a la seguridad y/o la disponibilidad de toda la instalación.

Para dispositivos electrónicos las fuentes de alimentación, pueden clasificarse como fuentes de alimentación lineal y conmutada. Las lineales tienen un diseño relativamente simple, que puede llegar a ser más complejo cuanto mayor es la corriente que deben suministrar, sin embargo, su regulación de tensión es poco eficiente. Una fuente conmutada, de la misma potencia que una lineal, será más pequeña y normalmente más eficiente pero será más compleja y por tanto más susceptible a averías.

Otra forma de generar una fuentes es utilizando un convertidor CD-CD, que convierte directamente de CD a CD. Este convertidor se puede considerar como el equivalente a un transformador de corriente alterna con una relación de vueltas que varían en forma continua. Al igual que un transformador, puede utilizarse como una fuente de CD reductora o elevadora de voltaje.

Existe una gran variedad de fuentes en, forma, tamaño, precio y fabricantes, para este desarrollo es necesario una fuente que de un volteje de salida de 0 a 200V, que el control sea automático con un dispositivo electrónico, como se menciono anteriormente una de las restricciones es el espacio, por lo tanto la fuente debe de ser los más pequeña posible.

2.10 Circuito Receptor de ultrasonido

Hasta este momento solo se ha visto la generación del pulso de alto voltaje y la respuesta del transductor se puede apreciar con ayuda de un buen osciloscopio, sin embargo, la utilización de los componentes adecuados del circuito receptor es primordial para poder digitalizar adecuadamente la señal de ultrasonido. A continuación se mencionan las partes más importantes del circuito receptor.

2.10.1 TR/Switch

Cuando se excita al transductor se recibe una señal de respuesta la cual hay que acondicionar eléctricamente para poder manipularla, para ello, primero se tiene que diseñar un circuito TR/Switch, cuya función principal es limitar el alto voltaje en el circuito receptor generado por el pulso de excitación y que solo deje pasar los niveles de CD de la señal en un rango predefinido por el circuito TR/Switch. Se utilizan principalmente en sistemas donde usan la misma vía para transmitir y recibir señales, y están constituidos principalmente por capacitores, resistencias y diodos.

2.10.2 Circuito Amplificador de Control Variable

Después de que la señal pasa por el TR/Switch es necesario filtrar la señal de ultrasonido con el objetivo de eliminar ruido, posteriormente es necesario amplificarla para tener un mejor control de ella.

Un Amplificador de Control Variable (VCA) es un circuito integrado que se compone de dos partes importantes, iniciando por un preamplificador de bajo ruido (LNP), su función es amplificar señales que estén en un valor de frecuencia bien definido (rango de los MHz),

por lo tanto, además de amplificar elimina la mayoría de ruido de la señal. La última parte es un amplificador de ganancia variable VGA, su principal función es amplificar la señal para tener un mejor control y manipulación de ella. En la Figura 8 se muestra la estructura interna de un VCA.

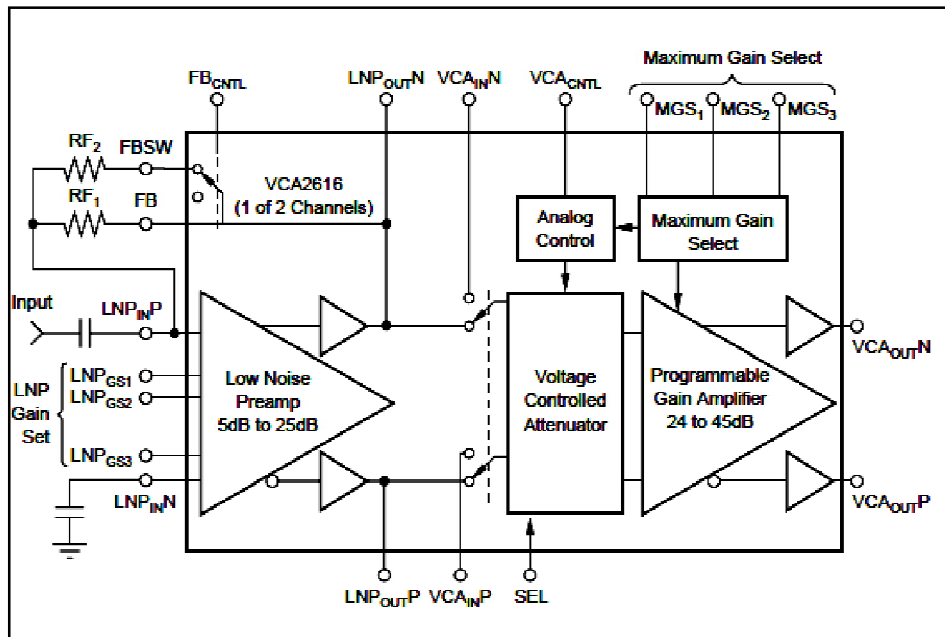


Figura 8. Estructura de un VCA.

Existen diferentes modelos de VCA, la selección depende de la aplicación y de los requerimientos del sistema, en la Tabla 2 se muestran diferentes modelos con sus principales características.

	THS7001	THS7530	VCA2611	VCA2616
Voltaje de alimentación	32V	5.5V	5.25V	5.25V
Rango de ganancia (dB)	-	11.6 - 46.5	17, 22, 25, 5	17, 22, 25, 5
Número de canales	1	1	2	2
Dual	No	No	Si	Si
Frecuencia de entrada	1MHz	5MHz	5MHz	5MHz

Tabla 2. Tipos de VCA.

2.10.3 Amplificadores Operacionales

Una vez que la señal de ultrasonido se filtra y se amplifica, es necesario acondicionarla con un amplificador operacional para poder convertirla a señal digital.

Un amplificador operacional u op-amp, es un amplificador diferencial con un ganancia muy pequeña, con una impedancia de entrada elevada y una impedancia de salida baja. Los usos más típicos del amplificador operacional son proporcionar cambios de amplitud de voltaje (amplitud y polaridad), osciladores, circuitos de filtros y muchos otros tipos de circuitos de instrumentación. Un op-amp contiene varias etapas de amplificador diferencial para lograr una ganancia de voltaje muy alta [12]. En la Figura 9 se muestra un amplificador básico y la función de su terminal, la entrada da como resultado una salida de la misma polaridad (o fase) o de la opuesta, dependiendo si la señal se aplica en la entrada con el signo de mas (+) o a la del signo menos (-).

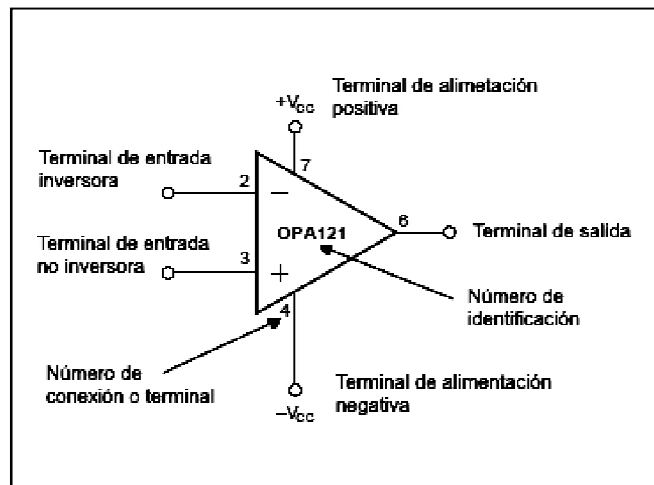


Figura 9. Esquema de un amplificador operacional básico.

El amplificador operacional puede conectarse en una gran cantidad de circuitos para proporcionar diversas características de operación [12]. A continuación se mencionan algunas conexiones más comunes de este circuito.

- ✓ Amplificador inversor.

- ✓ Amplificador no inversor.
- ✓ Seguidor unitario.
- ✓ Amplificador sumador.
- ✓ Integrador.
- ✓ Diferenciador.

2.10.4 Convertidor Analógico a Digital

Sabiendo que la señal de ultrasonido después de acondicionarla sigue siendo analógica, es necesario convertirla a digital con el objetivo de guardar la información o poder desplegarla en una pantalla.

En la electrónica muchos voltajes y corrientes varían continuamente entre algún rango de valores. En la circuitería digital, las señales son de uno o dos niveles, representando los valores binario 1 o 0. Un convertidor analógico digital (ADC) obtiene un valor digital de salida que representa un voltaje analógico de entrada y, en cambio, un convertidor digital analógico (DAC) cambia un valor digital de vuelta a un voltaje analógico [12].

La selección de un ADC depende primero del tipo de aplicación que se va a desarrollar, los bits de resolución determinan la exactitud de la conversión, la frecuencia de muestreo indica que tan rápido o que tan lento puede realizar la conversión y dar los datos de salida. En la Tabla 3 se muestran diferentes ADC y sus principales características.

	ADC084S021	ADS826	AD9215	MAX11644	LTC2283
Voltaje de alimentación	6.5V	6V	3.3V	5.5V	4V
Voltaje de entrada	0V a 6.5V	1.5V a 3.5V	0V a 3.3V	0V a 5.5V	0V a 4V
Bits de resolución	8 Bits	10 Bits	10 Bits	12 Bits	12 Bits
Frecuencia de Muestreo	3.2MHz	50MHz	105MHz	1.7MHz	125MHz
Envío de información	Serial	Paralelo	Paralelo	Serial	Paralelo

Tabla 3. Convertidores analógico digital.

2.10.5 Multiplexor

Una de las etapas importantes en la arquitectura de un equipo de ultrasonido multicanal es el multiplexeo de los canales, en el se selecciona el transductor que se va utilizar, este debe de ser rápido en el cambio de un canal a otro (microsegundos) porque es un parámetro importante para procesar la información de cada transductor.

Los multiplexores son circuitos combinatoriales con varias entradas y una salida de datos, y están dotados de entradas de control capaces de seleccionar una, o varias, de las entradas de datos para permitir su transmisión desde la entrada seleccionada a la salida que es única. La entrada seleccionada viene determinada por la combinación de ceros (0's) y unos (1's) lógicos en las entradas de control. En la Figura 10 se muestra la estructura interna de un multiplexor para aplicaciones de ultrasonido.

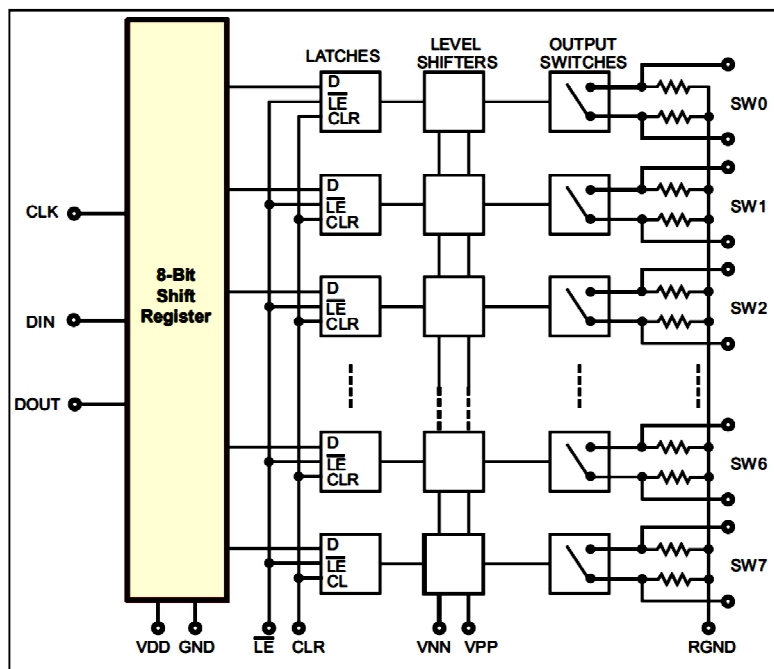


Figura 10. Estructura interna de un multiplexor.

2.11 Procesadores

Un equipo de ultrasonido comercial contiene una etapa de procesadores para controlar todo el sistema, en ella se generan señales de control para la amplificación de la señal de ultrasonido, se generan señales de alta frecuencia que se pueden utilizar para el control de un multiplexor o para el control de drivers de transistores, en esta etapa se procesa la información digital y se genera una comunicación con una computadora. Para lograr los objetivos de esta etapa se pueden implementar Microcontroladores para las señales de control de baja frecuencia y para la comunicación con la computadora, también se pueden implementar los FPGA's para las señales de control de alta frecuencia.

El procesador (CPU, Unidad Central de Procesamiento), es el cerebro del ordenador. Permite el procesamiento de información numérica, es decir, información ingresada en formato binario, así como la ejecución de instrucciones almacenadas en la memoria.

El procesador es un circuito electrónico que funciona a la velocidad de un reloj interno, gracias a un cristal de cuarzo que, sometido a una corriente eléctrica, envía pulsos, denominados "picos". La velocidad de reloj (también denominada ciclo), corresponde al número de pulsos por segundo, expresados en Hertz (Hz). De este modo, un ordenador de 200 MHz posee un reloj que envía 200,000,000 pulsos por segundo.

Con cada pico de reloj, el procesador ejecuta una acción que corresponde a su vez a una instrucción o bien a una parte de ella. La medida CPI (Ciclos por Instrucción) representa el número promedio de ciclos de reloj necesarios para que el microprocesador ejecute una instrucción. En consecuencia, la potencia del microprocesador puede caracterizarse por el número de instrucciones por segundo que es capaz de procesar.

2.11.1 Microcontrolador

Un Microcontrolador es un dispositivo electrónico capaz de llevar a cabo procesos lógicos. Estos procesos o acciones son programados en lenguaje de programación por el usuario, y son introducidos en este a través de un programador. En la Tabla 4 se muestran algunos Microcontroladores comerciales y algunas de sus principales características.

	ATMEL	ATMEL	MC	MC	TX	TX
Dispositivo	AT89S8253	ATMEGA16	PIC16F877A	PIC18F2431	MSP430F2619	MSP430F1611
Tamaño de memoria RAM	12KB	16KB	8Kwords	8Kwords	4KByte	10KB
Numero de Timers	3	-	3	3	2	2
Instrucciones por segundo	-	16MIPS	5MIPS	10MIPS	16MIPS	8MIPS
Máxima frecuencia de muestreo.	24MHz	16MHz	20MHz	40MHz	16MHz	8MHz

Tabla 4. Microcontroladores comerciales.

2.11.2 FPGA

Un dispositivo de arreglos de compuertas programables en campo (FPGA) es un dispositivo semiconductor que contiene componentes lógicos programables e interconexiones programables entre ellos.

La raíz histórica de los FPGA son los dispositivos de lógica programable compleja (CPLD) a mediados de los ochenta, su creador es Ross Freeman, co-fundador de Xilinx. Los componentes lógicos programables pueden ser programados para duplicar la

funcionalidad de compuertas lógicas básicas o funciones combinacionales más complejas tales como decodificadores o funciones matemáticas simples.

Los FPGA son matrices de compuertas eléctricamente programables que contienen múltiples niveles de lógica, se caracterizan por altas densidades de compuerta, alto rendimiento, un número grande de entradas y salidas definibles por el usuario, un esquema de interconexión flexible, y un entorno de diseño similar al de matriz de compuertas. No están limitadas a la típica matriz AND-OR, por lo contrario, contienen una matriz interna configurable de relojes lógicos (CLBs), bloques de entrada y de salidas (IOBs) y canales de comunicación, cada CLB contiene lógica programable combinacional y registros de almacenamiento.

La sección de lógica combinacional es capaz de implementar cualquier función booleana de sus variables de entrada, cada IOB puede programarse independientemente para ser una entrada y salida con control de tercer estado o un pin bidireccional, también contiene flip-flops que pueden usarse como buffers de entrada y salida. Los recursos de interconexión son una red de líneas que corren horizontalmente y verticalmente las filas y columnas entre el CLBS. En la Tabla 5 se muestran algunos FPGA's comerciales y sus principales características.

	FPGA de Altera	FPGA de Lattice Semiconductor	FPGA de Xilinx	FPGA de Xilinx	FPGA de Xilinx
Familia	CYCLONE-EP1C3	LATTICE-ECP2	Spartan-3AN-XC3S50	Spartan-3E-XCS500	Spartan-3AN-XC3S1400
Numero de bloques lógicos	291	6000	1,584	10,476	25,344
Tipo de encapsulado	TQFP	TQFP	TQFP	TQFP	FBGA
Numero de pines	144	144	144	208	676

Tabla 5. FPGA's comerciales.

2.12 Diseños de PCB's

Otra de las partes importantes de un equipo comercial de ultrasonido es el diseño electrónico de la tarjeta de circuito impreso, ese tipo de diseños es muy importante porque se manejan diferentes voltajes de alimentación, señales de control de alta frecuencia, alto voltaje negativo y la señal de respuesta del transductor. Los aspectos importantes en un diseño son; la distribución de los componentes sobre la tarjeta de circuito impreso, el seguimiento de normas de diseño y las recomendaciones de los fabricantes de dispositivos electrónicos.

Una tarjeta de circuito impreso o PCB (Printed Circuit Board), es básicamente una placa delgada que cuenta con una o varias capas de pistas (conductores en un mismo plano) que permiten la interconexión de las diferentes componentes electrónicas de un circuito soldado a ella. Fueron desarrolladas en la década de los 40 con el objetivo de fortalecer los circuitos eléctricos para su uso en aplicaciones militares. Una computadora o cualquier equipo electrónico puede tener una o varias PCB's. El diseño PCB involucra una serie de conocimientos que van más allá del PCB en sí, como lo son el análisis del comportamiento del sistema para el que se está diseñando. Un diseño PBC consta de tres partes importantes:

- ✓ Diseño esquemático
- ✓ Diseño PCB
- ✓ Generación de archivos gerber y NC Drill para fabricación.

Con el objetivo de estandarizar y realizar diseños de calidad, existen una serie de normas IPC (Association Connecting Electronic Industries), para que con ellas podamos obtener una serie de beneficios; evitar rediseños, que todos los diseños estén dentro de lo normal y que el diseño tenga calidad. Dentro de estas normas se tiene la norma IPC2221 que da reglas de diseños genéricos [13] y partiendo de ella se derivan otras que son de aplicaciones específicas.

Otro punto importante en el diseño de PBC's es el calcular el ancho de una determinada pista, para ello es necesario conocer tres datos:

1. La corriente máxima que pasara por la pista.
2. El incremento máximo permitido de temperatura.
3. El grosor de la pista (1,2 o 3 onza por pie al cuadrado).

Para lo cual se utilizan las siguientes formulas:

$$\text{Ancho} = \frac{\text{Área}}{(L*1.378)} \quad (6)$$

Donde:

L= grosor de la pista

$$\text{Área} = \left[\frac{I}{k_1 * (\Delta T)^{k_2}} \right]^{k_3} \quad (7)$$

Donde:

I= Corriente máxima.

k_1 = 0,0150 pista interna y 0,0647 cuando externa.

k_2 = 0,5453 pista interna y 0,4281 pista externa.

k_3 = 0,7349 pista interna y 0,6732 pista externa.

La elaboración de un buen diseño PCB tiene consecuencias considerables, ya que de ello depende la funcionalidad del sistema desarrollado, para desarrollar un buen diseño se hacen las siguientes recomendaciones:

- ✓ Usar pistas lo más cortas posible.
- ✓ Distribuir por todo el PCB; la alimentación, señales de control, relojes y circuitos integrados.
- ✓ Leer la regla de diseño estándar IP2221.
- ✓ Usar planos de tierra.
- ✓ En los circuitos integrados de altas frecuencia se recomienda conectar condensadores entre alimentación y tierra, tan cerca de estos dispositivos como sea posible.
- ✓ No hacer líneas de 90° y tratar de hacerlas de 45°.

CAPÍTULO III. DESARROLLO DE PROTOTIPO

3.1 Requerimientos de Desarrollo

El desarrollo del prototipo de ultrasonido se realizó conforme a la norma de PEMEX, NRF-060-PEMEX-2006, la cual se muestra en la Tabla 6 y se pueden apreciar las características importantes para el desarrollo de este prototipo.

Radio de curvatura mínimo	1.5 (D/90°)
Máxima presión permisible	120 bar
Rango de temperatura permisible	0° C hasta +40° C
Frecuencia del pulso de ultrasonido	De 2 a 5 MHz
Frecuencia de repetición de pulsos (FRP)	Hasta 600 Hz
Resolución en la medición del espesor de pared	0.2 mm
Precisión en la evaluación del espesor remanente	±0.5 mm
Resolución circunferencial	±5° (0.3 pulg. / 8 mm)
Resolución longitudinal	2.8 mm (a 0.85 m/s)
Precisión en la ubicación axial de defectos	±0.2 m (desde soldadura de referencia)
Velocidad del equipo	0.2 a 2.0 m/s.

Tabla 6. Características que se deben de cumplir de acuerdo a normatividad.

Para el desarrollo del diseño esquemático y diseño PCB se uso el software Altium Designer Summer 09, el cual cuenta con excelentes funciones que ayudan al desarrollo de un PCB de calidad, dentro de él se pueden generar reglas de diseño; en base a

recomendaciones de fabricantes de circuitos integrados, a la experiencia propia y a las reglas IPC.

Cabe hacer mención que el diseño PCB tomó una gran importancia para el desarrollo de este proyecto, ya que en el prototipo desarrollado se manejan diferentes señales como son; alto voltaje negativo (100Vcd), señales de alta frecuencia (50MHz), voltaje de alimentación de ± 5 Vcd y dispositivos de propósito específico.

3.2 Circuito Pulsador

Como se mencionó anteriormente para excitar un transductor de ultrasonido es necesario generar un impulso de alto voltaje negativo, para ello se desarrolló un circuito pulsador que excita al transductor y así generar el ultrasonido, lo cual es la primer parte de este desarrollo. Para lograr este objetivo se pasaron por diferentes etapas, iniciando por la forma de excitar un transductor, para ello se siguieron diferentes pasos como son; investigación bibliográfica de un circuito pulsador para excitar un transductor de ultrasonido, investigación de dispositivos electrónicos ideales para este propósito, se analizaron las señales de respuesta con un osciloscopio, se investigaron equipos comerciales de ultrasonido y se analizo el fundamento matemático de una señal de ultrasonido.

En la Figura 11 se muestra en forma de diagrama de bloques cómo debe de estar constituido el diseño del circuito pulsador, en base al marco teórico se hizo la selección de los componentes electrónicos a utilizar, se tomo como referencia de diseño la norma de Pemex y los requerimientos internos de CIDESI.

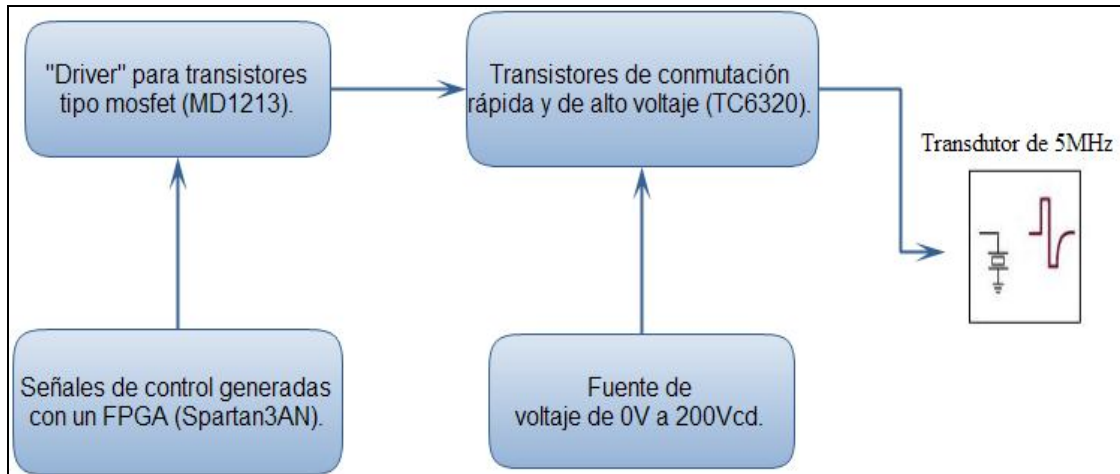


Figura 11. Diagrama bloques del circuito pulsador.

El circuito pulsador se compone de un circuito integrado MD1213 de la marca Supertex, las aplicaciones más importantes que tiene este circuito integrado son para manejar transductores piezoeléctricos, en ensayos no-destructivos y en imágenes de ultrasonido medico. Es un “driver” dual de alta velocidad diseñado para transistores tipo MOSFET, su alimentación es de $\pm 5\text{Vcd}$, para su implementación requiere de unas señales digitales de alta velocidad en las terminales OE, INA, INB, las cuales son programadas con el FPGA ya que deben cambiar de un nivel lógico a otro cada 400ns, 100ns y 100ns respectivamente (ver Figura 12). La señal verde es para la terminal OE que es la habilitación de salida, la señal azul es para la terminal INA que activa los MOSFET y la señal roja es para la terminal INB que los desactiva.

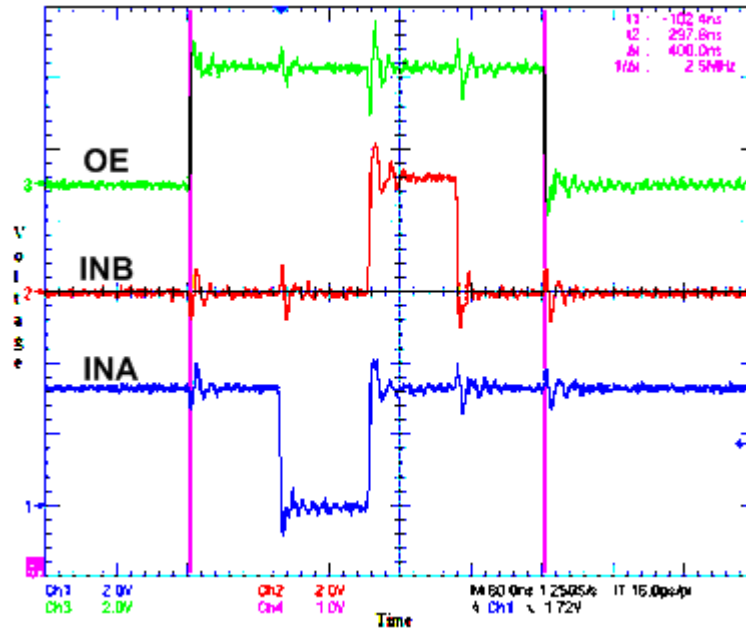


Figura 12. Señales de alta frecuencia.

Posteriormente el driver MD1213 se conecta a un circuito integrado TC6320 de la marca Supertex, contiene dos de transistores tipo MOSFET de alto voltaje y conmutación rápida, el cual genera el pulso real de alto voltaje. En la Figura 13 se muestra el esquema del circuito pulsador para excitar un transductor.

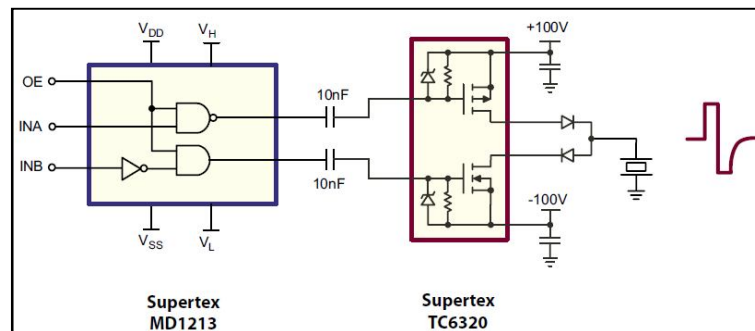


Figura 13. Esquema de circuito pulsador.

El circuito integrado TC6320 requiere de un voltaje de entrada de $\pm 100\text{Vcd}$ para que pueda conmutar, dado que el voltaje de excitación para un transductor es negativo, solo se generan -100Vcd para el TC6320. Para ello utilizamos un transformador pequeño de dimensiones $12.7 \times 12.7 \text{ mm}$, modelo Q01-5 de la marca EMCO con una entrada de voltaje

de 0 a 5Vcd genera una salida proporcional de 0 a -100Vcd, el rango de voltaje se controla con una salida analógica del Microcontrolador MSP430 de la marca Texas Instruments, la cual va a un amplificador de voltaje THS4211 de Texas Instruments para fortalecer la corriente y entregar un rango de voltaje de 0 a 5Vcd y de 0 a 100mA para alimentar el transformador, su diseño esquemático se muestra en la Figura 14.

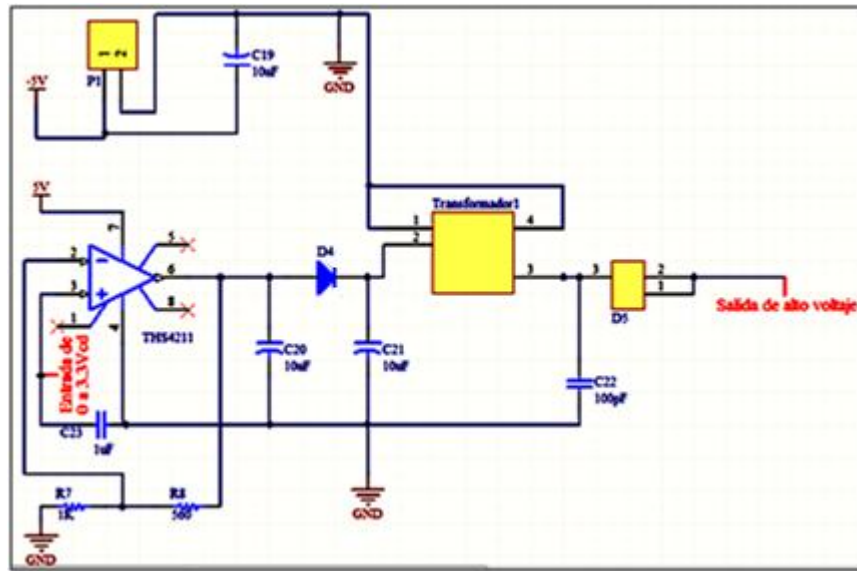


Figura 14. Esquemático de alto voltaje

Una vez entendido la importancia del circuito pulsador y el contenido del mismo se inicio a desarrollar su diseño esquemático el cual se muestra en la Figura 15.

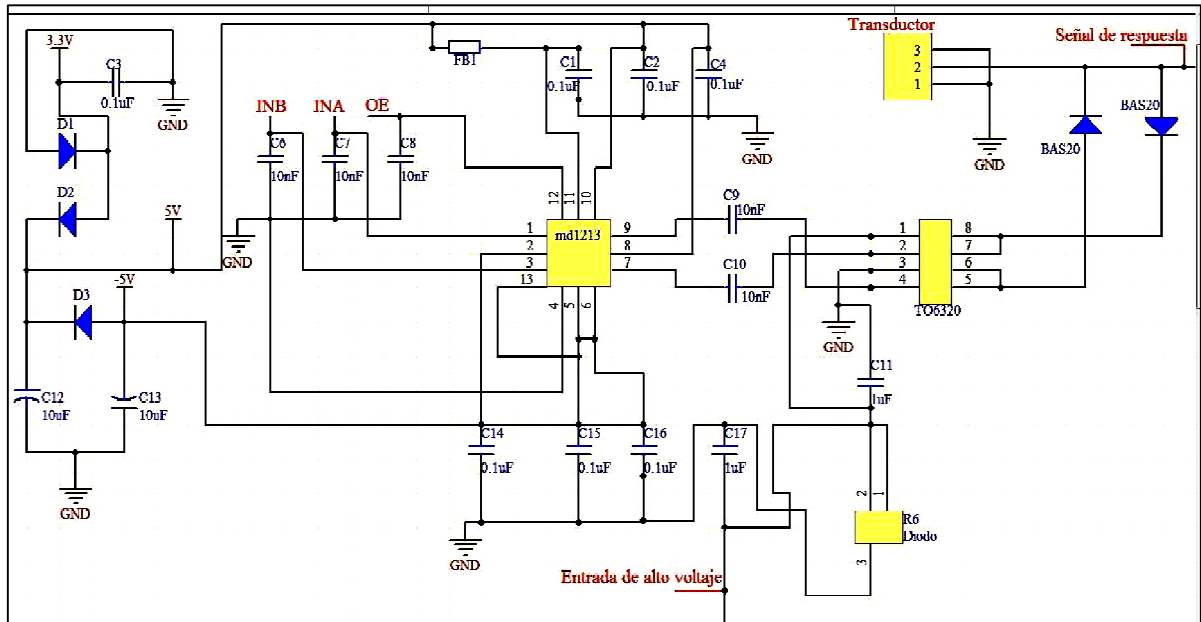


Figura 15. Diseño esquemático del circuito pulsador.

Una vez detallado y terminado el diseño esquemático, se realiza el diseño PCB y por último se generaron los archivos de fabricación (Gerber y NC Drill), posteriormente se fabrica una tarjeta prototipo y con ella se inician las pruebas. En la Figura 16 se muestra la tarjeta del circuito pulsador.

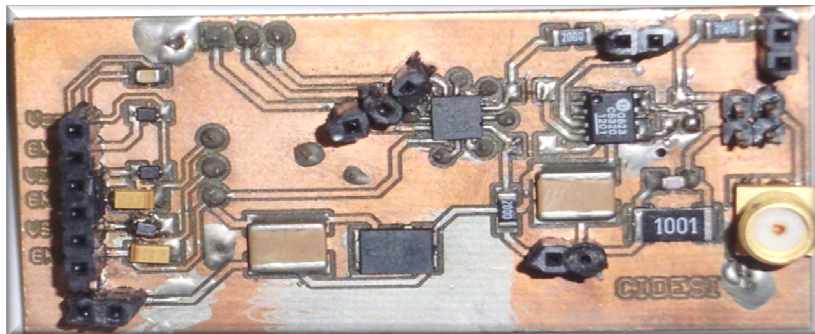


Figura 16. Tarjeta de circuito pulsador

En la Figura 17 se muestra el pulso negativo logrado con la tarjeta del circuito pulsador, con dicho pulso se excita al transductor. En este ejemplo se muestra con un valor de -80Vcd y con una duración de 100ns.

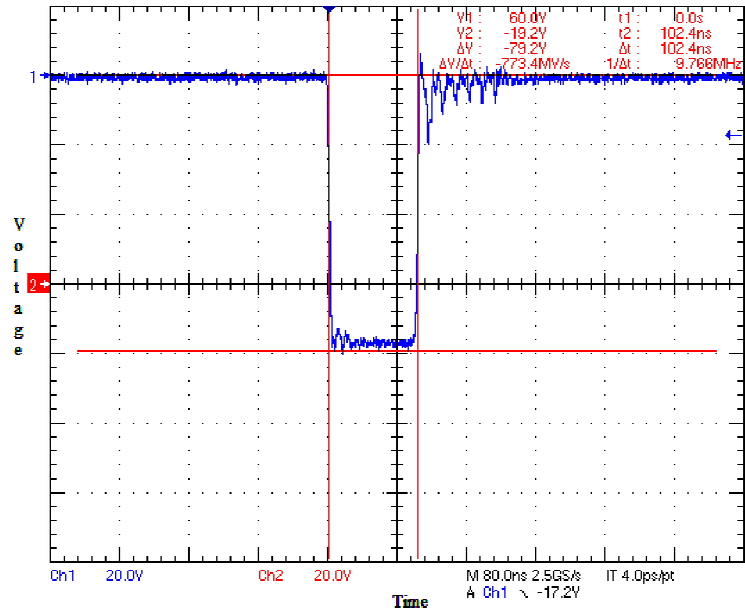


Figura 17. Pulso negativo

Una vez que el transductor se excita emite una señal de respuesta por la misma vía por donde se excito, recibiendo una señal muy pequeña (mV) y con mucho ruido, que para poder observarla con ayuda de un osciloscopio se ajustaron impedancias y se aplicó un filtro de pasa-bajas con frecuencia de corte de 20MHz, esta señal se muestra en la Figura 18, donde se obtienen con ayuda de los cursores la amplitud máxima del primer eco que es de 154mVp-p y el tiempo de vuelo (t_s) entre los dos primeros ecos que es de 2.14 μ s.

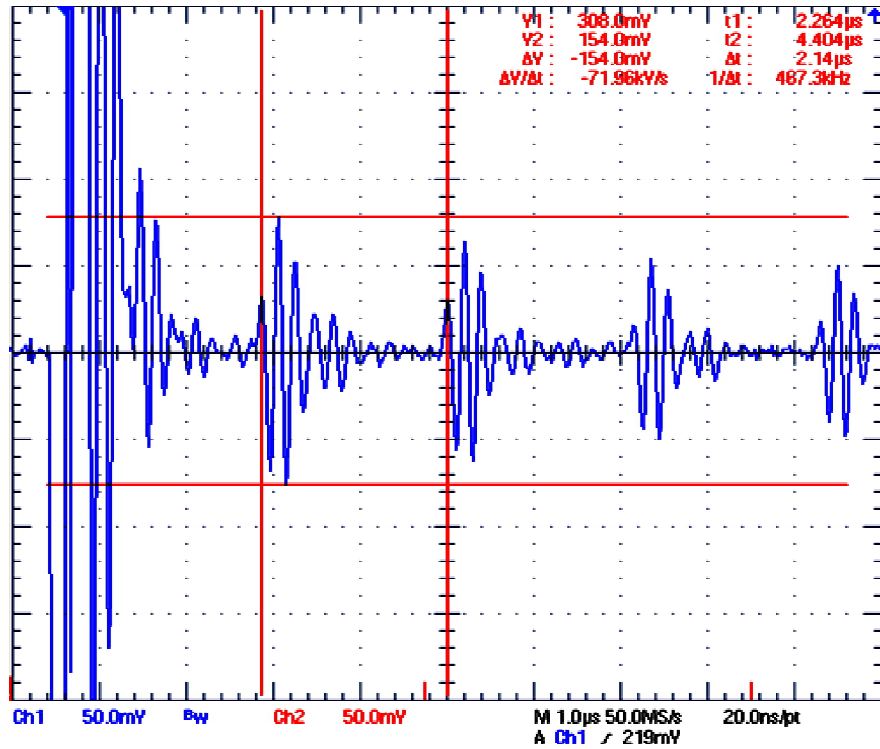


Figura 18. Respuesta del transductor

3.3 Circuito Receptor

Hasta aquí solo se tiene la generación del pulso de alto voltaje y se puede apreciar con ayuda de un buen osciloscopio la respuesta del transductor, sin embargo, la utilización de los componentes adecuados del circuito receptor es primordial para poder digitalizar adecuadamente la señal de ultrasonido, en base a lo mencionado en el marco teórico se hizo la selección de los componentes electrónicos adecuados para recibir la señal de respuesta del transductor. En la Figura 19 se muestra en un diagrama de bloques lo que se requiere para leer la respuesta de un transductor de ultrasonido.

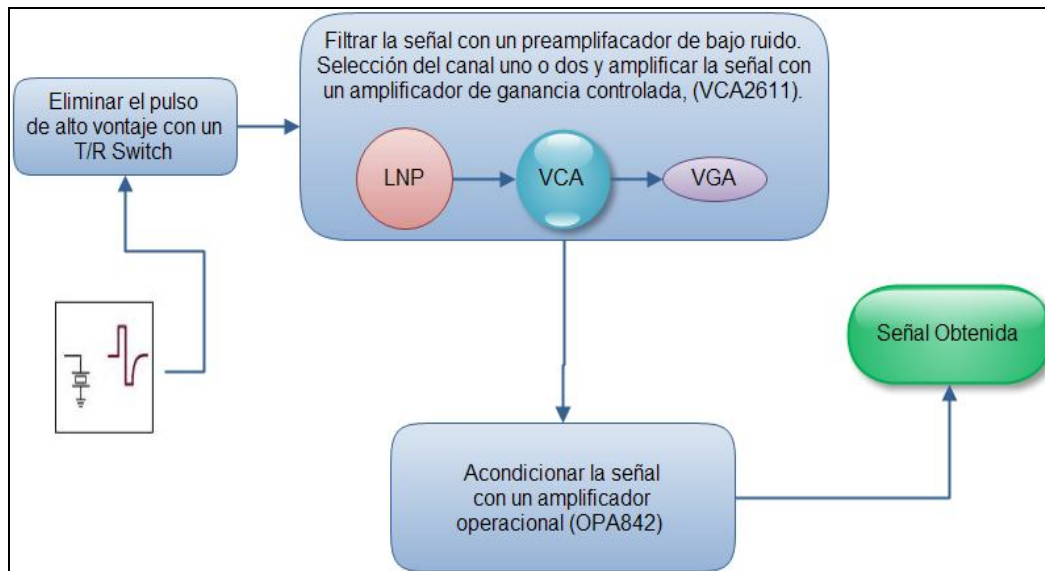


Figura 19. Diagrama a bloques del circuito receptor.

Cuando se excita al transductor se recibe una señal de respuesta la cual hay que acondicionar eléctricamente para poder medir, para ello, primero se hace pasar por un circuito TR/ Switch, el cual está constituido por capacitores, resistencias y diodos de alto voltaje con respuesta rápida (BAS21), Figura 20, su función es limitar el alto voltaje del impulso y ajustar el nivel de voltaje de CD a un rango de $\pm 5V$, es decir, se elimina el impulso negativo generado para excitar al transductor y solo se deja pasar la señal de respuesta del transductor, dado que por el mismo punto eléctrico por donde se excita se recibe la señal de respuesta.

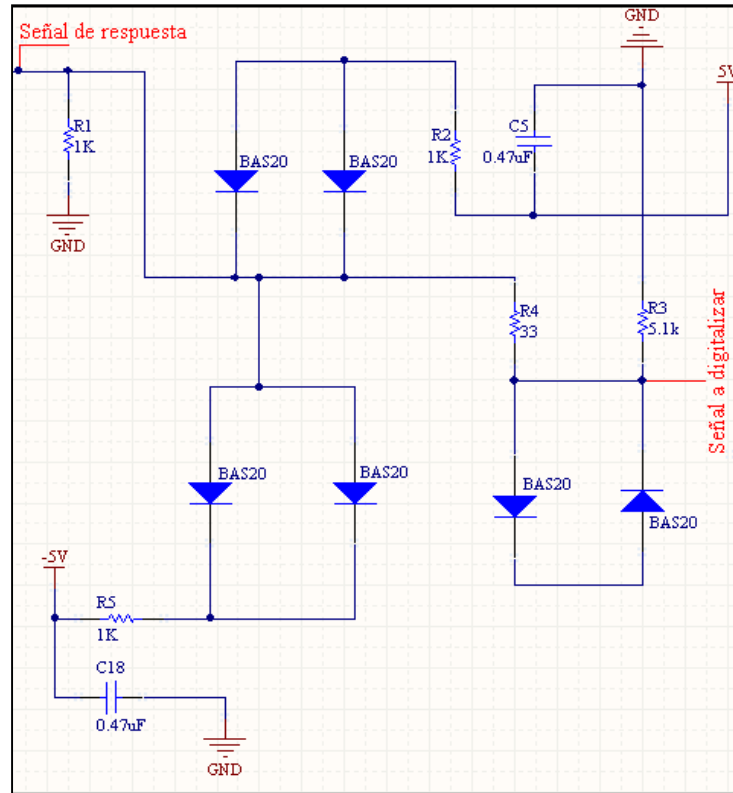


Figura 20. TR/ Switch.

Posteriormente la señal de respuesta pasa por un circuito integrado VCA2611 de la marca Texas Instruments de dos canales que se constituye de tres partes principales; la primera es un preamplificador de bajo ruido (LNP), cuya función es amplificar señales que estén en el rango de los 50MHz, es decir, además de amplificar elimina la mayoría del ruido de la señal, la segunda parte es el VCA para seleccionar entre el canal A o B, la tercera y última parte es un amplificador de ganancia controlada (VGA) con el fin de aumentar el rango de amplificación de la señal.

En la Figura 21 se muestra el diagrama esquemático del circuito receptor, después de que la señal pasa por el circuito integrado VCA2611 y por todo el proceso que este implica, la señal de salida pasa por un amplificador operacional OPA648 de la marca Burr-Brown que sirve para acondicionar la señal y esta esté en los rangos necesarios para el convertidor analógico a digital (ADC).

Cabe hacer mención que para tener una mejor lectura de la señal se puede amplificar de dos maneras; una es incrementado el pulso de alto voltaje y la otra es utilizando el amplificador de ganancia controlada, de estas dos maneras se tiene una señal con mayor amplitud.

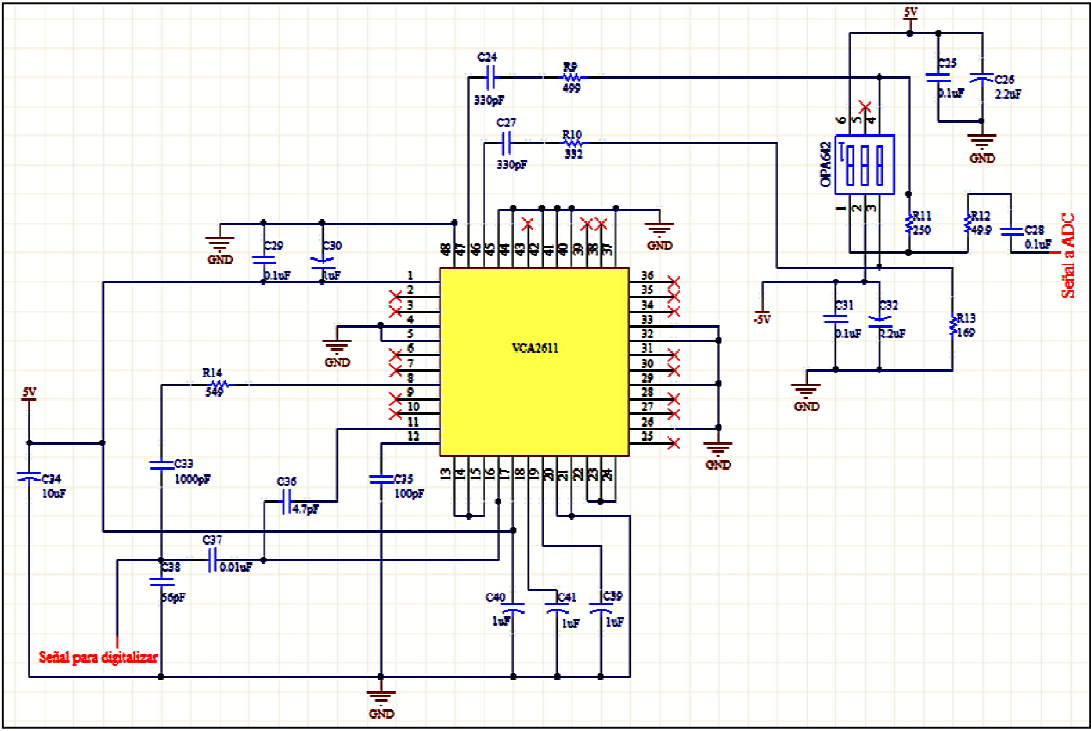


Figura 21. Esquemático de circuito receptor.

Una vez detallado y terminado el diseño esquemático de todo el circuito receptor, se realiza el diseño PCB y por último se generan los archivos de fabricación (Gerber y NC Drill), posteriormente se fabricó una tarjeta prototipo en el laboratorio y con ella se inician las pruebas. En la Figura 22 se muestra la tarjeta del circuito receptor.

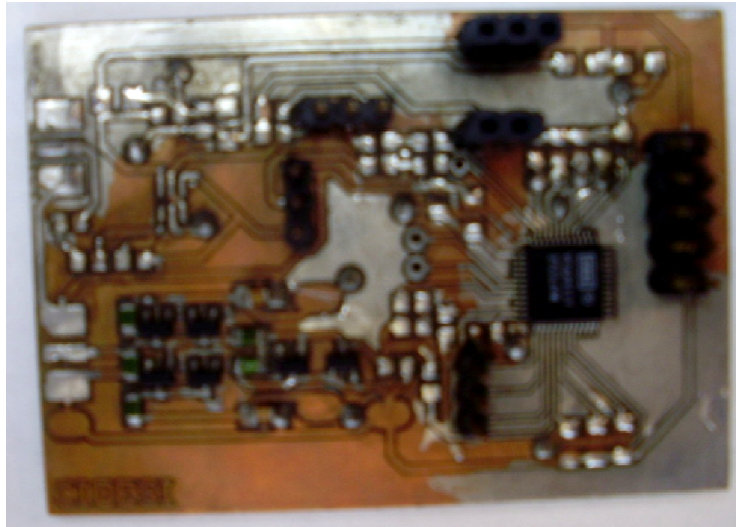


Figura 22. Diseño PCB del circuito receptor.

En la Figura 23 se muestra la señal de respuesta del transductor, después de pasar por el circuito receptor, se adquiere de igual manera con el osciloscopio pero bajo condiciones normales, es decir sin ningún tipo de filtro ni acoplamiento de impedancias, en la cual se puede apreciar con menos ruido y con mayor amplitud a diferencia de la Figura 18 y se aprecia cómo el TR/Switch limita la amplitud del pulso de alto voltaje.

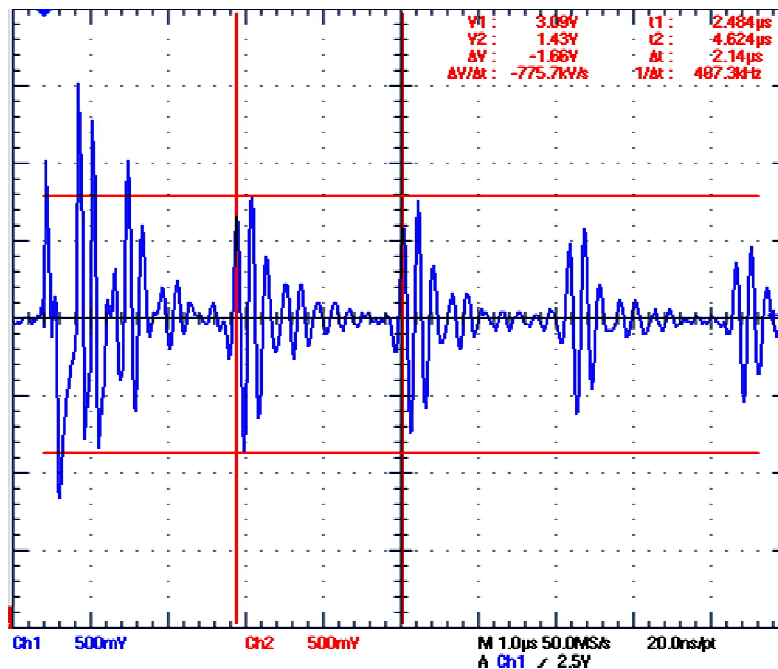


Figura 23. Señal filtrada.

3.4 Circuito Digitalizador

El circuito digitalizador convierte la señal analógica a digital y la almacena en la memoria del FPGA para poder manipularla, es decir, poder guardarla, comprimirla, desplegarla en una computadora (PC), etc. En base a lo mencionado en el marco teórico, se hace la selección correcta de los componentes electrónicos y con ello se propone un circuito digitalizador, consta de tres módulos importantes; Convertidor analógico digital, FPGA y Microcontrolador, en la Figura 24 se muestra la estructura del circuito digitalizador y las partes que lo conforman.

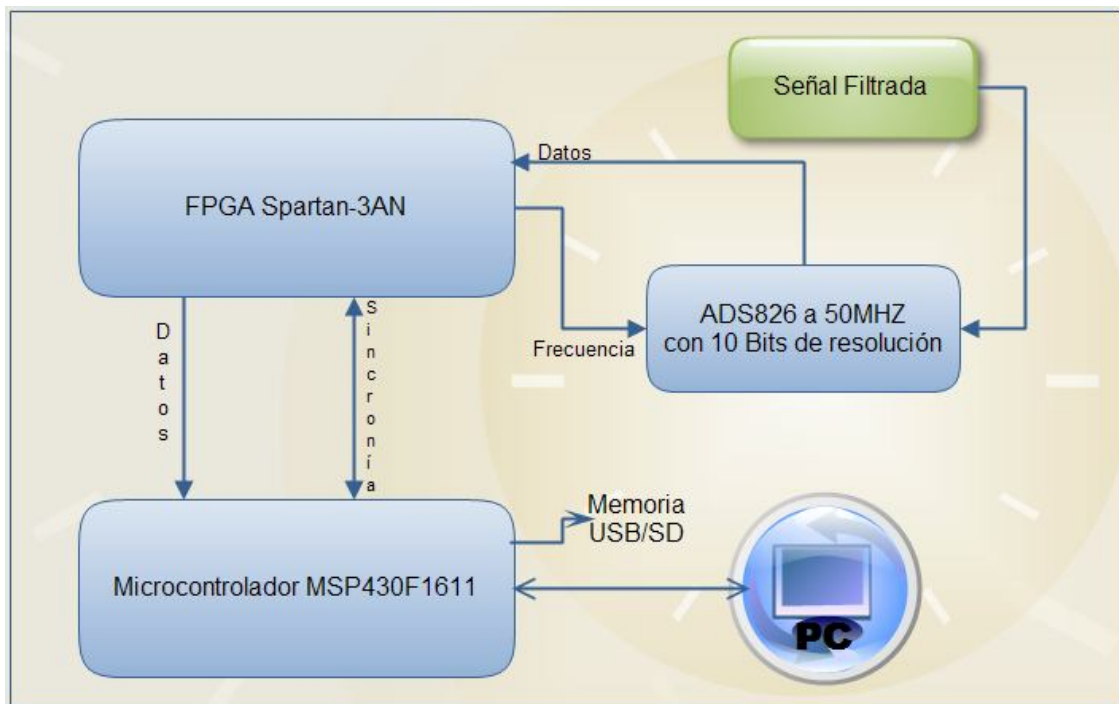


Figura 24. Diagrama a bloques del circuito digitalizador.

El convertido analógico digital que se utiliza es un ADS826 de la marca Texas Instruments, con una frecuencia de muestreo de 50 MHz y con una resolución de 10 bits, aquí cabe mencionar que para la medición del espesor lo que realmente interesa es la resolución en tiempo ya que es en función a éste valor como se obtiene el espesor. Por otro lado, considerando que la resolución en amplitud no es realmente importante y que es más

fácil manejar datos de 8 bits, solo se utilizan los 8 bits más significativos del ADC. En la Figura 25 se muestra el diseño esquemático del ADC.

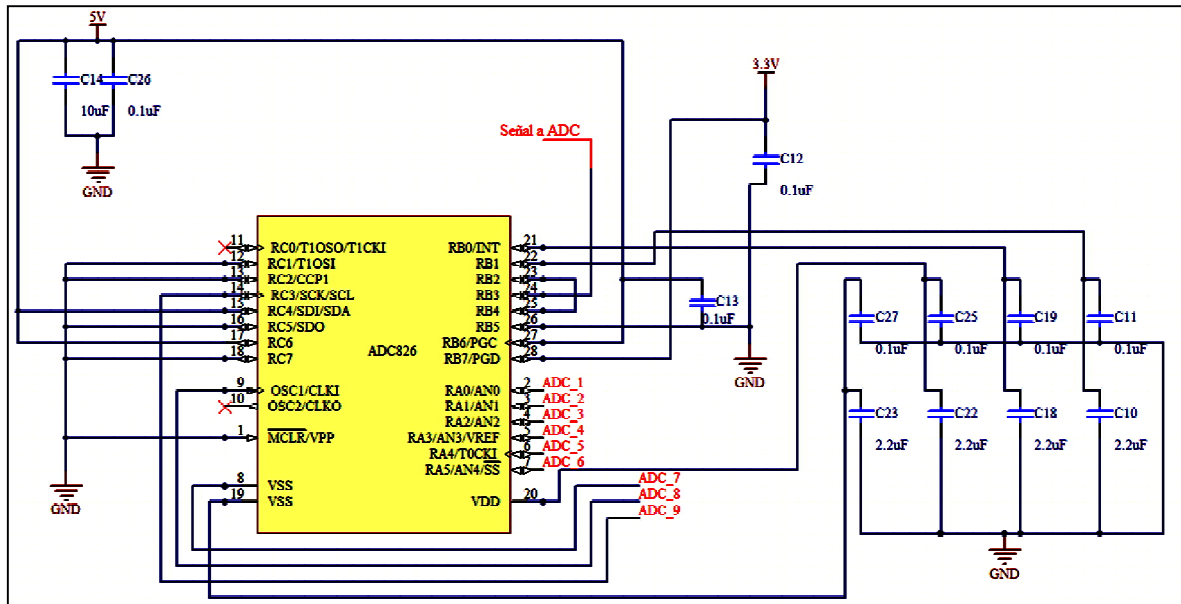


Figura 25. Esquemático del ADC.

La segunda parte importante del circuito digitalizador es el FPGA, es de la familia Spartan-3AN, el dispositivo es XC3S50AN cuenta con 144 terminales o pines, su frecuencia de muestreo puede ser de hasta 100Mhz y cuenta con 50,000 número de compuertas.

El ADC es controlado con el FPGA, una vez que se convierte la señal a digital el FPGA lee la información y se guardan en una memoria RAM interna para guardar 20.48 µs de información lo cual corresponde a 1024 datos, ya que se tiene la señal en memoria RAM del FPGA la cual se puede manipular a conveniencia.

En la Figura 26 se muestra la primera parte del diseño esquemático del FPGA el cual contiene los bloques funcionales de entradas y/o salidas, en la Figura 27 se muestra la segunda parte del diseño el cual contiene las diferentes alimentaciones que requiere.

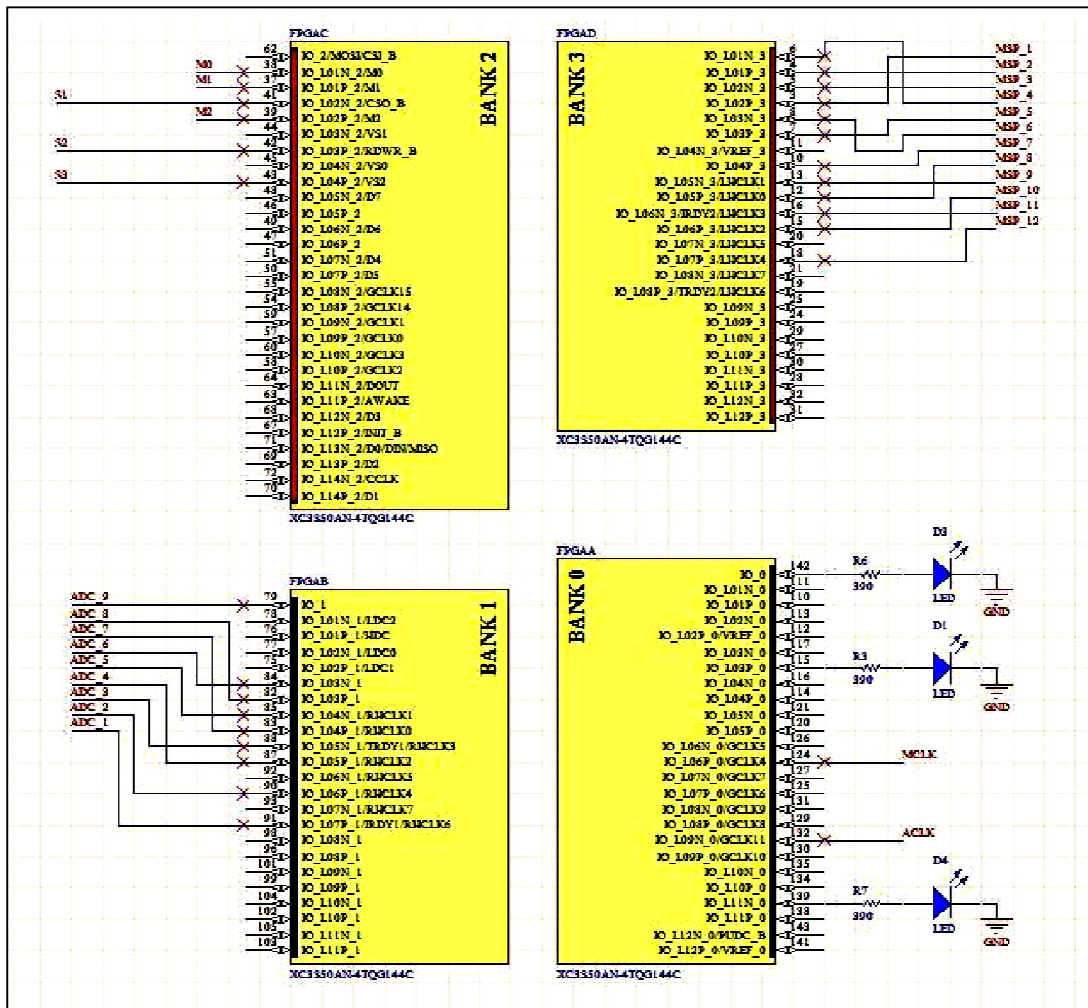


Figura 26. Esquemático del FPGA parte 1.

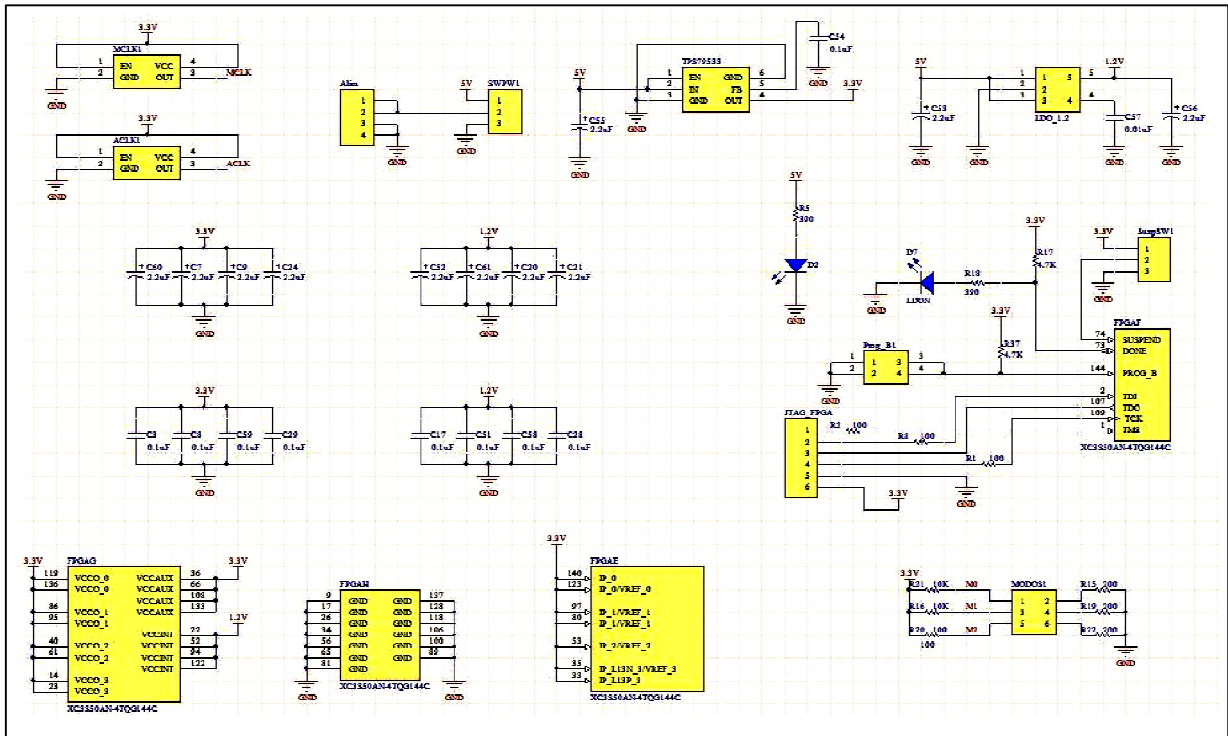


Figura 27. Esquemático del FPGA parte 2.

3.5 Visualización de datos.

Con el propósito de analizar los datos obtenidos y con el fin de ilustrar la funcionalidad del sistema, los datos de la memoria RAM del FPGA son leídos por el Microcontrolador y enviados a una computadora para visualizar la imagen de la señal de respuesta y así poder validar la funcionalidad del prototipo propuesto. En la Figura 28 se muestra el diseño esquemático del Microcontrolador, el cual es un MSP430F1611 de la marca Texas Instruments con una frecuencia de operación de 8MHz, con 8MIPS (millones de instrucciones por segundo), este Microcontrolador tiene diferentes funciones, una es generar una salida de voltaje de 0 a 3.3Vcd para alimentar al transformador y con ello obtener un voltaje de 0 a -100V, otra función importante es que sirve como interfaz de comunicación con una computadora para visualizar la señal de respuesta del transductor, por último, se le conecta una memoria USB/SD para guardar datos en ella.

En la Figura 29 se muestra la tarjeta electrónica preliminar en donde se puede ver que se integran varias tarjetas, es decir no están integrados todos los bloques en una sola tarjeta electrónica. Uno de los objetivos de esta tesis es optimizar el espacio de las tarjetas electrónicas y como los bloques de todo el prototipo de ultrasonido se tienen por separado se deben integrar en una sola tarjeta electrónica.

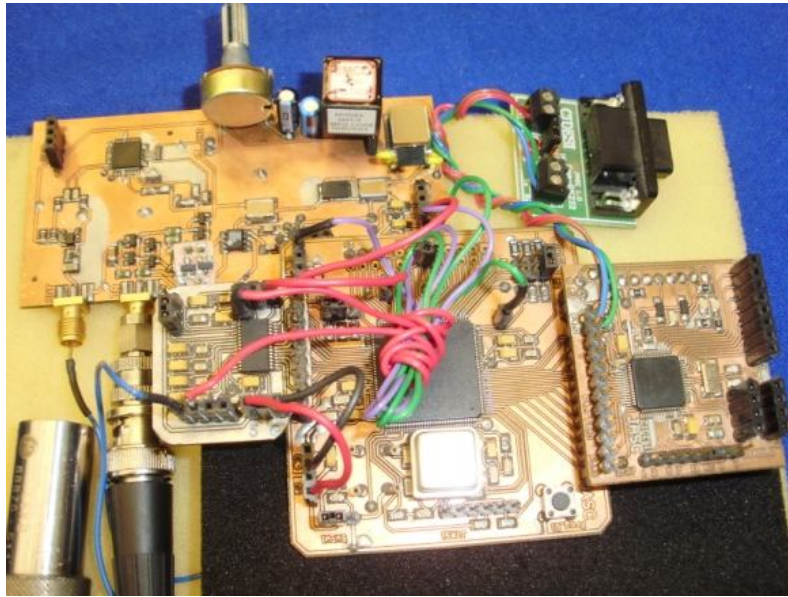


Figura 29. Prototipo preliminar.

En la Figura 30 se muestra el Top Layer que son las pistas de la parte de arriba de la tarjeta con sus respectivos componentes, en la Figura 31 se muestra el Bottom Layer que son las pistas de la parte de abajo de la tarjeta con sus respectivos componentes y son del prototipo final de ultrasonido para un canal.

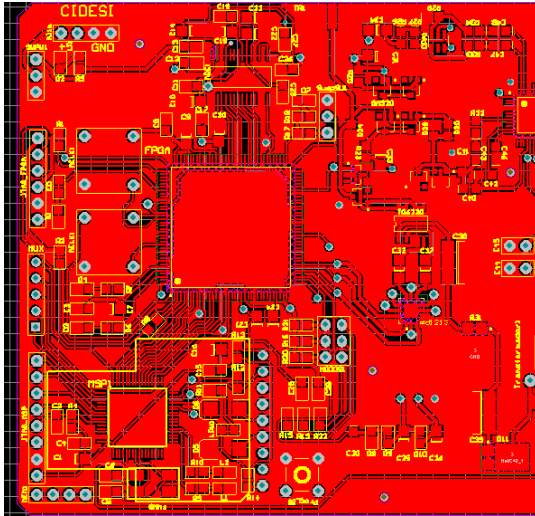


Figura 30. Top Layer.

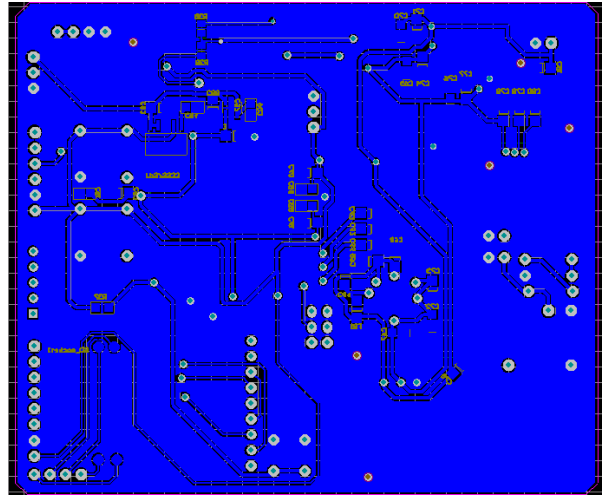


Figura 31. Bottom Layer.

3.7 Multiplexión de ocho canales

Uno de los objetivos de este trabajo es desarrollar un prototipo de medición de ocho canales, es por ello que se propone el siguiente diagrama a bloques para implementar un multiplexor.

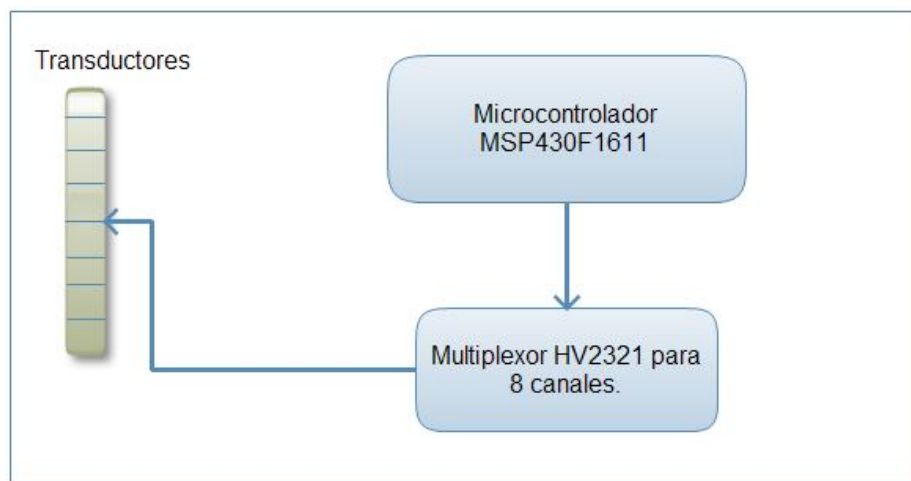


Figura 32. Diagrama a bloques del multiplexor.

El circuito multiplexor HV2321 de la marca Supertex, requiere una alimentación de 5Vcd y además dos voltajes de entrada adicionales (alto voltaje ya generado y 15Vcd), su función es realizar un “swicheo” entre los transductores, dicho multiplexor es para 8 canales, unipolar, de alto voltaje negativo, es un circuito integrado conmutador analógico, se destina para su uso en aplicaciones que requieren de alta tensión de conmutación, controlados por señales de control de baja tensión, sus aplicaciones son en ensayos no destructivos, detección de imágenes de ultrasonido médico, etc.

El control del multiplexor se hace con el Microcontrolador en las terminales Dout, CLR, LE, CLK y DIN. En la Figura 33 se muestra la secuencia que se debe de generar, donde se deben de cumplir dos cosas importantes. Primero es resetear al multiplexor, esto se hace cuando existe un pulso de CLR y en el mismo instante existe un pulso de CLK, con ello todos los canales se ponen en cero. La segunda parte es la selección de los canales, una vez que se resetea el multiplexor se selecciona el canal a leer, para ello debe existir un pulso en DIN y poco tiempo después un pulso en CLK en esos momentos se habilita el canal 1, para cambiar de canal DIN de ir a cero y cada cambio entre 0 y 1 lógico (0V y 3.3V) en CLK se habilitara un canal diferentes hasta llegar al canal 8, el tiempo mínimo para cambiar de canal debe ser de 5 μ s.

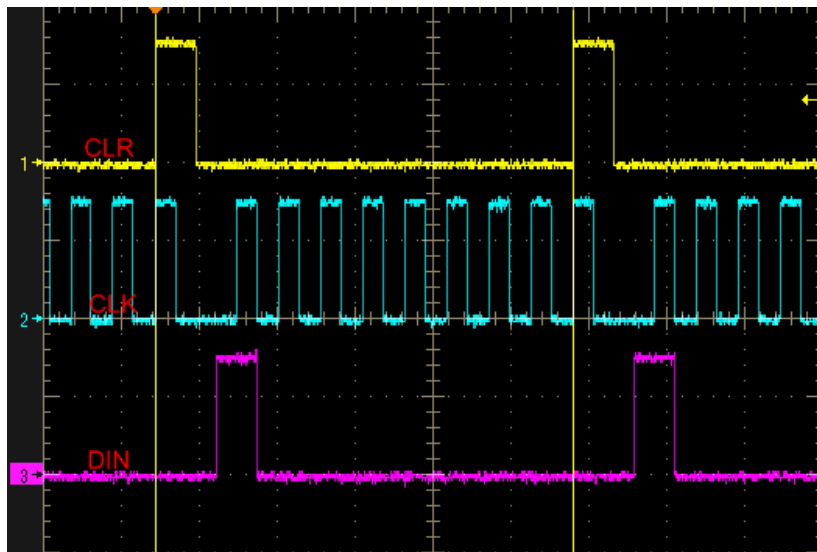


Figura 33. Señales de control para el multiplexor.

En el proceso anterior solo se selecciona un canal de inspección en diferente tiempo para excitar al transductor, pero el proceso de recepción y digitalización es el mismo para los ocho canales, en la Figura 34 su muestra el diseño esquemático y en la Figura 35 el diseño PCB que se desarrollo para el multiplexor.

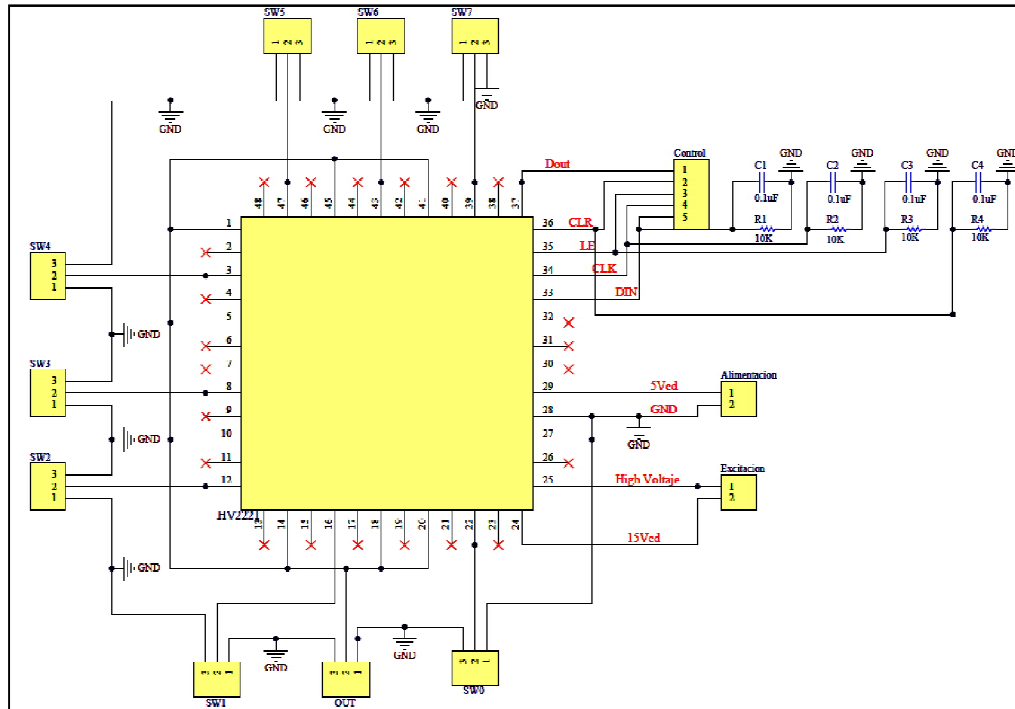


Figura 34. Diseño esquemático del circuito multiplexor.

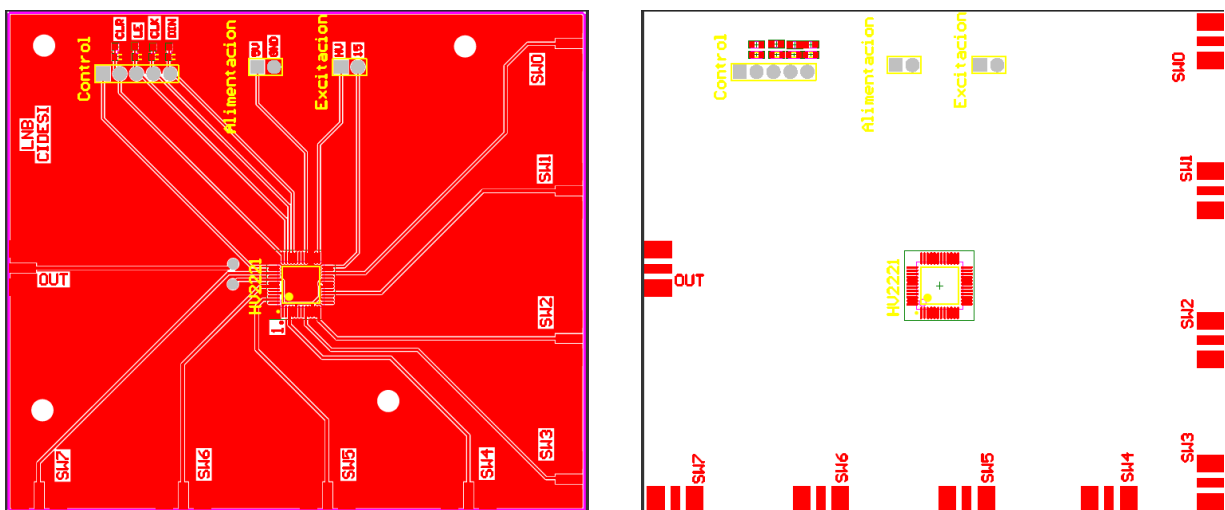


Figura 35. Diseño PCB del Multiplexor.

3.8 Contenido básico de un equipo de ultrasonido

Finalmente se generan las bases para el diseño y la construcción de un equipo de ultrasonido en el cual se tenga control total del hardware y software para adaptarlo y cumplir con los requerimientos de un diablo instrumentado que se está desarrollando en CIDESI.

Después de haber realizado el desarrollo de esta tesis se presenta la Figura 36 en la cual se muestran los componentes básicos que debe contener un equipo de ultrasonido, multicanal, partiendo de él se pueden agregar más características de desempeño o se puede modificar para otras aplicaciones.

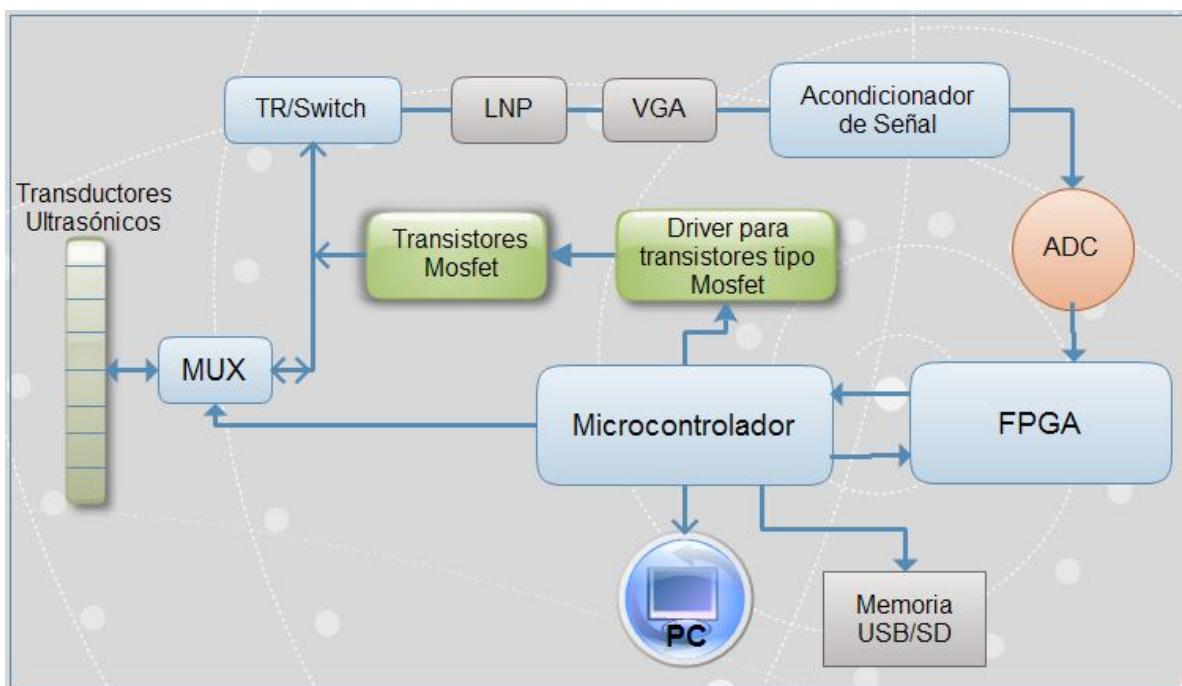


Figura 36. Arquitectura básica propuesta.

CAPÍTULO IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 Pruebas con prototipo desarrollado

En la Figura 37 se muestra el diagrama a bloques del prototipo de ultrasonido completo que fue desarrollado, el cual se alimenta con las siguientes fuentes:

1. Fuente de +5V 300mA.
2. Fuente de -5V 30mA.
3. Fuente de +24V 5mA.

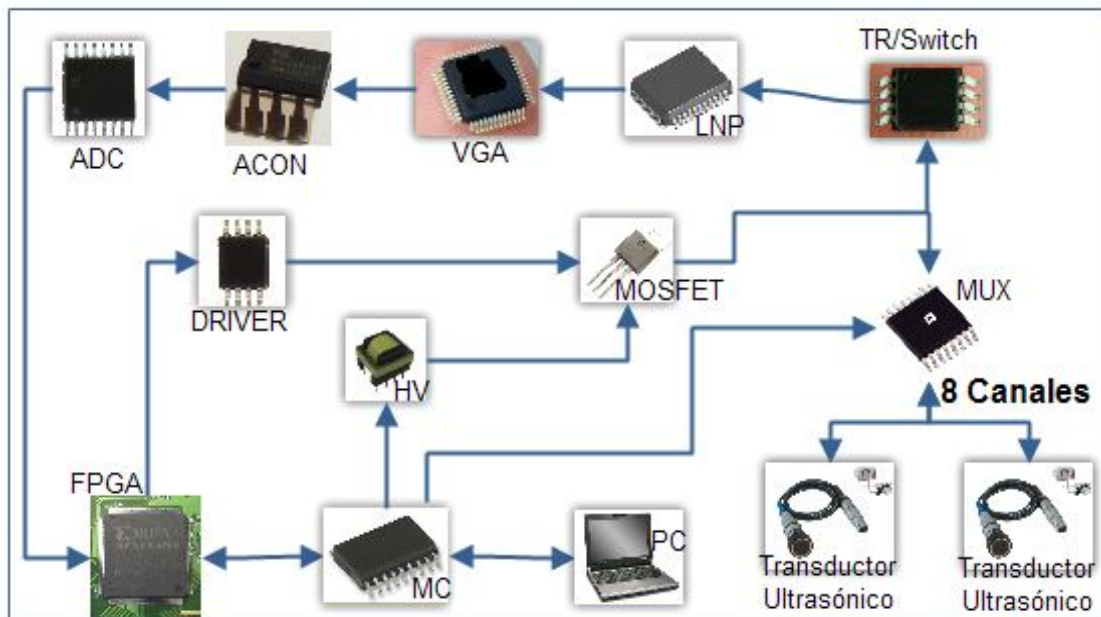


Figura 37. Prototipo final.

Los resultados que se presentan son experimentales, se tomaron en un patrón de acero 1020 escalonado de 6.35, 12.70, 19.05 y 20.54mm respectivamente, en cual se muestra en la Figura 38. La forma de como se realizó la medición del espesor fue por la técnica de contacto.

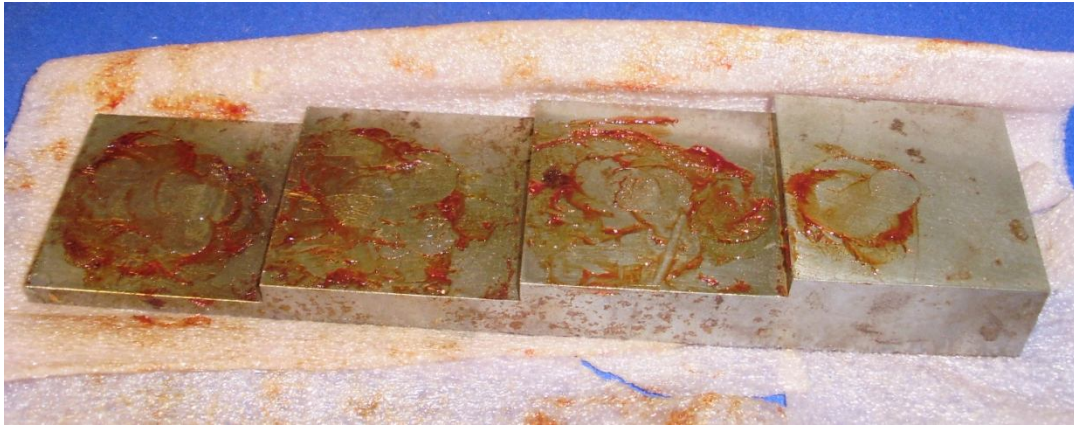


Figura 38. Patrón escalonado de acero 1020

Para visualizar la señal de ultrasonido se utiliza una interfaz desarrollada en LabView la cual se muestra en la Figura 39, que incluye dos funciones importantes, una es visualizar los datos y la otra es guardar la información para posteriormente analizarla en MatLab.

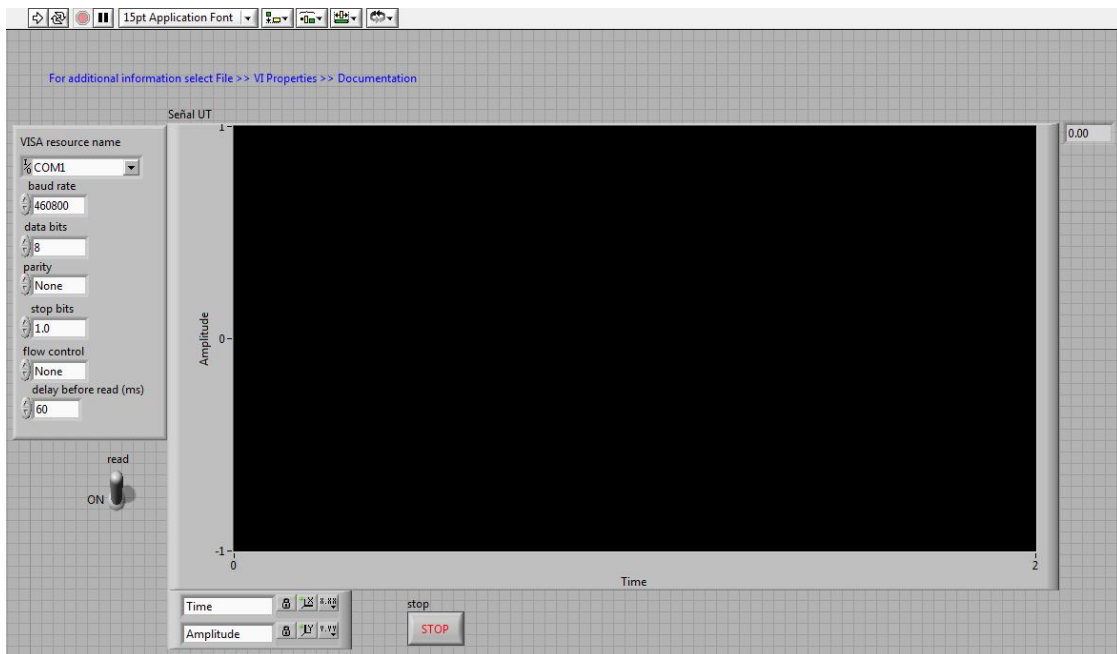


Figura 39. Interfaz en LabView.

Para poder verificar el buen funcionamiento del multiplexor se modifica la interfaz anterior (Figura 39), dado que en el laboratorio se cuentan con tres transductores completos, es decir, con sus conectores BNC y su cable de conexión, la interfaz se modifica para ver cuatro señales como se ve en la Figura 40, en el a) se muestran todas las señales de los transductores que se están utilizando, en el b) se muestra la señal de un transductor 2.25MHz, en el c) se muestra la señal de un transductor de 1.5MHz y en el d) se muestra la señal de un transductor de 5MHz. Por el momento esta nueva interfaz solo sirve para ver la señal del transductor, mas no para guardar la información. Cabe mencionar, que en el momento que se tengan los ocho transductores se pueden conectar todos para que trabajen en conjunto con su respectivo multiplexeo.

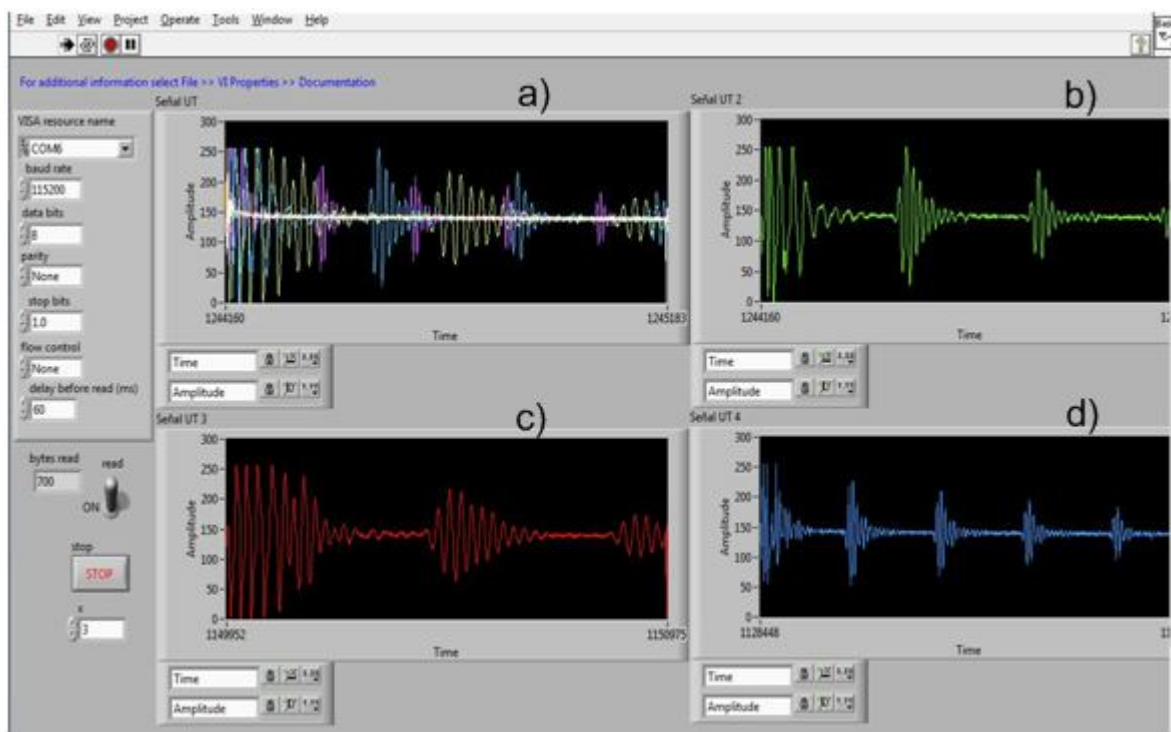


Figura 40. Interfaz para tres transductores.

En la Figura 41 se muestran cuatro señales adquiridas con el prototipo desarrollo, cada una de ellas en diferente espesor y con un transductor de 5MHz indicando el titulo de la figura.

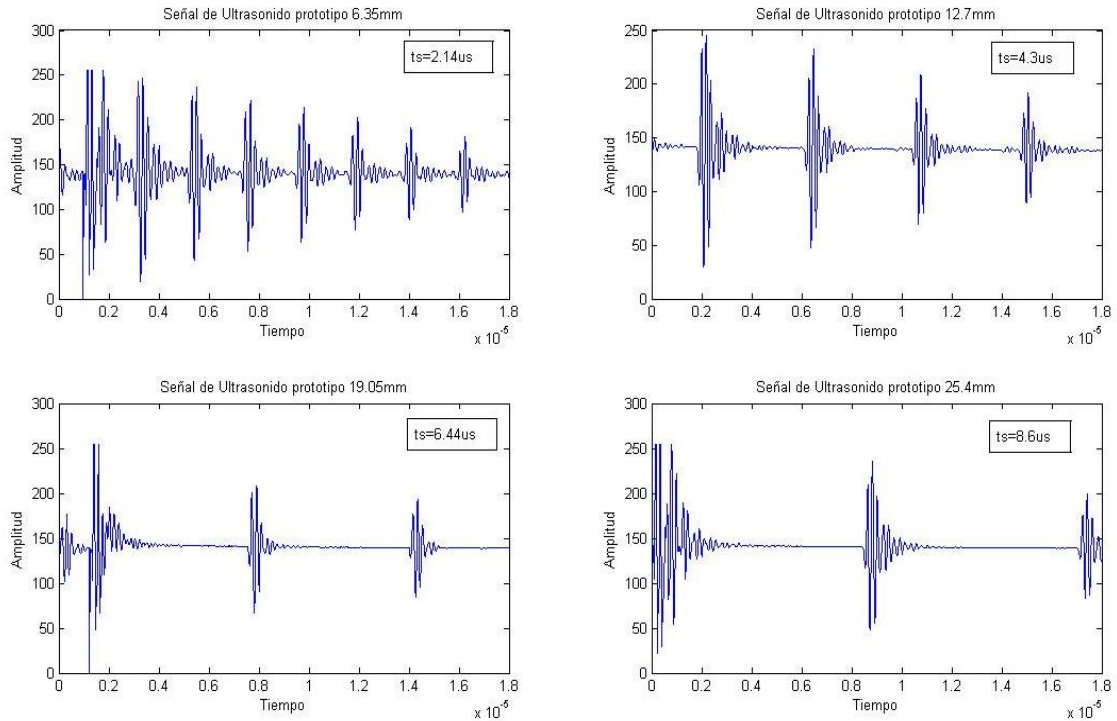


Figura 41. Señales del prototipo.

Hasta esta momento solo se ha visto la señal de respuesta del transductor, para poder determinar el espesor del material se adquirieron 30 señales de muestra (ver Tabla 7) para cada nivel de espesor del patrón, cada señal se guarda en la computadora para posteriormente visualizar los datos adquiridos con la ayuda de MATLAB y determinar el tiempo de vuelo (t_s).

Muestra	Espesor				Tiempo
	6.35mm (0.25")	12.7 mm (0.50")	19.05mm (0.75")	25.4mm (1.00")	
1	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
2	2.14	4.30	6.46	8.60	μs
3	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
4	2.14	4.30	6.46	8.58	μs
5	2.14	4.28	6.44	8.58	μs
6	2.14	4.30	6.46	8.58	μs
7	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
8	2.16	4.30	6.44	8.60	μs
9	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
10	2.14	4.28	6.44	8.58	μs
11	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
12	2.16	4.30	6.46	8.60	μs
13	2.16	4.28	6.44	8.60	μs
14	2.14	4.30	6.46	8.58	μs
15	2.14	4.28	6.44	8.58	μs
16	2.14	4.30	6.46	8.60	μs
17	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
18	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
19	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
20	2.16	4.30	6.44	8.60	μs
21	2.14	4.30	6.46	8.60	μs
22	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
23	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
24	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
25	2.14	4.30	6.44	8.58	μs
26	2.14	4.30	6.46	8.60	μs
27	2.16	4.30	6.44	8.60	μs
28	2.16	4.30	6.44	8.60	μs
29	2.16	4.30	6.44	8.60	μs
30	2.14	4.28	6.46	8.60	μs

Tabla 7. Tiempo de vuelo del prototipo desarrollado.

Observando los datos de la Tabla 7, se puede apreciar que el prototipo desarrollado es repetible para los diferentes niveles de espesor, y que se llega a tener un error de $0.02\mu\text{s}$, el cual corresponde a la resolución de la velocidad de muestreo, que es de 50MHz o $0.02\mu\text{s}$.

Por ejemplo, en algunos datos de la Tabla 7 se observa que existe una única diferencia entre los datos y es de 20ns los cuales corresponden al periodo de muestreo del ADC y considerando que $2.14\mu\text{s}$ corresponden a 6.31mm (0.2484 in), 20ns corresponderían a 0.05897mm (0.0023×10^{-3} in) que sería prácticamente la resolución y precisión que el prototipo presenta.

4.2 Pruebas con equipo comercial USB-UT350

El objetivo de realizar pruebas con un equipo comercial es para comparar los resultados entre el equipo comercial y el prototipo desarrollado, las pruebas realizadas fueron hechas en las mismas condiciones ambientales para los dos equipos (sistema comercial y prototipo), mismo transductor (5MHz) y mismo bloque escalonado. El equipo que se utiliza es un Pulse-Receiver con convertidor analógico digital que puede ser utilizado para múltiples aplicaciones, de la marca Ultratek, modelo USB-UT350, el cual se muestra en la Figura 42. Sus especificaciones son:

- ❖ Voltaje de alto impulso ajustable hasta 300V.
- ❖ Ancho de pulso ajustable hasta 500ns.
- ❖ Bajo ruido del receptor.
- ❖ Bajo ruido del emisor.
- ❖ Velocidad de conversión analógica alta (hasta 50MHz).
- ❖ Tiempo de reposición basado en la velocidad de adquisición.



Figura 42. Equipo comercial USB-UT350.

El equipo USB-UT350 incluye software para poder visualizar la señal de respuesta del transductor de ultrasonido, la cual se muestra en la Figura 43. En esta interfaz de igual manera se puede guardar los datos en la PC para posteriormente poder analizarlos en MatLab.



Figura 43. Software de adquisición del equipo USB-UT350.

En la Figura 44 se muestran cuatro señales adquiridas con el prototipo desarrollo, cada una de ellas en diferente espesor, el cual es indicado en el título de la figura.

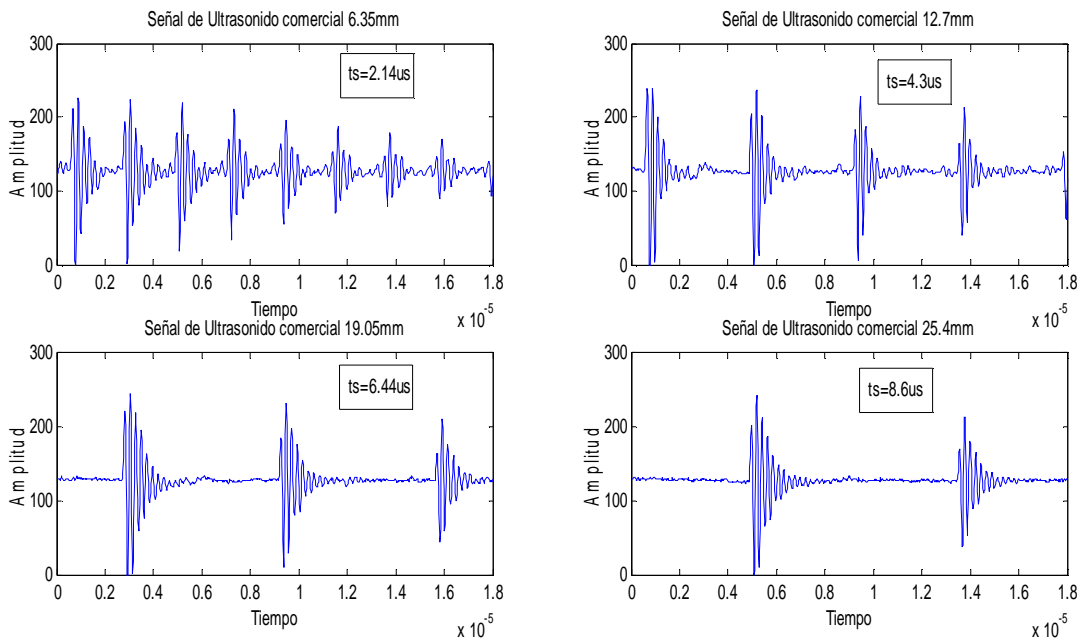


Figura 44. Señal de equipo comercial.

Para poder hacer una comparación entre los dos sistemas, se tomas treinta muestras en cada espesor con el equipo comercial y se guardan en la PC, el objetivo es visualizar los datos adquiridos con la ayuda de MATLAB y determinar el tiempo de vuelo (t_s), los datos se muestran en la Tabla 8.

Muestras	Espesor				Tiempo
	6.35mm (0.25")	12.7 mm (0.50")	19.05mm (0.75")	25.4mm (1.00")	
1	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
2	2.14	4.30	6.44	8.56	μs
3	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
4	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
5	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
6	2.16	4.30	6.42	8.60	μs
7	2.16	4.28	6.44	8.60	μs
8	2.14	4.30	6.46	8.60	μs
9	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
10	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
11	2.16	4.30	6.46	8.60	μs
12	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
13	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
14	2.14	4.30	6.44	8.58	μs
15	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
16	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
17	2.16	4.30	6.44	8.60	μs
18	2.16	4.30	6.44	8.60	μs
19	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
20	2.14	4.30	6.44	8.58	μs
21	2.14	4.28	6.44	8.60	μs
22	2.16	4.30	6.46	8.60	μs
23	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
24	2.14	4.30	6.46	8.58	μs
25	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
26	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
27	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
28	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
29	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
30	2.14	4.30	6.44	8.60	μs

Tabla 8. Tiempo de vuelo del equipo comercial.

Observando los datos de la Tabla 8, se puede apreciar que el equipo comercial es repetible para los diferentes niveles de espesor, tiene un error de $0.02\mu\text{s}$, el cual corresponde a la resolución de la velocidad de muestreo, que es de 50MHz o $0.02\mu\text{s}$.

Cabe hacer mención que el equipo comercial no especifica su precisión ni su exactitud del equipo, solo menciona sus especificaciones técnicas:

- Pulso de voltaje de 40V a 300V en 256 pasos.
- Ancho de pulso de 50ns a 500ns en incrementos de 20ns.
- Receptor de ganancia de 0 dB a 80 dB en incrementos de 0.1dB.
- Filtro de 0.6 MHz a 18MHz fija.
- Rectificación de forma de onda completa, rectificación + Media, Media-rectificación, o RF.
- Frecuencia de muestreo de 50MHz, 25MHz, 12,5MHz, 6.25MHz.
- Resolución de 8 bits (0 a 255).
- Fuente de disparo interna o el Software.
- Palpadores 1 a 10MHz.
- Conexión USB 2.0.
- 2 conectores BNC: Receptor y Receptor.
- Dimensiones 4.2 "x5.65" x1.55 "(107mm x 144mm x 40mm).
- Fuente de alimentación externa: 9V/1000mA o alimentación mediante el conector USB.

4.3 Comparación entre los dos sistema.

Con los datos obtenidos de los dos sistemas se puede afirmar que los dos están dentro de normatividad, tienen un comportamiento similar, en la Tabla 9 y en la Tabla 10 se muestran datos estadísticos del prototipo y del sistema comercial respectivamente.

	6.35mm (0.25")	12.7 mm (0.50")	19.05mm (0.75")	25.4mm (1.00")	Tiempo
Promedio	2.15	4.30	6.45	8.59	μs
Valor máximo	2.16	4.30	6.46	8.60	μs
Valor mínimo	2.14	4.28	6.44	8.58	μs
Moda	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
Desviación estándar	9.58927E-09	7.581E-09	9.3218E-09	9.5893E-09	

Tabla 9. Valores estadísticos del prototipo.

	6.35mm (0.25")	12.7 mm (0.50")	19.05mm (0.75")	25.4mm (1.00")	Tiempo
Promedio	2.15	4.30	6.44	8.60	μs
Valor máximo	2.16	4.30	6.46	8.60	μs
Valor mínimo	2.14	4.28	6.42	8.56	μs
Moda	2.14	4.30	6.44	8.60	μs
Desviación estándar	8.99553E-09	6.9149E-09	8.0516E-09	1.008E-08	

Tabla 10. Datos estadísticos del sistema comercial.

En las siguientes figuras se muestran dos señales de un mismo espesor pero adquiridas con el equipo comercial y con el prototipo respectivamente, donde se puede apreciar que las señales son muy parecidas en amplitud y en tiempo de vuelo, para los diferentes espesores del patrón de calibración.

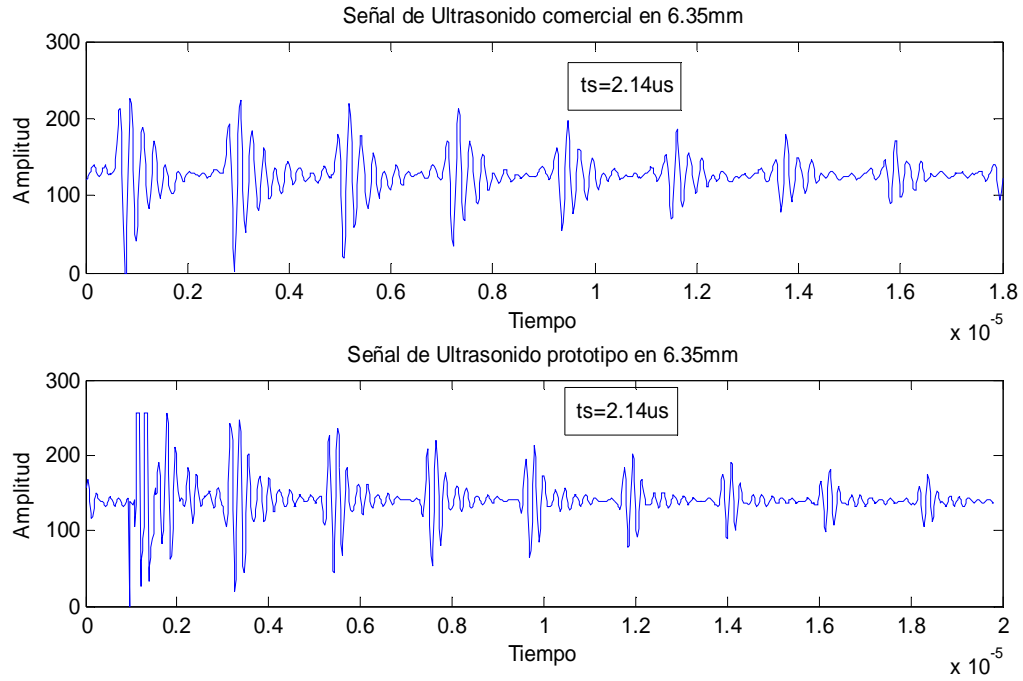


Figura 45. Prueba por contacto en 6.35mm.

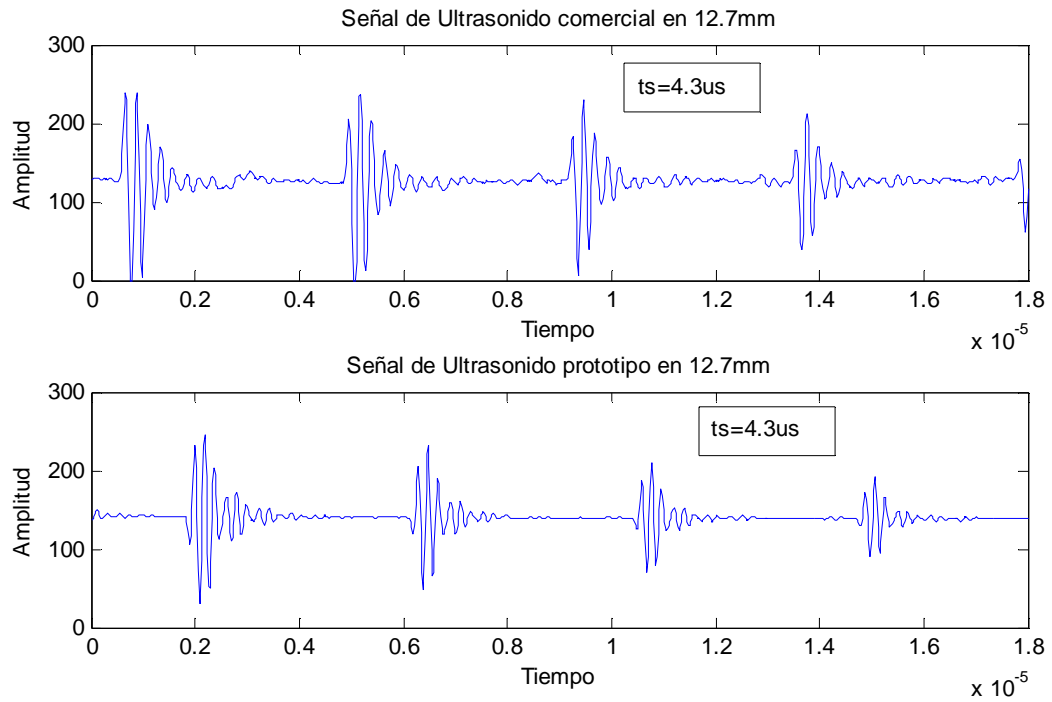


Figura 46. Prueba por contacto en 12.7mm.

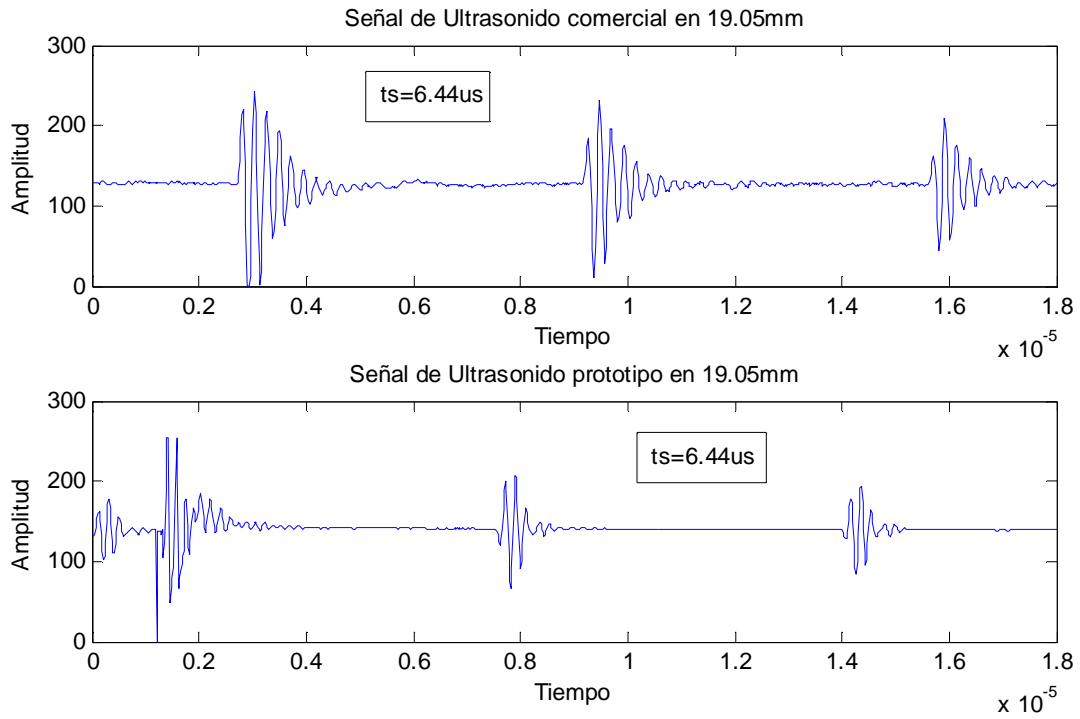


Figura 47. Prueba por contacto en 19.05mm.

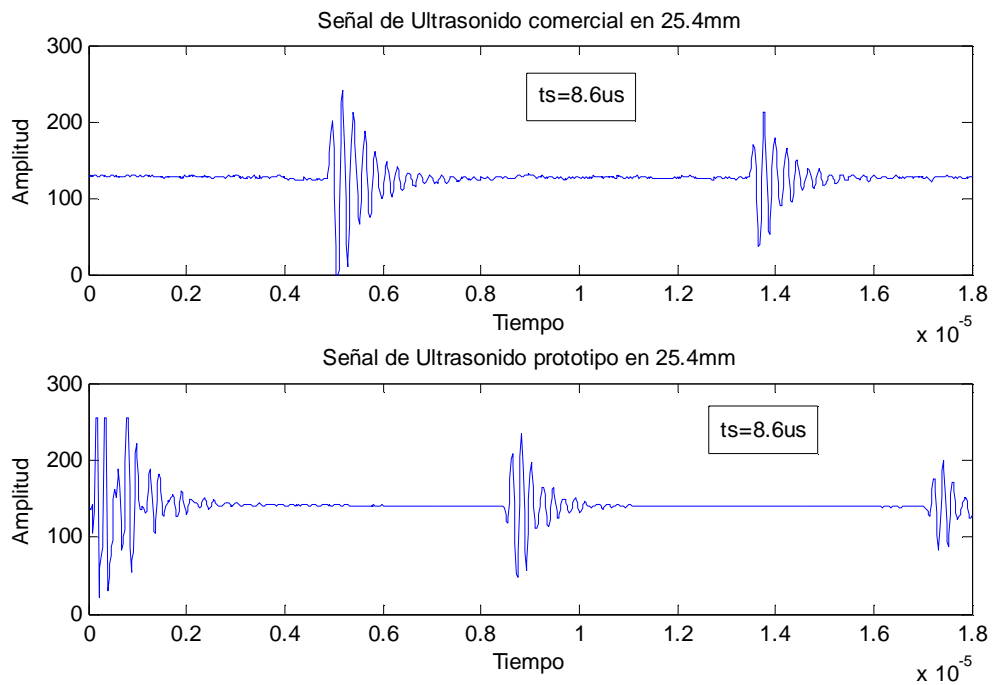


Figura 48. Prueba por contacto en 25.4mm.

4.4 Pruebas en Inmersión

Dado que el objetivo de este proyecto es desarrollar un prototipo para la medición de espesores usando un diablo instrumentado, se realizaron algunas pruebas en inmersión para verificar su comportamiento. Su comportamiento es igual que al de la técnica por contacto y es igual tanto para el sistema comercial como para el prototipo desarrollado. En la Figura 49, Figura 50, Figura 51 y Figura 52 se muestran las imágenes de las señales del transductor dentro del agua en los diferentes espesores del patrón de calibración, con el sistema comercial y el prototipo desarrollado.

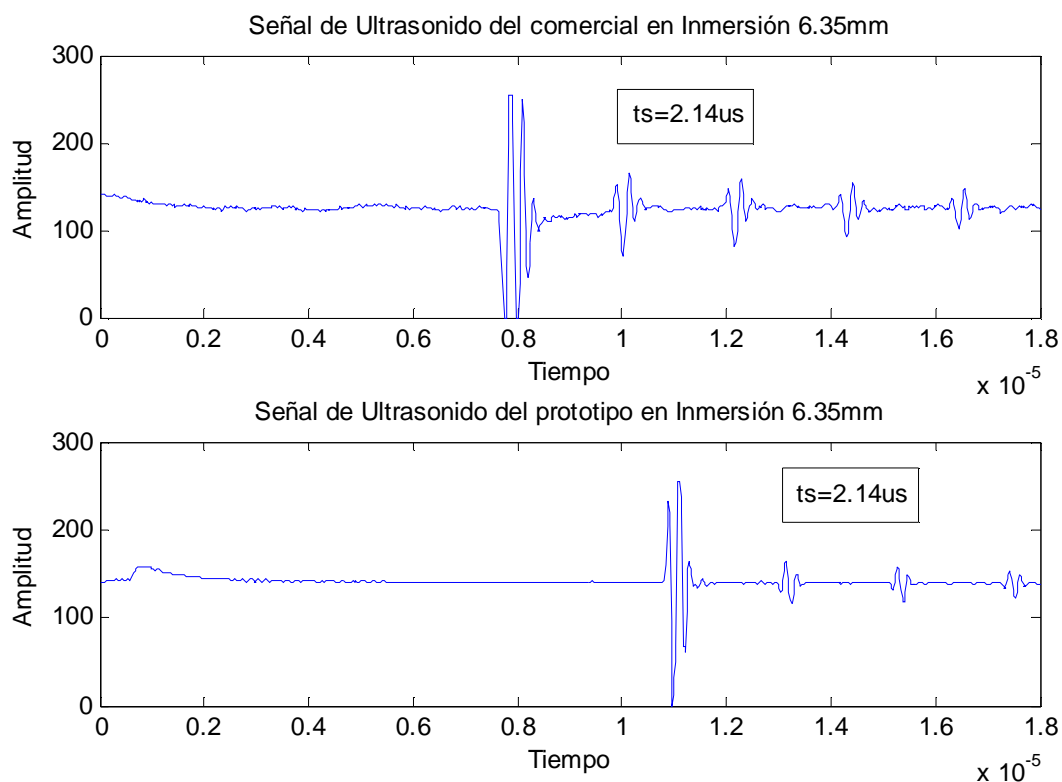


Figura 49. Prueba por Inmersión en 6.35mm.

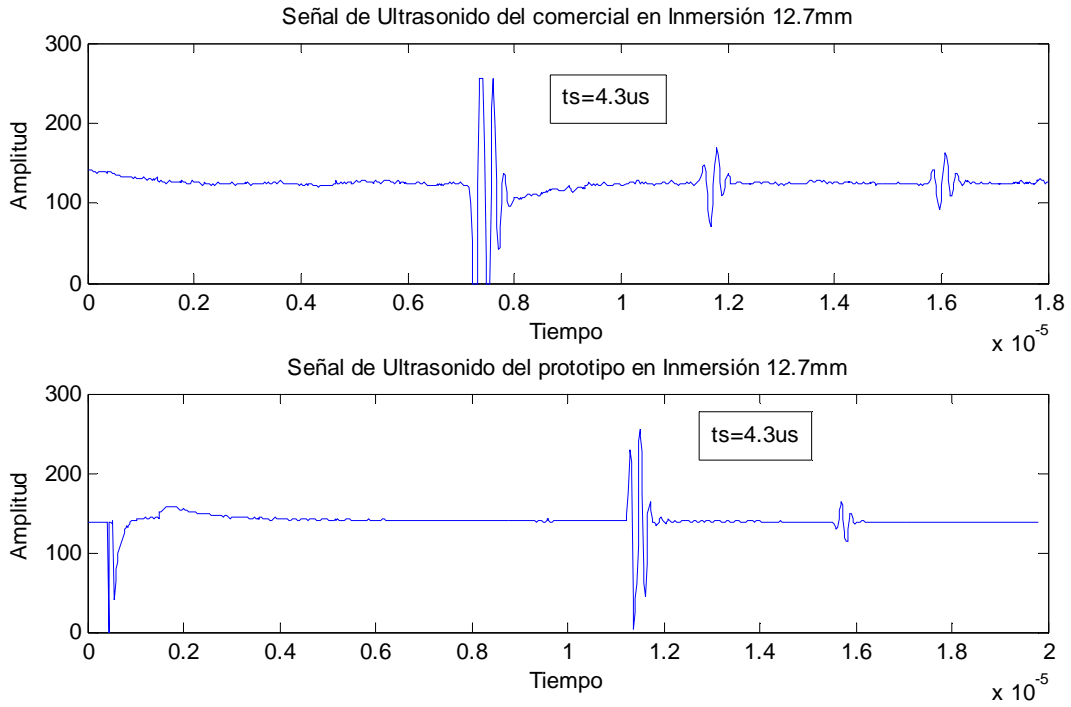


Figura 50. Prueba por Inmersión en 12.7mm.

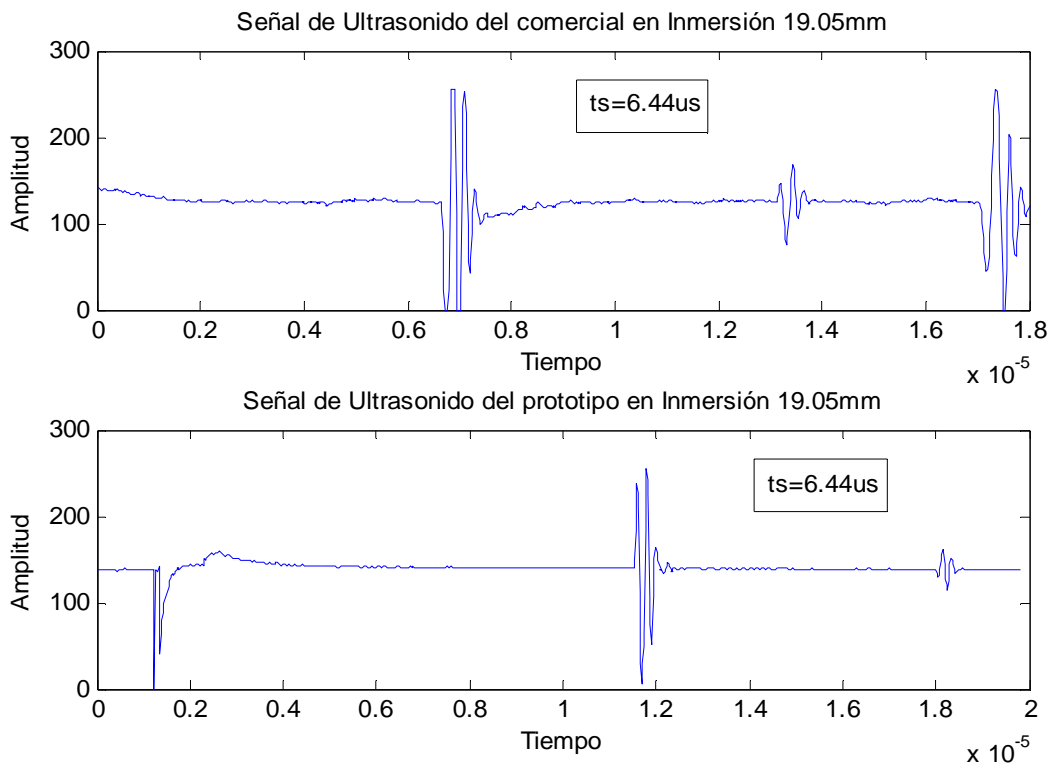


Figura 51. Prueba por Inmersión en 19.05mm.

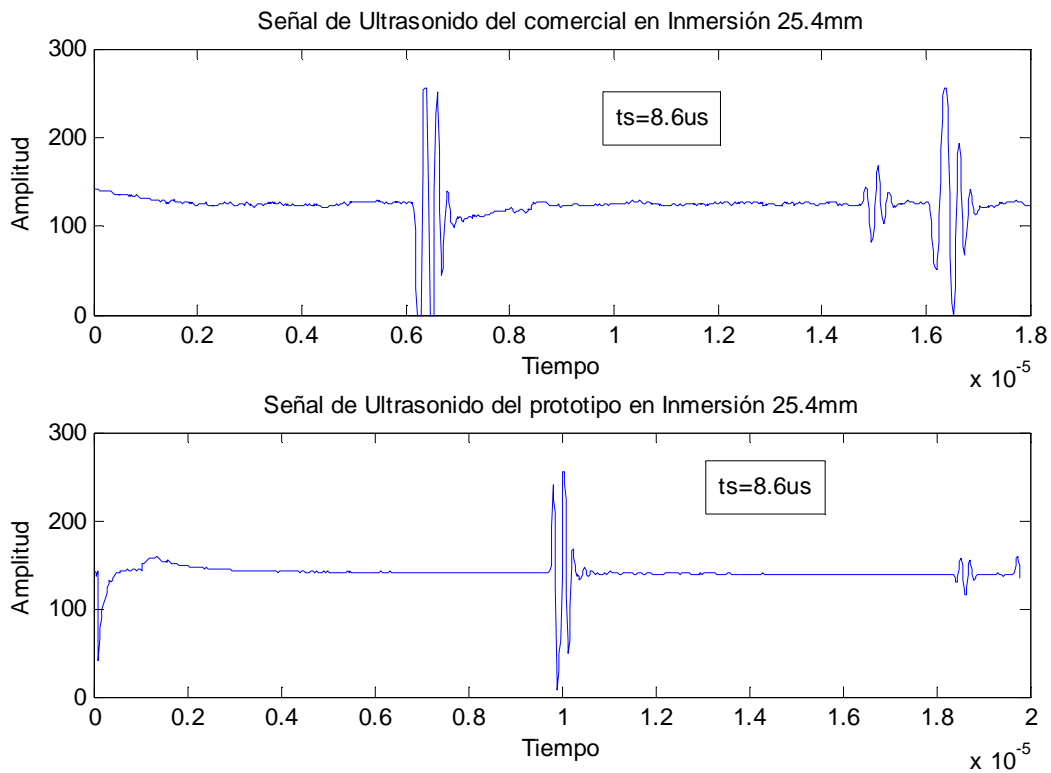


Figura 52. Prueba por Inmersión en 25.4mm.

4.5 Resultados del prototipo desarrollado

Las especificaciones técnicas que contiene el prototipo desarrollado son las siguientes:

- Pulso de voltaje de 0V a 200V en 256 pasos.
- Ancho de pulso de 100ns.
- Frecuencia de muestreo de 50MHz.
- Resolución de 8 bits (0 a 255).
- Palpadores 1 a 5MHz.
- Conexión RS232.
- 1 conector BNC.
- Ganancia de 5 a 70 dB.

- Lectura de 8 canales.
- Dimensiones 94.79mm x 80.34mm.
- Fuente de alimentación externa.

Para poder iniciar a calcular el espesor del material primero se tiene que calibrar el prototipo, en base a los datos de la Tabla 7, primero se calcula la velocidad del sonido en el material con la ecuación 2:

$$C_c = \frac{2 T}{t_{s_{mayor}} - t_{s_{menor}}} \quad (2)$$

$$C_c = \frac{2 (6.35mm)}{8.6\mu s - 2.14\mu s} = 5897.832817 \text{ mm}/\mu s$$

Posteriormente se calcula el tiempo de vuelo que se debe tener y para ello se utiliza la ecuación 3:

$$t_{s_{menor_c}} = \frac{2 T}{C_c} \quad (3)$$

$$t_{s_{menor_c}} = \frac{2 (6.35mm)}{5897.832817 \text{ mm}/\mu s} = 2.1533\mu s$$

Finalmente se calcula el factor de calibración con la ecuación 4:

$$f_c = |t_{s_{menor}} - t_{s_{menor_c}}| \quad \acute{o} \quad (4)$$

$$f_c = |2.14\mu s - 2.1533\mu s|$$

$$f_c = 0.0133\mu s$$

Utilizando cada tiempo de vuelo de la Tabla 7 y aplicándolos en la ecuación 5, se obtienen los datos de los espesores, finalmente en la Tabla 11 se muestran los datos obtenidos.

Muestras	Espesor				Milímetros
	6.35mm (0.25")	12.7 mm (0.50")	19.05mm (0.75")	25.4mm (1.00")	
1	6.3500	12.7197	19.0303	25.4000	mm
2	6.3500	12.7197	19.0893	25.4000	mm
3	6.3500	12.7197	19.0303	25.4000	mm
4	6.3500	12.7197	19.0893	25.3410	mm
5	6.3500	12.6607	19.0303	25.3410	mm
6	6.3500	12.7197	19.0893	25.3410	mm
7	6.3500	12.7197	19.0303	25.4000	mm
8	6.4090	12.7197	19.0303	25.4000	mm
9	6.4090	12.7197	19.0303	25.3410	mm
10	6.3500	12.6607	19.0303	25.3410	mm
11	6.3500	12.7197	19.0303	25.4000	mm
12	6.4090	12.7197	19.0893	25.4000	mm
13	6.4090	12.6607	19.0303	25.4000	mm
14	6.3500	12.7197	19.0893	25.3410	mm
15	6.3500	12.6607	19.0303	25.3410	mm
16	6.3500	12.7197	19.0893	25.4000	mm
17	6.3500	12.7197	19.0303	25.4000	mm
18	6.4090	12.7197	19.0303	25.3410	mm
19	6.3500	12.7197	19.0303	25.4000	mm
20	6.4090	12.7197	19.0303	25.4000	mm
21	6.3500	12.7197	19.0893	25.4000	mm
22	6.3500	12.7197	19.0303	25.4000	mm
23	6.3500	12.7197	19.0303	25.4000	mm
24	6.4090	12.7197	19.0303	25.3410	mm
25	6.3500	12.7197	19.0303	25.3410	mm
26	6.3500	12.7197	19.0893	25.4000	mm
27	6.4090	12.7197	19.0303	25.4000	mm
28	6.4090	12.7197	19.0303	25.4000	mm
29	6.4090	12.7197	19.0303	25.4000	mm
30	6.3500	12.6607	19.0893	25.4000	mm

Tabla 11. Calculo de espesores para el prototipo desarrollado.

Considerando los datos de la Tabla 11, se obtiene el promedio, incertidumbre, precisión y exactitud de cada espesor para el prototipo desarrollado, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 12, donde se puede observar que de acuerdo a las especificaciones de Pemex NRF-060-PEMEX-2006 el requerimiento de precisión es alcanzado con un margen amplio.

Espesor (mm)	Promedio (mm)	Incertidumbre (mm)	Precisión (mm)	Exactitud (mm)
6.35	6.36966	± 0.02828833	± 0.03931	0.01966
12.7	12.7098	± 0.02236389	± 0.0491	0.0098
19.05	19.0480	± 0.0274994	± 0.0413	0.002
25.4	25.3803	± 0.02828833	± 0.0393	0.0197

Tabla 12. Precisión y exactitud del prototipo.

En la Figura 53 se muestra el prototipo final para un canal donde se integran todos los bloques en una sola tarjeta electrónica y en la Figura 54 se muestra el prototipo para la lectura de ocho canales.

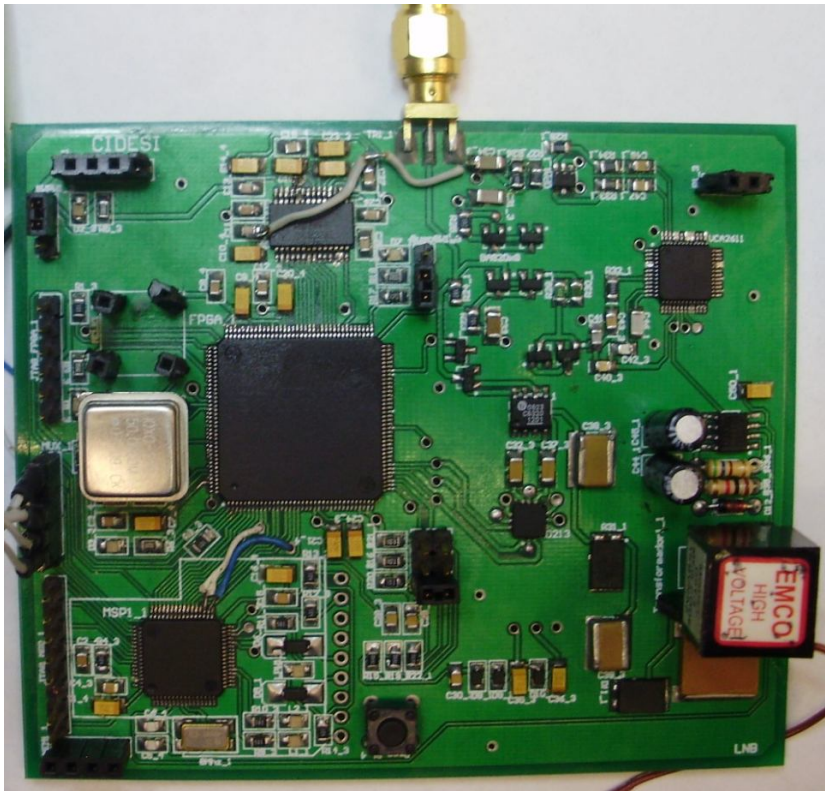


Figura 53. Prototipo final.

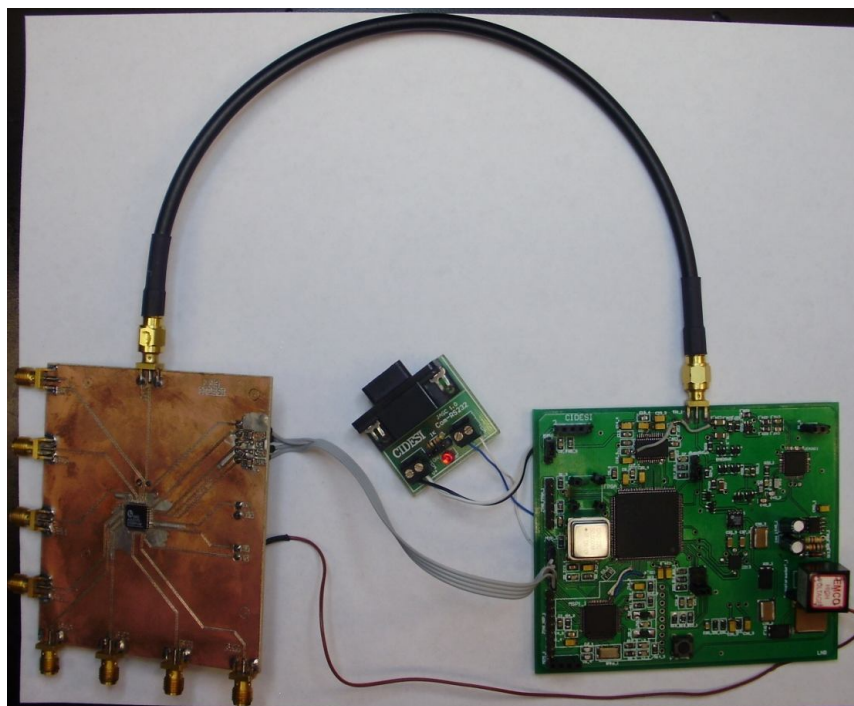


Figura 54. Prototipo final con multiplexor.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.

5.1 Conclusiones

Considerando los resultados obtenidos se puede concluir que el prototipo cumple perfectamente con las especificaciones necesarias en cuanto a precisión y exactitud de la medición de espesores, con respecto a la norma de Pemex. Se puede afirmar que el prototipo funciona tanto para la técnica de contacto como para la técnica de inmersión y se comporta de igual manera en las dos técnicas de medición, incluyendo la multiplexión de los 8 canales.

Considerando la comparación que se hace con un equipo comercial se afirma que el prototipo presentado es igual de confiable que un equipo comercial y esto se debe principalmente a que la resolución de los equipos está dada por la resolución de la velocidad de muestreo que en ambos casos es de 50MHz.

Una de las ventajas que se tiene con este desarrollo es que el diseño electrónico se puede adaptar al espacio requerido, es decir, cuando se tenga físicamente el diablo instrumentado las tarjetas se podrán adaptar al espacio destinado para la electrónica de los transductores.

Por otro lado se observa y se da una mejor idea al lector de cómo se constituye electrónicamente un equipo de ultrasonido. Inicialmente no es una tarea sencilla desarrollar un equipo de ultrasonido, pero infiriendo en el comportamiento del ultrasonido, utilizando componentes electrónicos adecuados y con algo de conocimientos en electrónica se demostró que es posible desarrollar un prototipo, y que realizando algunas adecuaciones mínimas podría llegar a ser un equipo comercial.

5.2 Trabajo Futuro

Las adecuaciones futuras que se podrían hacer al prototipo desarrollado son las siguientes:

- ❖ Generar un voltaje de excitación para el transductor de ultrasonido de hasta 400V.
- ❖ Hacer la duración del pulso de alto voltaje variable, de 40ns a 200ns en intervalos de 20ns.
- ❖ Logar que el cambio de canal en canal sea menor a 5 μ s.
- ❖ Hacer un nuevo diseño de una sola tarjeta electrónica donde se incluya el multiplexor.
- ❖ Hacer el diseño de la tarjeta electrónica final con las medidas específicas para el diablo instrumentado.

Bibliografía

- [1] **Juárez Hernández, Gabriel, Sadovnychiy, Sergiy y Bulgakov, Igor.** SISTEMA DE CORRECCIÓN DE LAS COORDENADAS DEL INSTRUMENTO DE INSPECCIÓN "PIG" PARA CONSTRUIR UN PLANO TOPOGRÁFICO DE DUCTOS DE. Barcelona : s.n., 2002.
- [2] **Raj, Baldev, Rajendran, V y Palanichamy, P.** *Science and Technology of Ultrasonics*. India : Alpha Science International Ltd., 2004. 1-84265-066-1.
- [3] **R. Cole, Christopher, Geoffrey, C. y Fernald., E.** *Ultrasound Beamformation Integrated Circuit and Method*. Patente # 970025 United States of America, 19 de Octubre de 1999.
- [4] **A, Brown J. y R., Lockwood G.** *A low-cost, high-performance pulse generator for ultrasound imaging* 6, s.l. : IEEE transactions on ultrasonics ferroelectrics and frequency control, 2002, Vol. 49. 848-851.
- [5] *Power Amplifier for Ultrasonic Transducer Excitation*. **Svilainis, L. y Motiejūnas., G.** 2006. 1392-2114. Artículo.
- [6] **Kondo, M., Kobayashi, M. y Karashima, M.** *Ultrasonic Corrosion Inspection of Crude Oil Pipeline*. 1999. 525. Artículo.
- [7] Technical Notes of Olympus of the Ultrasonic principles important to transducer application and design.
- [8] <http://www.ob-ultrasound.net/sokolov.html>.
- [9] **Núñez Alcocer, Jose.** Ultrasonido Industrial Nivel 1. Curso de certificación.
- [10] **Odom, Bill.** *Ultrasound Analog*. s.l. : Analog Devices, 1999. 33-5.
- [11] <http://focus.ti.com/docs/solution/folders/print/346.html>.
- [12] **L. Boylestad, Robert y Nashelsky, Louis.** *Electronica: Teoría de Circuitos*. Mexico: Pearson Educación, 1997. 0 13 375734 X.
- [13] IPC2221 " Generic Standard on Printed Board Desing ". Febrero 1998. ANSI/IPC2221.
- [14] *El Ultrasonido y su Aplicacion*. **Santos de la Cruz, Eulogio, y otros.** 001, Peru : Industrial Data, 2005, Vol. 8. 1810-9993.

- [15] **Brunner, Eberhard.** How Ultrasound System Considerations Influence Front-End Component Choice. s.l. : Analog Devices, 2002. 36-03.
- [16] **Echevarria, Ricardo.** Ultrasonido. s.l. : Universidad Nacional de Comahue , 2002.
- [17] **J, J. Szilard.** *Ultrasonic Testing*. New York : John Wiley & Sons, 1982. 0-471-27938-2.

Anexos

Anexo 1: Norma de Pemex NRF-060-PEMEX-2006

 <p>COMITÉ DE NORMALIZACIÓN DE PETRÓLEOS MEXICANOS Y ORGANISMOS SUBSIDIARIOS</p>	<p>INSPECCIÓN DE DUCTOS DE TRANSPORTE MEDIANTE EQUIPOS INSTRUMENTADOS</p>	<p>No. de Documento NRF-060-PEMEX-2006</p> <p>Rev.: 0</p> <p>Página 4 de 21</p>
--	--	--

0.- INTRODUCCIÓN.

El transporte de hidrocarburos a través de ductos plantea un reto para su mantenimiento, las herramientas de inspección en línea comúnmente conocidas como diablos inteligentes, constituyen una eficaz respuesta para obtener la información pormenorizada del estado físico del ducto, y que precisamente integra la información básica para elaborar los programas de rehabilitación.

Conforme la tecnología electrónica avanza los diablos de inspección han evolucionado para brindar una mejor resolución en la localización y en las características de los daños y defectos. Ya sea empleando las tecnologías de fuga o dispersión de flujo magnético de primera generación hasta las de alta resolución, así como las de ultrasonido, estas herramientas constituyen el único método disponible para la inspección simultánea de las superficies internas y externas de un ducto en toda su extensión y toda su circunferencia.

Las metas de la inspección realizada a intervalos regulares a un ducto en operación, son las de mantener la seguridad operativa del mismo. Dicha inspección nos permite obtener datos que redundan en; confiabilidad, integridad, seguridad operativa, conocimiento y control de la velocidad de corrosión.

Este documento normativo se realizó en atención y cumplimiento a:

- La ley Federal sobre Metrología y Normalización.
- Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas y su Reglamento.
- Guía para la emisión de Normas de Referencia de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios.

Participaron en su elaboración: Organismos Subsidiarios de Petróleos Mexicanos e Instituciones que se indican a continuación:

Pemex Exploración y Producción (PEP)
Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB)
Pemex Petroquímica (PP)
Pemex Refinación (PREF)
Petróleos Mexicanos

1.- OBJETIVO.

Establecer los requisitos a cumplir en la utilización de equipos instrumentados en la inspección de ductos.

2.- ALCANCE.

Esta norma establece los requisitos para la contratación del servicio de inspección por medio de equipos instrumentados que se realicen en los sistemas de ductos para transporte de hidrocarburos líquidos ó gaseosos.

3.- CAMPO DE APLICACIÓN.

Esta Norma de referencia es de aplicación general y observancia obligatoria en la contratación de los servicios de inspección interior con equipo instrumentado que realicen o pretendan realizar los centros de trabajo de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios. Por lo que dicha Norma debe ser incluida en los procedimientos de Contratación: Licitación Pública, Invitación a cuando menos tres personas o Adjudicación Directa, como parte de los requisitos que deben cumplir el licitante y/o contratista.

4.- ACTUALIZACIÓN.

Las sugerencias para mantener actualizada esta Norma de Referencia, deben enviarse al Secretario Técnico de Normalización de PEMEX Refinación, quién debe analizar, programar y realizar la actualización de acuerdo a lo precedente. Sin embargo, esta Norma se debe revisarse y actualizarse, por lo menos, cada 5 años, o antes si las sugerencias o recomendaciones de cambio en cualquiera de los elementos involucradas lo ameritan. La Norma debe revisarse para refrendar su aplicación, efectos y observancia, cuando menos una vez cada cinco años o en periodos más cortos cuando así se requiera y sea precedente con base en el análisis del CNPMOS.

 <p>COMITÉ DE NORMALIZACIÓN DE PETRÓLEOS MEXICANOS Y ORGANISMOS SUBSIDIARIOS</p>	<p>INSPECCIÓN DE DUCTOS DE TRANSPORTE MEDIANTE EQUIPOS INSTRUMENTADOS</p>	<p>No. de Documento NRF-060-PEMEX-2006</p> <p>Rev.: 0</p> <p>Página 5 de 21</p>
--	---	--

Las propuestas y sugerencias deben dirigirse por escrito a:

PEMEX Refinación
Subcomité Técnico de Normalización.
Avenida Marina Nacional # 329, 2° Piso Edificio. B-2
Col. Huasteca México D.F.
C.P. 11311.
Tel Directo: 19 44 86 28 ó 19 44 80 41.
Conmutador 19 44 25 00 est. 53107

5.- REFERENCIAS.

Esta Norma se fundamenta y complementa con las Normas de Referencia indicadas en este documento, todas ellas en su edición más reciente y vigente.

NRF-030-PEMEX-2003 Diseño, Construcción, Inspección y Mantenimiento de Ductos Terrestres para el Transporte y Recolección de Hidrocarburos

6.- DEFINICIONES Y TERMINOLOGÍA.

Para propósitos de esta Norma se establecen las definiciones siguientes:

Anomalía.-Cualquier daño mecánico defecto o condiciones externas que puedan poner o no en riesgo la integridad del ducto

Arrancadura. Perdida metálica sobre la pared exterior del ducto causado por el golpe de un objeto agudo.

Abolladura. Depresión en la superficie del tubo

Campo Magnético. Campo de fuerzas de atracción ferrometálica creado por magnetos o imanes

Contacto metálico. Material metálico en contacto con la pared del tubo

Corrosión. Es el proceso de naturaleza electroquímica, por medio del cual los metales refinados tienden a formar compuestos (óxidos, hidróxidos, por mencionar algunos) termodinámicamente estables debido a la interacción con el medio.

Defecto. Discontinuidad de magnitud suficiente para ser rechazada por las normas o especificaciones.

Diablo. Dispositivo mecánico con libertad de movimiento lineal que es insertado en el ducto en operación para realizar funciones de limpieza e inspección, en forma autónoma a lo largo de su trayectoria.

Diablo de Limpieza. Es un dispositivo mecánico que se utiliza para la remoción de sedimentos, depósitos de impurezas semisólidas adheridos a la superficie interior del ducto.

Diablo Geómetra. Dispositivo mecánico electrónico que se utiliza para la medición de las variaciones geométricas de la sección transversal a todo lo largo de la trayectoria del ducto.

 COMITÉ DE NORMALIZACIÓN DE PETRÓLEOS MEXICANOS Y ORGANISMOS SUBSIDIARIOS	INSPECCIÓN DE DUCTOS DE TRANSPORTE MEDIANTE EQUIPOS INSTRUMENTADOS	No. de Documento NRF-060-PEMEX-2006 Rev.: 0 Página 6 de 21
--	---	---

Diablo Simulador (Dummy). Equipo de peso y dimensiones similares a la del diablo instrumentado, su propósito es de verificar que las condiciones físicas y geométricas del ducto a inspeccionar tenga las características de libertad tales que permita el paso del equipo instrumentado en toda la trayectoria del ducto.

Diablo instrumentado. Dispositivo mecánico electrónico que permite la colecta de datos en todo el perímetro interno/externo y en la trayectoria total del ducto, inspecciona con procedimientos no destructivos la pared de la tubería para determinar el estado físico del mismo.

Diablo geoposicionador. Dispositivo mecánico electrónico que nos permite conocer la ubicación de la trayectoria del ducto en planta y perfil, mediante coordenadas geográficas, a través de un equipo de navegación inercial.

Equipo Geoposicionador. Dispositivo electrónico vinculado a satélites, capaz de establecer y ubicar coordenadas geográficas.

Fuga de Flujo Magnético. (Dispersión de flujo magnético) Es el principio mediante el cual se determinan las discontinuidades superficiales de un tubo y que permite establecer la presencia de anomalías por pérdidas metálicas internas o externas. Es el campo magnético que se separa o se regresa a determinada área como resultado de una discontinuidad o un cambio de sección.

Grieta. Discontinuidad que se presenta como una abertura perceptible a simple vista o con auxilio de Ensayos no destructivos.

Imperfección. Discontinuidad detectada por medio de técnicas no destructivas.

Inclusión no metálica. Elementos o compuestos químicos no metálicos que generan una discontinuidad en la masa del material base de la tubería.

Instalación superficial. Porción del ducto no enterrado utilizado en válvulas troncales, válvulas de seccionamiento entre otros.

Pateo. Maniobra operativa para dar inicio a la corrida del diablo (acción de enviar el diablo a través de la trampa de diablos)

Presión Máxima de Operación (MAOP). Es la presión máxima de operación a la que un ducto o segmento puede ser sometido, sin sufrir daños físicos estructurales.

Trampa de Diablos. Dispositivo utilizado para fines de envío ó recibo de diablo de inspección ó de limpieza, cuyas dimensiones características se especifican en el anexo "D" de la norma NRF-030-PEMEX-2003.

Ultrasonido. Es el principio de radiación mecánica en forma de pulsos u ondas de baja intensidad y alta frecuencia. Estos pulsos se generan mediante accesorios electromecánicos (tales como cristales piezométricos)

 COMITÉ DE NORMALIZACIÓN DE PETRÓLEOS MEXICANOS Y ORGANISMOS SUBSIDIARIOS	INSPECCIÓN DE DUCTOS DE TRANSPORTE MEDIANTE EQUIPOS INSTRUMENTADOS	No. de Documento NRF-060-PEMEX-2006 Rev.: 0 Página 7 de 21
--	---	---

7.- SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.

°C	Grados Celsius
CDPMOS	Comité de Ductos de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios
D	Diámetro Exterior Nominal del Tubo, en mm (Pulg)
D.N.	Diámetro Nominal
ERW	(Electric Resistance Welding) Soldadura por resistencia Eléctrica
GPS	Sistema de Posicionamiento Geográfico
HR	Alta Resolución
m	metro
MAOP	Presión máxima de operación permisible
MFL:	Fuga de flujo magnético
m/s	metro/segundo
SCC	Corrosión Bajo Esfuerzo
SR	Resolución estándar
t	Espesor de pared de diseño por presión interna en mm (pulg)

8.- DESARROLLO.

8.1. General.

PEMEX debe precisar en las bases de licitación los principales tipos de anomalías que se buscan con el servicio por contratar de conformidad con la lista indicada en los incisos a) a la h), la tecnología específica y las corridas suplementarias que se requieran para la inspección (de limpieza, de dimensionamiento ó de localización de los ductos).


Durante la visita de obra los representantes de PEMEX y licitantes, deben verificar que las dimensiones de las trampas de envío y recibo de diablos sean adecuadas para realizar los trabajos con seguridad operativa.

El prestador de servicio de Inspección debe detectar las siguientes anomalías:

- a) Pérdida de material base de la tubería, interna o externa, localizada
- b) Pérdida de material base de la tubería, interna o externa, generalizada
- c) Grietas
- d) Abolladuras
- e) Laminaciones
- f) Defectos de fabricación en la placa
- g) Instalaciones superficiales y sus accesorios
- h) Presencia de contactos metálicos

8.2. Limpieza antes de la corrida de inspección.

Con el propósito de optimizar la calidad de los resultados y de conocer la factibilidad de una inspección interior de los ductos en operación con equipos instrumentados, se debe realizar una o varias corridas de limpieza mecánica ó de ser necesario se deben realizar una o varias corridas de limpieza con productos químicos. Estas corridas deben ser efectuadas por el contratista que realice la inspección ó mediante la contratación del servicio para la limpieza.

 <p>COMITÉ DE NORMALIZACIÓN DE PETRÓLEOS MEXICANOS Y ORGANISMOS SUBSIDIARIOS</p>	<p>INSPECCIÓN DE DUCTOS DE TRANSPORTE MEDIANTE EQUIPOS INSTRUMENTADOS</p>	<p>No. de Documento NRF-060-PEMEX-2006</p> <p>Rev.: 0</p> <p>Página 8 de 21</p>
--	---	--

En cualquier caso, cuando sean requeridas en las bases de licitación, las corridas de limpieza deben cumplir con los requisitos siguientes:

- a) Los diablos a utilizar para llevar a cabo la limpieza interna de los ductos se deben seleccionar de acuerdo al tipo de producto que manejen éstos.
- b) El prestador de servicio debe proporcionar el equipo de limpieza, incluyendo los elementos necesarios de limpieza e impulso a utilizar (diablo), instrumentación para su localización considerando las condiciones operativas (presión y flujo), longitud del tramo del ducto, mismos que deben tener la aprobación técnica por parte de PEMEX
- c) Ambas partes tanto el prestador de servicio como el representante de PEMEX, determinaran el numero de corridas de limpieza necesarias para lograr un grado de limpieza que garantice las corrida del equipo instrumentado, considerando el volumen de sedimentos, tipo, turbidez, arrojados desde la primera corrida.

8.3. Corridas para determinar la ubicación de ductos.

Cuando sea especificado en las bases de licitación, el contratista debe realizar corridas para ubicar la trayectoria de los ductos por medio de equipo geoposicionador satelital. Este equipo proporciona datos relacionados con la trayectoria del ducto en tres dimensiones, en planta y perfil, presencia de curvas verticales y horizontales; coordenadas GPS de los puntos de control colocados sobre la trayectoria, coordenadas GPS de las instalaciones superficiales, coordenadas GPS a cada soldadura transversal, y coordenadas GPS de las anomalías detectadas por el equipo instrumentado.

8.4. Corridas de inspección.

Las corridas de inspección deben efectuarse tan pronto como sea posible a la terminación de la corrida de limpieza, de conformidad con los requisitos del numeral 8.4.3.4.

8.4.1. Tecnologías permitidas.

Sólo las tecnologías indicadas a continuación están permitidas para la realización de las inspecciones requeridas por esta Norma.

- a) Fuga de flujo magnético, (resolución estándar, alta resolución y flujo transversal)
- b) Ultrasonido (haz recto y haz angular)

8.4.2. Criterios de selección de equipos.

8.4.2.1. Fuga de Flujo Magnético

a) Primera generación

Fuga de Flujo Magnético, (resolución estándar) MFL (SR).- Detección limitada de pérdidas metálicas, no discrimina entre posición interna o externa, detecta envolventes metálicas y solapas, detección limitada en defectos relativos a la fabricación del tubo (laminación o inclusión), detección limitada en defectos tipo abolladura (confiabilidad reducida), detecta la presencia de soldadura transversal, presencia de contactos metálicos, accesorios de instalaciones superficiales.

Se utiliza en ductos que transportan hidrocarburos líquidos o gaseosos.

 <p>COMITÉ DE NORMALIZACIÓN DE PETRÓLEOS MEXICANOS Y ORGANISMOS SUBSIDIARIOS</p>	<p>INSPECCIÓN DE DUCTOS DE TRANSPORTE MEDIANTE EQUIPOS INSTRUMENTADOS</p>	<p>No. de Documento NRF-060-PEMEX-2006</p> <p>Rev.: 0</p> <p>Página 9 de 21</p>
--	---	--

b) Alta resolución

Fuga de Flujo Magnético, (alta resolución) MFL (HR).- Detecta y diferencia entre pérdida metálica interna y externa, detecta y dimensiona fisura circunferencial (probabilidad reducida de detección en grietas delgadas), abolladuras (detecta y dimensiona con reducida confiabilidad), detección de arrugas (no confiable), detecta y dimensiona arrancaduras, detección limitada en defectos de fabricación del tubo (laminación o inclusión), detecta envoltentes, solapas, presencia de soldadura transversal, presencia de accesorios de instalaciones superficiales, presencia de contactos metálicos, presencia de encamisados a la línea regular.

Se utiliza en ductos que transportan hidrocarburos líquidos o gaseosos.

c) Flujo transversal.

Fuga de flujo magnético transversal. (MFL-TRANSVERSE).- Detecta y diferencia entre pérdida metálica interna y externa, detecta y dimensiona corrosión axial de extensión reducida, detecta y dimensiona; grietas y defectos axiales estrechos, esfuerzo de rotura por corrosión, esfuerzo de fatiga, defectos en soldadura longitudinal, falta de fusión o fusión incompleta, puntos de fractura, grietas asociadas a la corrosión bajo tensión (stress corrosion cracking), detecta envoltentes y solapas adosadas al tubo, presencia de soldadura transversal, contactos metálicos, se obtiene información concisa de la anomalías existentes en el flujo transversal pero se pierde precisión en información de la anomalías existentes en el sentido longitudinal.

Se puede usar en ductos que transportan hidrocarburos líquidos o gaseosos.

8.4.2.2. Ultrasonido

a) Haz recto

Detecta y dimensiona corrosión interna y externa, corrosión axial de extensión reducida, arrancaduras, laminación, inclusiones no metálicas abolladuras, alabeo, torcedura si están en posición circunferencial, envoltentes solo las que están directamente soldadas al ducto, defectos relativos a la fabricación del tubo. Medición de espesores en forma directa, defectos adyacentes a soldadura, presencia de soldadura transversal y longitudinal, presencia de accesorios de instalaciones superficiales, detecta cambio de espesores

Tecnología utilizada únicamente en ambiente líquido o en ductos que transportan gas, mediante un acoplante líquido.

b) Haz angular

Detecta y dimensiona corrosión interna y externa, corrosión axial de extensión reducida, grietas y defectos axiales estrechos, esfuerzo de rotura por corrosión, esfuerzos de fatiga, defectos en soldadura longitudinal, fusión incompleta, falta de fusión, fisuras circunferencial, grietas, defectos longitudinales, colonias de agrietamientos asociadas al stress corrosion cracking, (corrosión bajo tensión), detecta abolladuras, alabeo torcedura si están en posición circunferencial, envoltentes solo las que están directamente soldadas al ducto, defectos relativos a la fabricación del tubo, medición de espesores, se obtiene información concisa de la anomalías existentes en el flujo transversal pero se pierde precisión en información de la anomalías existentes en el sentido longitudinal.

Tecnología utilizada únicamente en ambiente líquido o en ductos que transportan gas, mediante un acoplante líquido.

 <p>COMITÉ DE NORMALIZACIÓN DE PETRÓLEOS MEXICANOS Y ORGANISMOS SUBSIDIARIOS</p>	<p>INSPECCIÓN DE DUCTOS DE TRANSPORTE MEDIANTE EQUIPOS INSTRUMENTADOS</p>	<p>No. de Documento NRF-060-PEMEX-2006</p> <p>Rev.: 0</p> <p>Página 10 de 21</p>
--	---	---

8.4.3. Requisitos para los equipos.

8.4.3.1. Desplazamiento. Deben tener la capacidad para desplazarse en los ductos con los productos transportados en ellos y las configuraciones existentes (dobles, omegas, codos y deformaciones con una restricción máxima del 10% del diámetro nominal del ducto, por mencionar algunos.)

8.4.3.2. Localización. Deben disponer de un sistema de localización (emisor/receptor autónomo) con durabilidad mayor al tiempo que se estima para la corrida de diablo.

8.4.3.3. Capacidad. Tener capacidad para cubrir la circunferencia interna del ducto y de inspeccionar toda la trayectoria del mismo.

8.4.3.4. Inspección. Los equipos de inspección deben tener la capacidad de detección y grabación de las imperfecciones previstas en las bases de la licitación y operar satisfactoriamente dentro de los parámetros establecidos en el numeral 8.4.3.5., de acuerdo a la capacidad de la tecnología empleada y operar satisfactoriamente en un rango de velocidad, para flujo magnético entre 0.2 m/s. y 5 m/s. y para el ultrasonido entre 0.2 m/s y 2.0 m/s. El prestador de servicios debe contar con reguladores de velocidad cuando los rangos anteriores no puedan ser cumplidos.

8.4.3.5. Precisión. La precisión mínima requerida para los equipos propuestos por el contratista.

- **Equipo de flujo magnético de resolución estándar,** VER TABLA 1
- **Equipo de flujo magnético de alta resolución,** VER TABLA 2.
- **Equipo de flujo magnético transversal** VER TABLA 3.
- **Equipo de ultrasonido con haz recto** VER TABLA 4.
- **Equipo de ultrasonido con haz angular** VER TABLA 5.
- **Equipo Geómetra** VER TABLA 6.
- **Equipo Geoposicionamiento** VER TABLA 7

8.5. Requerimientos en el desarrollo de las corridas.

8.5.1. Procedimientos. Las actividades de corridas de diablos, calibración de equipo y evaluación de resultados obtenidos, deben realizarse con procedimientos escritos, propios del prestador de servicio y acordes a las normas de seguridad y requerimientos indicados por PEMEX. La calibración de los instrumentos y equipos de detección deben estar certificados por un organismo acreditado por la entidad mexicana de acreditación (EMA) y aprobados por PEMEX. La calibración de los equipos debe tener trazabilidad y contar con un informe emitido por un laboratorio certificado y de acuerdo con el apartado 8.8. El contratista debe incluirlos en su propuesta técnica.

8.5.2. El personal técnico de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios responsable de la corrida de diablos y el contratista, deben verificar, previo a las actividades que a continuación se describen, que se disponga del volumen suficiente de producto para efectuar las diferentes corridas.

8.5.3. Si durante la corrida de limpieza se detectan condiciones que puedan obstaculizar la realización de las inspecciones con equipo instrumentado (deformaciones en la geometría del ducto provocado por; derrumbes, inundaciones, explotación de bancos de material cercanos al derecho de vía), el contratista en conjunto con PEMEX deben analizar la conveniencia de realizar corridas con diablo geómetra.

 <p>COMITÉ DE NORMALIZACIÓN DE PETRÓLEOS MEXICANOS Y ORGANISMOS SUBSIDIARIOS</p>	<p>INSPECCIÓN DE DUCTOS DE TRANSPORTE MEDIANTE EQUIPOS INSTRUMENTADOS</p>	<p>No. de Documento NRF-060-PEMEX-2006</p> <p>Rev.: 0</p> <p>Página 20 de 21</p>
--	---	---

TABLA 4. ULTRASONIDO CON HAZ RECTO

Equipos de inspección por medio de ultrasonido con haz recto, utilizado para la obtención de datos para estudios de integridad y control de la velocidad de corrosión:

Radio de curvatura mínimo	1.5 x D / 90°
Máxima presión permisible	120 bar
Rango de temperatura permisible	0° C hasta + 40° C
Frecuencia del pulso de ultrasonido	De 2 a 5 MHz
Frecuencia de repetición de pulsos (FRP)	Hasta 600 Hz
Resolución en la medición del espesor de pared	0.2 mm
Precisión en la evaluación del espesor remanente	+/- 0.5 mm
Resolución circunferencial	+ / - 5° (0.3 pulg. / 8 mm.)
Resolución longitudinal	2.8 mm (a 0.85 m/s)
Precisión en la ubicación axial de defectos	+/- 0.2 m (desde soldadura de referencia)
Velocidad del equipo	0.2 a 2.0 m/s.

TABLA 5. ULTRASONIDO CON HAZ ANGULAR

Equipos de inspección por ultrasonido con haz angular, utilizado para la detección de agrietamientos por corrosión bajo esfuerzo:

Diámetro nominal de la herramienta	22" a 56" D.N.
Cobertura de la pared	100% (soldadura longitudinal y material base)
Alcance activo (varía con el tamaño de la herramienta)	Hasta 155 millas (250 km.)
Longitud mínima del defecto	1.1 pulg. 30 mm a una velocidad de 0.2 m/s 2.2 pulg. 60 mm a una velocidad de 2 m/s
Profundidad mínima del defecto	1 mm
Precisión de localización.- Axial	+ / - 7 , 8 pulg. + / - 20 cm. Con respecto a la junta soldada de referencia
Circunferencial	+ / - 5°

Development of an Ultrasonic Thickness Measurement Equipment Prototype

Nava-Balanzar Luciano

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)

lnava@cidesi.mx

Soto-Cajiga Jorge Alberto

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)

jsoto@cidesi.mx

Pedraza-Ortega Jesús Carlos, Ramos-Arreguin Juan Manuel

CIDIT-Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ)

caryoko@yahoo.com, jramos@mecamex.net

Abstract

The present work shows the development of both a pulse-receiver circuit and acquisition circuit prototypes of ultrasonic signals for the measurement of thickness in oil pipelines using a Pipeline Inspection Gauge (PIG). The development parameters count with restrictions of space, sampling velocity and storage capacity, and besides they have to satisfy the norms applied in oil pipeline inspection by the PIG. The prototypes consist of several functional blocks; a pulsed circuit that excites the transducer generating a high voltage pulse of about -200V, a receiver circuit for the reception of the transducer signal, a filter and amplifying block, and finally acquisition and processing step for signals composed by one ADC, a FPGA and a microcontroller.

1. Introduction

A PIG for pipeline inspection that use a beam ultrasound, requires of an ultrasonic equipment specially designed for this application, due to the fact that it has to be adapted to the physical space and more important, we must know its whole architecture to electronically manipulate the signals according with the necessities of the inspection.

Commercially, there are different commercial devices for the thickness measurement by means of ultrasonic technique, however, they are commercial equipments, whose size is predetermined, and their architecture is completely closed and protected. By other hand, it does not exist some references about how they are

electronically composed. Therefore, in this work and after of doing exhaustive bibliography investigation -considering several electronic components with different makers-, we propose a prototype of an ultrasound equipment, explains all the functional blocks of this equipment including their interaction.

The first step for the development of the prototype is to know the ultrasonic fundamentals [1]. As previous work, an integrated circuit where the digital transmission and reception in the wave of ultrasound is processed in the circuit [2], also, exist some works that use similar principles but none explaining its real architecture. In basic principles of ultrasound known that for the excitation of a transducer is necessary generate a negative voltage pulse [3], and with that obtain all information that has been inspected, to excite a transducer we use a power amplifier [4], all this can be found in bibliography, however, it does not specify how protect the receive circuit pulse of high voltage when we use a transducer with just one crystal.

The PIG that is developing initially counts with 100 straight beam transducers, the intention is detect the lost of material originated by corrosion, this paragraph explain how works a PIG and course how perform an inspection in oil pipeline [4]. In this way we can propose a methodology for the thickness measurement using ultrasound signals and with this justified the development of an own equipment.

Finally it is necessary to mention that the equipment developed is compact, versatile and the electronic circuits that are being used are newer in market.

2. Ultrasound Bases

Called ultrasound to sound generated above the human hearing range (typically 20KHz) [1]. However, the frequency range normally employed in ultrasonic nondestructive testing is 100KHz to 50MHz [6].

Although the ultrasound behaves in a similar manner to audible sound, it has a much shorter wavelength. This means it can be reflected off very small surfaces such as defects inside materials, it is this property that makes ultrasound useful for nondestructive testing of materials.

A transducer is any device that converts one form of energy to another and ultrasonic transducer converts electrical energy to mechanical energy in the form of sound and vice versa [1]. The real signal of a ultrasonic transducer is shown in the figure 1, the interesting information in that figure is the time fly (t_s) and it is determinate measuring the difference of time between echoes, the easier is using gates that measure the time in that occurs the first peak or edge of the reference echo and the next one, with this we determinate the metal thickness using the next formulate [6]:

$$T = \frac{ct_s}{2} \quad (1)$$

Where:

T = Material Thickness.

C =Sound speed inside the material.

t_s = Time of flight (TOF).

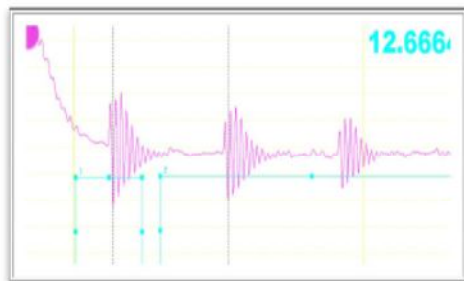


Figure 1. Ultrasound Real Signal

As a general rule all parametric ultrasonic transducers are designed for negative spike excitation [6]. The maximum spike excitation voltages should be limited to approximately 50 volts per mil of piezoelectric transducer thickness, the low frequency elements are thick, and high frequency elements are thin.

For this application we use an ultrasonic transducer of 5 MHz only with just one piezoelectric, it means that the same element transmit and receive the ultrasound signal.

3. Development

This development was made according with norm of PEMEX, NRF-060-PEMEX-2006, in the table 1 we can see the important characteristics for the development of this prototype. Besides, for the development we consider all the recommendations of the fabricators in the integrated circuits used.

Table 1 Characteristics which must be met according to regulations.

Minimum bend radius.	1.5 x D/90°
Maximum allowable pressure	120 bar
Permissible temperature range	0° C until +40° C
Ultrasound pulse frequency	De 2 a 5 MHz
Pulse repetition frequency (PRF)	Until 600 Hz
Wall thickness measurement resolution	0.2 mm
Evaluation precision of the remaining thickness	+/- 0.5 mm
Circumference resolution	+ / - 5° (0.3 pulg. / 8 mm)
Length resolution	2.8 mm (a 0.85 m/s)
Axial flaw location precision	+/- 0.2 m (from welding reference)
Equipment speed	0.2 a 2.0 m/s.

As previously mentioned, to excite an ultrasound transducer it is necessary to generate a negative voltage pulse, for that purpose a pulser circuit was developed and we present its diagram blocks on figure 2, this circuit is compound by a high speed dual driver designed for transistors MOSFET type, its alimention is about $\pm 5V_{cd}$, for its implementation requires a high speed digital signals in terminals OE, INA, INB, which are programmed inside the FPGA because it must change of a logic level to other as fast as 20ns, later the driver is connected to a integrated circuit of transistors MOSFET of high speed and fast

commutation, which generate the real pulse of high voltage.

With a little transformer (HV) with an input of 0 to 5Vcd generate a proportional output of 0 to -200Vcd, the voltage range is controlled with analogical output of the Microcontroller (MC), which goes to a voltage amplifier to strengthen the current and deliver a voltage range of 0 to 5Vcd and 100mA to power the transformer.

The voltage of 0 to -200Vcd is provided to the MOSFET transistors, and with this generate a negative voltage pulse to excite the transducer.

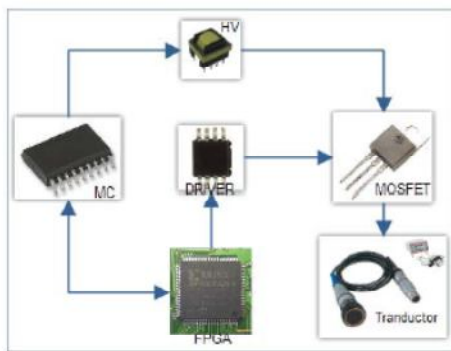


Figure 2 Pulser Circuit.

The figure 3 shows the digital signals that are generated with the FPGA, connected to DRIVER to perform the controlling operation of this one. The OE terminal has a double purpose, the first one is with a high level, and it serves to estimate the threshold level in voltage, the second one with a low level is to deactivate the output, with the A output in high and the B output in low.

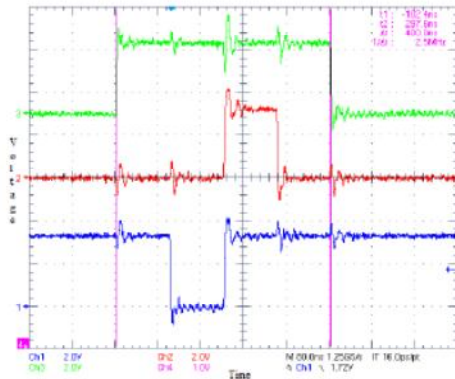


Figure 3. Digital Signals.

The figure 4 shows the negative pulse achieved with the pulser circuit, with this pulse the transducer is excited, for this example with a value of -80Vcd and with duration of 100ns. Once the transducer is excited this emit an answer signal using the same line where this was excited, receiving a signal too small and noisy, also the impedances were adjusted and a low pass filter was applied with a 20MHz cutoff frequency. This signal is shown in the figure 5, where we can see that maximum amplitude of the first echo is 1.83Vp-p and the TOF (t_s) is between the first two echoes at 2.32ms.

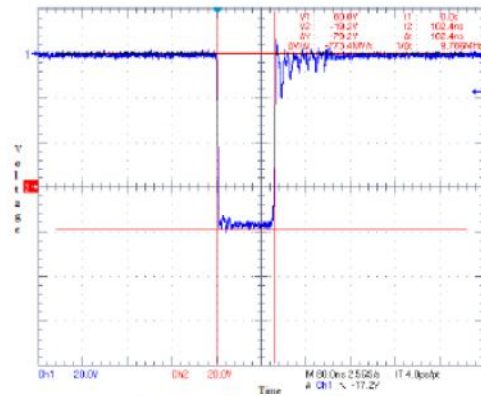


Figure 4. Negative Pulse.

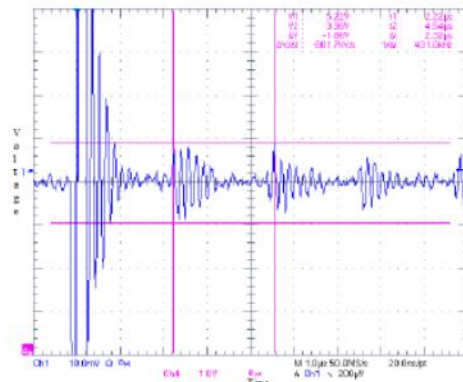


Figure 5. Transducer Answer.

Until here we just have the generation of the high voltage pulse and we can appreciate with the help of an oscilloscope the transducer answer, however, the use of right components of the receiver circuit is paramount to digitize correctly the ultrasound signal. The figure 6 shows a blocks diagram of the circuit to receive and acquire the ultrasound signal.

When excite the transducer receives a response signal which must be conditioned

electrically to measure, for this, first passed through by a TR/Switch circuit, which limit the high voltage of the impulse and adjust the CD level to a range of $\pm 5V$, later the signal pass through a low noise preamplifier (LNP) which is selected to amplify signals that are in the range of 5MHz, this means, besides amplify eliminating the majority of noisy signal. The signal coming out of the LNP passes by a controlled gain amplifier (VGA) for signal amplification. After VGA the signal pass through an operational amplifier to condition it (ACON) to have the necessary ranges for the analog digital converter (ADC), the figure 7 shows the input signal to the ADC acquired in normal conditions by the oscilloscope, this means, without any filtering or impedance matching, unlike figure 5.

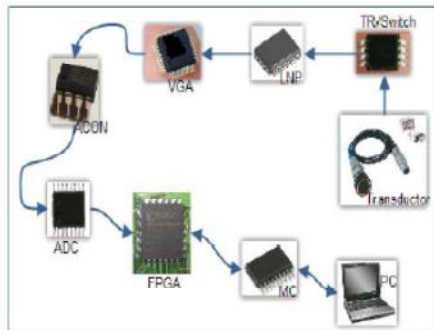


Figure 6. Receiver Circuit

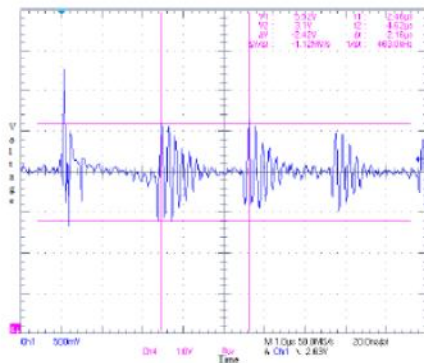


Figure 7. Acquired Signal

The ADC used has a sampling frequency of 50MHz with a resolution of 10 bits, worth mentioning that for the thickness measurement that matters is the resolution in time as it is a function of this as you get the thickness. In other hand, considering that the amplitude resolution is not really important and that it is easier manage data of 8 bits, we only use the 8 bits more significant of ADC.

The ADC is controlled with the FPGA, once it converts the signal to digital in FPGA an internal RAM memory is generated to save 20.48us of information that correspond to 1024 data, since it is the signal in the FPGA's RAM can be manipulated at the convenience. For this case and to illustrate the functionality of the system memory data from FPGA's RAM are read by a microcontroller (MC) and sent to a computer (PC) to display the pictures response signal and thus to validate the quality of the proposed prototype.

4. Test and results

The figure 8 shows the complete block diagram of the prototype that was developed.

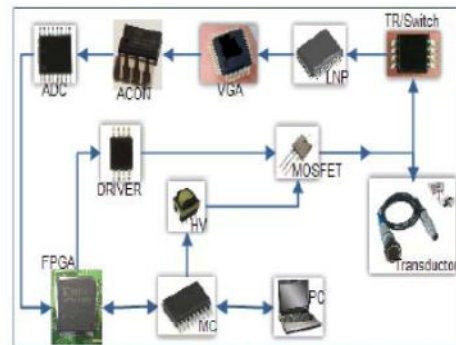


Figure 9. Complete Prototype.

The results presented are experimental; they were taken from a steel rolling pattern of 6.35, 12.70, 19.05 and 20.54mm. The form as is done the thickness measurement is by contact. Ten sample signals are required for each thickness pattern level; each signal is saved in the computer (PC) for later display the acquired data and determinate the time flight (t_s), figure 9.

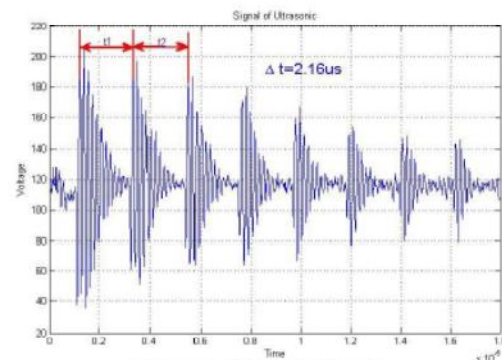


Figure 9. MatLab Signal.

The table 2 shows the ten points of measurements being made at each thickness.

Table 2. TOF Measurements.

	6.35mm (0.25")	12.7 mm (0.50")	19.05mm (0.75")	25.4mm (1.00")	
1	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
2	2.14	4.30	6.44	8.58	μs
3	2.14	4.30	6.44	8.58	μs
4	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
5	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
6	2.14	4.30	6.44	8.58	μs
7	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
8	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
9	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
10	2.14	4.30	6.44	8.6	μs

Considering the data in the table 2, we see that the equipment is repeated for each thickness level, so practically the resolution of the thickness measurement in the equipment is directly related and depends only of resolution of the speed of the ADC converter. For example in the some data of the table shows that exist difference between then and it is of 20ns which correspond to the ADC sampling period and considering that 2.16 μs correspond to 6.37mm (0.2507 in), 20ns correspond to 0.0591mm (0.0023 in) that practically would be the resolution and that the prototype presents.

The system is calibrated to the thickness of 6.35mm (0.25 in), computing the data average to determine the calibration factor:

$$Factor = \frac{V_{real}}{\bar{V}} \quad (2)$$

$$Factor = \frac{6.35mm}{2.15\mu s} = 2.95 mm/\mu s$$

Applying this calibration factor to each TOF in table 2, are obtained the thickness data shown in table 3.

Table 3. Thickness Calculation.

	6.35mm (0.25")	12.7 mm (0.50")	19.05mm (0.75")	25.4mm (1.00")	
1	6.37	12.69	19	25.31	Mm
2	6.31	12.69	19	25.31	Mm
3	6.31	12.69	19	25.31	Mm
4	6.37	12.69	19	25.31	Mm
5	6.37	12.69	19	25.31	Mm
6	6.31	12.69	19	25.31	Mm
7	6.37	12.69	19	25.31	Mm
8	6.37	12.69	19	25.31	Mm
9	6.37	12.69	19	25.31	Mm
10	6.31	12.69	19	25.37	Mm

Now, considering the data in table 3, are obtained the mean, the precision and the accuracy to each thickness, see table 4.

Table 4. Prototype Precision and Accuracy.

Tick. (mm)	Mean (mm)	Precision (mm)	Accuracy (mm)
6.35	6.346	± 0.024	0.004
12.7	12.69	± 0.0	0.01
19.05	19	± 0.0	0.05
25.4	25.316	± 0.054	0.084

In the figure 10 the developed prototype is shown.

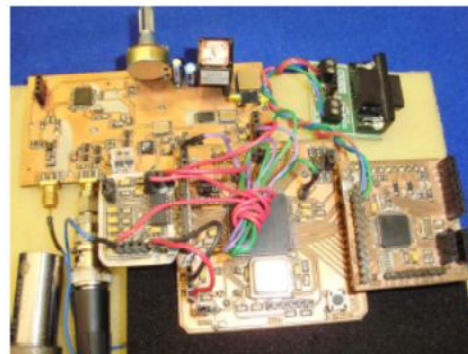


Figure 10. Developed Prototype.

5. Conclusions

Considering the results the prototype complies perfectly with the specifications required in terms of accuracy and resolution of the thickness measurements. On the other hand, this work presented a better idea of how is composed electronically an ultrasound equipment. Initially is not easy to develop and ultrasound equipment but inferring in the ultrasound signal behavior, and by using appropriate and recent electronic components, we showed that it is possible to develop a prototype, and with the minimum appropriate changes it could be a commercial equipment.

The initial objective of this paper was to have a prototype of own ultrasound which has yet, however, in a second stage and because the PIG must use multiple transducers for the pipeline inspection will be necessary to plan the architecture considering the addition of signal multiplexers.

6. References

- [1] Baldev Raj, V. Rajendran, P. Palanichamy. "Science and Technology of Ultrasonic" Book, 2004.
- [2] Christopher R. Cole, C. Geoffrey, E. Fernald. "Ultrasound Beamformation Integrated Circuit and Method" Patent Number 5970025, United States of America, Oct 19, 1999.
- [3] Brown J. A., Lockwood G. R. "A low-cost, high-performance pulse generator for ultrasound imaging. IEEE transactions on ultrasonics ferroelectrics and frequency control." Vol 49, No 6. P. 848-851, 2002.
- [4] L. Svilainis, G. Motiejūnas. "Power Amplifier for Ultrasonic Transducer Excitation" ISSN 1392-2114 ULTRAGARSAS. Nr 1(58), 2006.
- [5] M. Kondo, M. Kobayashi, M. Karashima. "Ultrasonic Corrosion Inspection of Crude Oil Pipeline" Paper Number 525, 1999.
- [6] "Technical Notes of Olympus of the Ultrasonic principles important to transducer application and design".

Anexo 3: Publicación en Congreso de ingeniería UAQ 2010



Universidad
Autónoma de
Querétaro



Desarrollo de prototipo de dos canales para la medición de señales de Ultrasonido.

Development of an Ultrasonic Thickness Measurement Equipment Prototype for Two Channels

Nava Balanzar Luciano¹, Jorge Alberto Soto Cajiga² y Jesús Carlos Pedraza Ortega³.

¹Estudiantes del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, ²Profesor Investigador del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, ³Profesor Investigador de la facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

RESUMEN. En el siguiente trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo de dos canales de adquisición para un circuito pulsador-receptor y adquirente de señales de ultrasonido para la medición de espesores de ductos de hidrocarburos utilizando un Pipeline Inspection Gauge (PIG). El prototipo cuenta con restricciones de espacio, velocidad de muestreo y capacidad de almacenamiento y se compone de diversos bloques funcionales; un circuito pulsador que excita al transductor generando un pulso de alto voltaje de hasta -200V, un multiplexor para utilizar dos transductores, un circuito receptor con el cual se recibe la señal del transductor, se filtra y se amplifica, por último se tiene una etapa de adquisición y procesamiento de señales compuesta de un ADC, un FPGA y un Microcontrolador, los últimos dos tienen el control de todos los circuitos integrados.

Palabras clave: Ultrasonido, Medición de Espesores.

1. INTRODUCCION

Un PIG para inspección de ductos por ultrasonido de haz recto requiere de un equipo de ultrasonido diseñado especialmente para esta aplicación, ya que se debe adecuar al espacio físico y más importante aún, se debe tener control total de su arquitectura, para poder manipular electrónicamente las señales en función a las necesidades de la inspección.

En el mercado existen diferentes aparatos comerciales para la medición de espesores por la técnica de ultrasonido, sin embargo, al ser equipos comerciales, sus tamaños son predefinidos, su arquitectura está muy bien protegida y es completamente cerrada. Por otro lado, existe muy poca bibliografía de cómo realmente se constituyen electrónicamente, por lo que en este trabajo y después de realizar una ardua investigación bibliográfica y principalmente de analizar diferentes componentes electrónicos de diferentes fabricantes se llegó a la propuesta de un prototipo de un equipo de ultrasonido. A lo largo de este artículo se explican todos los bloques que lo componen así como su interacción.

Para el desarrollo del prototipo primero es necesario saber los fundamentos de ultrasonido, [1]. En la bibliografía se encontró una patente de un circuito integrado en el cual la transmisión y recepción digital de la onda de ultrasonido es procesada en dicho circuito integrado [2] y así se pueden encontrar diferentes trabajos pero ninguno que exponga su arquitectura real. De los principios básicos de ultrasonido se sabe que para la excitación de un transductor es necesario generar un pulso de voltaje negativo [3] y con ello obtener información de lo que se está inspeccionando, para excitar a un transductor se utiliza un amplificador de potencia [4], todo esto es lo que se encuentra en la bibliografía, sin embargo, no especifican, entre otras cosas, cómo proteger al circuito receptor del pulso de alto voltaje cuando se utiliza un transductor de un solo cristal.

El PIG que se está desarrollando inicialmente cuenta con 100 transductores de haz recto, la intención es detectar la pérdida de material debido a la corrosión, se explica cómo funciona un PIG y desde luego como



se realiza una inspección en ductos de hidrocarburo [4]. De esta manera se puede plantear una metodología para la medición de espesores utilizando señales de ultrasonido y se justifica el desarrollo de un equipo propio.

Por último cabe mencionar que el equipo que se desarrolla es compacto, versátil y los circuitos electrónicos que se están utilizando son de los más recientes en el mercado.

2. FUNDAMENTOS DE ULTRASONIDO

Se llama Ultrasonido al sonido generado por encima de lo que el humano oye (típicamente 20KHz) [1]. Sin embargo, la gama de frecuencia normalmente empleada en pruebas ultrasónicas no destructivas es de 100KHz a 50MHz [6].

Aunque el ultrasonido se comporta de manera similar al sonido audible, esto tiene una longitud de onda mucho más corta, esto quiere decir, que puede ser reflejado en muy pequeñas superficies, como por ejemplo defectos dentro de materiales, esto es una característica que hace al ultrasonido útil para las pruebas no destructivas de materiales, entre ellas la medición de espesores.

Un transductor es cualquier dispositivo capaz de convertir de una energía a otra, el transductor de ultrasonido convierte la energía eléctrica en energía mecánica en forma de sonido y viceversa [1]. La señal real de un transductor de ultrasonido se muestra en la Figura 1, la información de interés en dicha figura es el tiempo de vuelo (t_s) y se determina midiendo la diferencia de tiempo entre ecos, lo más fácil es utilizar compuertas que midan el tiempo en que ocurre el primer pico o borde del eco de referencia y del eco que le sigue, para así determinar el espesor del metal utilizando la siguiente fórmula [6]:

$$T = \frac{C t_s}{2} \quad (1)$$

Donde:

T = Espesor del material.

C = Velocidad del sonido en el material.

t_s = Tiempo de vuelo.

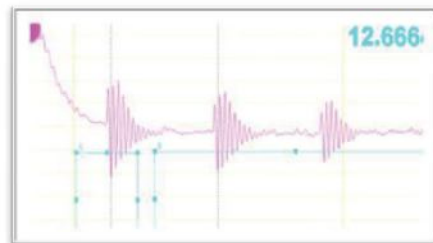


Figura 1. Señal Real de Ultrasonido.

Por regla general todos los parámetros de los transductores de ultrasonido son diseñados para una excitación negativa [6]. Los voltajes de excitación máximos deben ser limitados con aproximadamente 50 voltios por milésima del espesor del elemento piezoeléctrico del transductor, los elementos de baja frecuencia son gruesos y los elementos de alta frecuencia son delgados.



Para ésta aplicación se utiliza un transductor de ultrasonido de 5MHz de un solo elemento piezoeléctrico, es decir, el mismo elemento transmite y recibe la señal de ultrasonido.

3. DESARROLLO

Este desarrollo se realizó conforme a la norma de PEMEX, NRF-060-PEMEX-2006, en la tabla 1 se pueden apreciar características importantes para el desarrollo de este prototipo. Además para el desarrollo se consideraron todas las recomendaciones de los fabricantes de los circuitos integrados utilizados.

Tabla 1. Características que se deben de cumplir de acuerdo a normatividad.

Radio de curvatura mínimo	1.5 x D/90°
Máxima presión permisible	120 bar
Rango de temperatura permisible	0° C hasta +40° C
Frecuencia del pulso de ultrasonido	De 2 a 5 MHz
Frecuencia de repetición de pulsos (FRP)	Hasta 600 Hz
Resolución en la medición del espesor de pared	0.2 mm
Precisión en la evaluación del espesor remanente	+/- 0.5 mm
Resolución circunferencial	+ / - 5° (0.3 pulg. / 8 mm)
Resolución longitudinal	2.8 mm (a 0.85 m/s)
Precisión en la ubicación axial de defectos	+/- 0.2 m (desde soldadura de referencia)
Velocidad del equipo	0.2 a 2.0 m/s.

Como se menciona anteriormente para excitar un transductor de ultrasonido es necesario generar un pulso de voltaje negativo, para ello se desarrolló un circuito pulsador para el cual se presenta su diagrama a bloques en la figura 2, dicho circuito está compuesto de un driver dual de alta velocidad diseñado para transistores tipo MOSFET, su alimentación es de $\pm 5V_{cd}$, para su implementación requiere de unas señales digitales de alta velocidad en las terminales OE, INA, INB, las cuales son programadas con el FPGA ya que deben cambiar de un nivel lógico a otro cada 20ns, posteriormente el driver se conecta a un circuito integrado de transistores MOSFET de alto voltaje y conmutación rápida, el cual genera el pulso real de alto voltaje.

Con un transformador pequeño (HV) con entrada de 0 a 5Vcd se genera una salida proporcional de 0 a -200Vcd, el rango de voltaje se controla con una salida analógica del Microcontrolador (MC), la cual va a un amplificador de voltaje para fortalecer la corriente y entregar un rango de voltaje de 0 a 5Vcd y de 0 a 100mA para alimentar el transformador.

Utilizando este alto voltaje y con ayuda de los transistores MOSFET se genera el pulso de alto voltaje negativo para excitar al transductor.

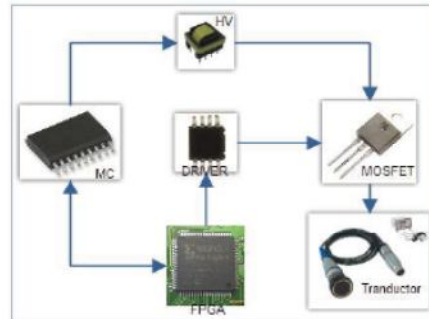


Figura 2. Circuito Pulsador

En la figura 3 se muestra las señales digitales que se generan con el FPGA y que van conectadas al DRIVER para realizar el control de operación del mismo. En verde esta la terminal OE (Habilitación de salida) En azul la señal A que activa los MOSFET y en rojo la señal B que los desactiva.

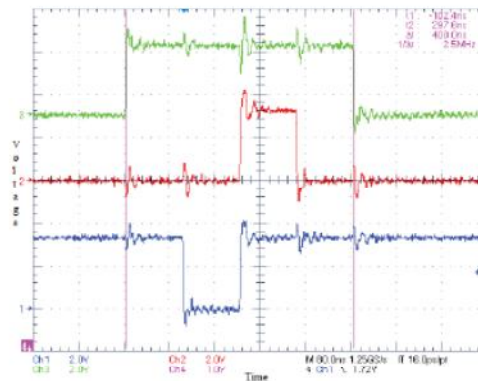


Figura 3. Señales digitales.

En la figura 4 se muestra el pulso negativo logrado con el circuito pulsador, con dicho pulso se excita al transductor. En este ejemplo se muestra con un valor de -80Vcd y con una duración de 100ns . Una vez que el transductor se excita emite una señal de respuesta por la misma vía por donde se excito, recibiendo una señal muy pequeña y con mucho ruido, que para poder observarla con ayuda de un osciloscopio se ajustaron impedancias y se aplicó un filtro de pasa-bajas con frecuencia de corte de 20MHz , esta señal se muestra en la figura 5, donde se obtienen con ayuda de los cursores que la amplitud máxima del primer eco que es de 1.83Vp-p y el tiempo de vuelo (t_s) entre los dos primeros ecos que es de $2.32\mu\text{s}$.

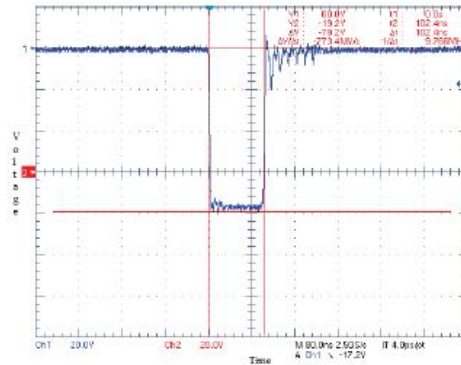


Figura 4. Pulso negativo.

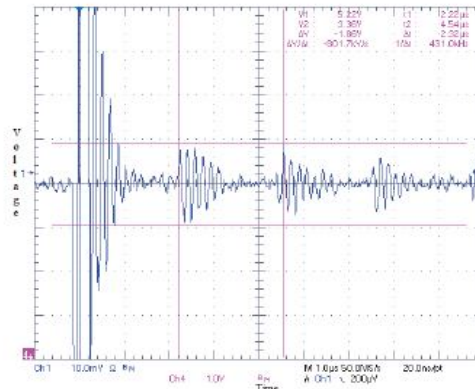


Figura 5. Respuesta del transductor.

Hasta aquí solo se tiene la generación del pulso de alto voltaje y se puede apreciar con ayuda de un buen osciloscopio la respuesta del transductor, sin embargo, la utilización de los componentes adecuados del circuito receptor es primordial para poder digitalizar adecuadamente la señal de ultrasonido y desde luego realizar un multiplexeo para dos canales. En la figura 6 se presenta un diagrama de bloques del circuito para recibir y adquirir la señal de ultrasonido de dos transductores.

Cuando se excita al transductor se recibe una señal de respuesta la cual hay que acondicionar eléctricamente para poder medir, para ello, primero se hace pasar por un circuito TR/ Switch, el cual limita el alto voltaje del impulso y ajusta el nivel de CD a un rango de $\pm 5V$ posteriormente esta señal pasa por un preamplificador de bajo ruido (LNP) el cual se selecciona para amplificar señales que estén en el rango de los 5MHz, es decir, además de amplificar elimina la mayoría del ruido de la señal. La señal que sale del LNP se pasa por un amplificador de ganancia controlada (VGA) con el fin de aumentar el rango de amplificación de la señal. Después del VGA la señal se pasa por un amplificador operacional para acondicionarla (ACON) y así esté en los rangos necesarios para el convertidor analógico a digital (ADC), finalmente la función del circuito multiplexor (MUX) es simplemente realizar un switcheo entre los dos transductores, dicho multiplexor es para 8 canales, unipolar, de alto voltaje negativo, es un circuito integrado conmutador analógico, se destina para su uso en aplicaciones que requieren de alta tensión de conmutación, controlados por señales de control de baja tensión, tales como ensayos no destructivos, detección de imágenes de ultrasonido médico, etc. El control se hace con el MC y para cada transductor se realiza el proceso anteriormente explicado, en la figura 7 se muestra la señal que entra al ADC adquirida bajo condiciones

normales del osciloscopio, es decir sin ningún tipo de filtro ni acoplamiento de impedancias, a diferencia de la figura 5.

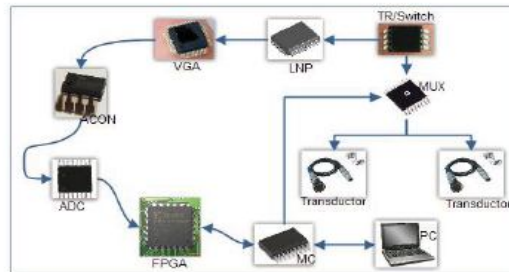


Figura 6. Circuito Receptor.

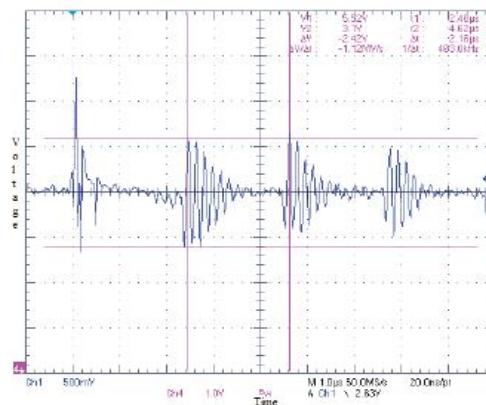


Figura 7. Señal adquirida.

El ADC que se utiliza tiene una frecuencia de muestreo de 50 MHz con una resolución de 10 bits, aquí cabe mencionar que para la medición del espesor lo que realmente interesa es la resolución en tiempo ya que es en función a éste como se obtiene el espesor. Por otro lado, considerando que la resolución en amplitud no es realmente importante y que es más fácil manejar datos de 8 bits, solo se utilizan los 8 bits más significativos del ADC.

El ADC es controlado con el FPGA, una vez que se convierte la señal a digital en el FPGA se genera una memoria RAM interna para guardar 20.48µs de información lo cual corresponde a 1024 datos, ya que se tiene la señal en memoria RAM del FPGA esta se puede manipular a conveniencia. Para este caso y con el fin de ilustrar la funcionalidad del sistema los datos de la memoria RAM del FPGA son leídos por un Microcontrolador (MC) y enviados a una computadora (PC) para visualizar la imagen de la señal de respuesta y así poder validar la funcionalidad del prototipo propuesto.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

En la figura 8 se muestra el diagrama a bloques del prototipo completo que se desarrolló.

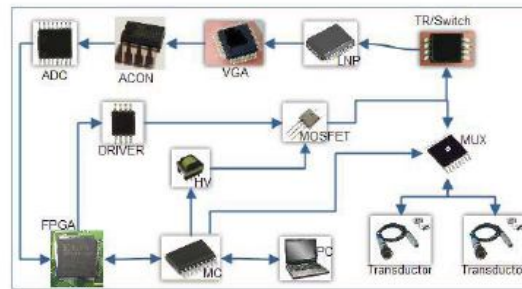


Figura 8. Prototipo final.

Los resultados que se presentan son experimentales, se tomaron en un patrón de acero escalonado de 6.35, 12.70, 19.05 y 20.54mm. La forma de como se realizó la medición del espesor fue por la técnica de contacto. Se adquirieron 10 señales de muestra para cada nivel de espesor del patrón, cada señal se guardo en la computadora (PC) para posteriormente visualizar los datos adquiridos y determinar el tiempo de vuelo (t_s), figura 9.

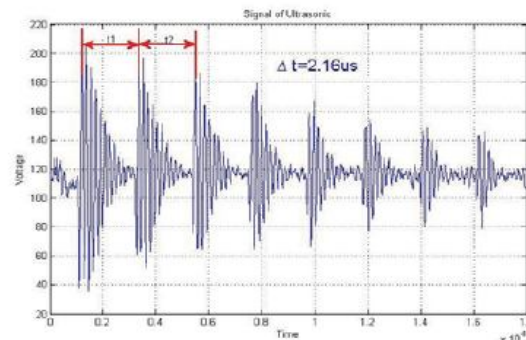


Figura 9. Señal en MatLab.

En la tabla 2 se muestra los diez puntos de medición que se realizo en cada nivel de espesor.



Tabla 2. Medición TOF.

	6.35 mm (0.25")	12.7 mm (0.50")	19.05 mm (0.75")	25.4 mm (1.00")	
1	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
2	2.14	4.30	6.44	8.58	μs
3	2.14	4.30	6.44	8.58	μs
4	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
5	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
6	2.14	4.30	6.44	8.58	μs
7	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
8	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
9	2.16	4.30	6.44	8.58	μs
10	2.14	4.30	6.44	8.6	μs

Observando los datos de la tabla, se puede apreciar que el equipo es repetible para los diferentes niveles de espesor, y que se llega a tener un error de $0.02\mu\text{s}$, el cual corresponde a la resolución de la velocidad de muestreo, que es de 50MHz o $0.02\mu\text{s}$. Por ejemplo en algunos datos de la tabla 2 se observa que existe una única diferencia entre los datos y es de 20ns los cuales corresponden al periodo de muestreo del ADC y considerando que $2.16\mu\text{s}$ corresponden a 6.37mm (0.2507 in), 20ns corresponderían a 0.0591mm (0.0023 in) que sería prácticamente la resolución y precisión que el prototipo presenta.

Por ejemplo si el sistema es calibrado para el espesor de 6.35mm (0.25 in), obteniendo el promedio de los datos para determinar un factor de calibración.

$$\text{Factor} = \frac{V_{\text{real}}}{\vartheta} \quad (2)$$

$$\text{Factor} = \frac{6.35\text{mm}}{2.15\mu\text{s}} = 2.95\text{mm}/\mu\text{s}$$

Aplicando dicho factor de calibración para cada TOF en la tabla 2, se obtienen los datos de espesores y se muestran en la tabla 3.



Tabla 3. Calculo de Espesores.

	6.35 mm (0.25")	12.7 mm (0.50")	19.05 mm (0.75")	25.4mm (1.00")	
1	6.37	12.69	19	25.31	mm
2	6.31	12.69	19	25.31	mm
3	6.31	12.69	19	25.31	mm
4	6.37	12.69	19	25.31	mm
5	6.37	12.69	19	25.31	mm
6	6.31	12.69	19	25.31	mm
7	6.37	12.69	19	25.31	mm
8	6.37	12.69	19	25.31	mm
9	6.37	12.69	19	25.31	mm
10	6.31	12.69	19	25.37	mm

Considerando los datos de la tabla 3, se obtiene el promedio, la precisión y la exactitud de cada espesor, ver la tabla 4.

Tabla 4. Precisión y Resolución del prototipo.

Tick. (mm)	Mean (mm)	Precision (mm)	Accurac y (mm)
6.35	6.346	±0.024	0.004
12.7	12.69	±0.0	0.01
19.05	19	±0.0	0.05
25.4	25.316	±0.054	0.084

En la figura 10 se muestra el prototipo desarrollado.

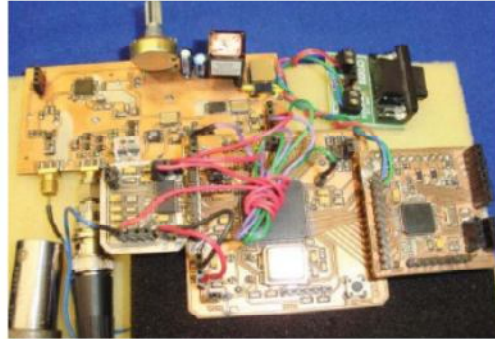


Figura 10. Prototipo Desarrollado.

5. CONCLUSIONES

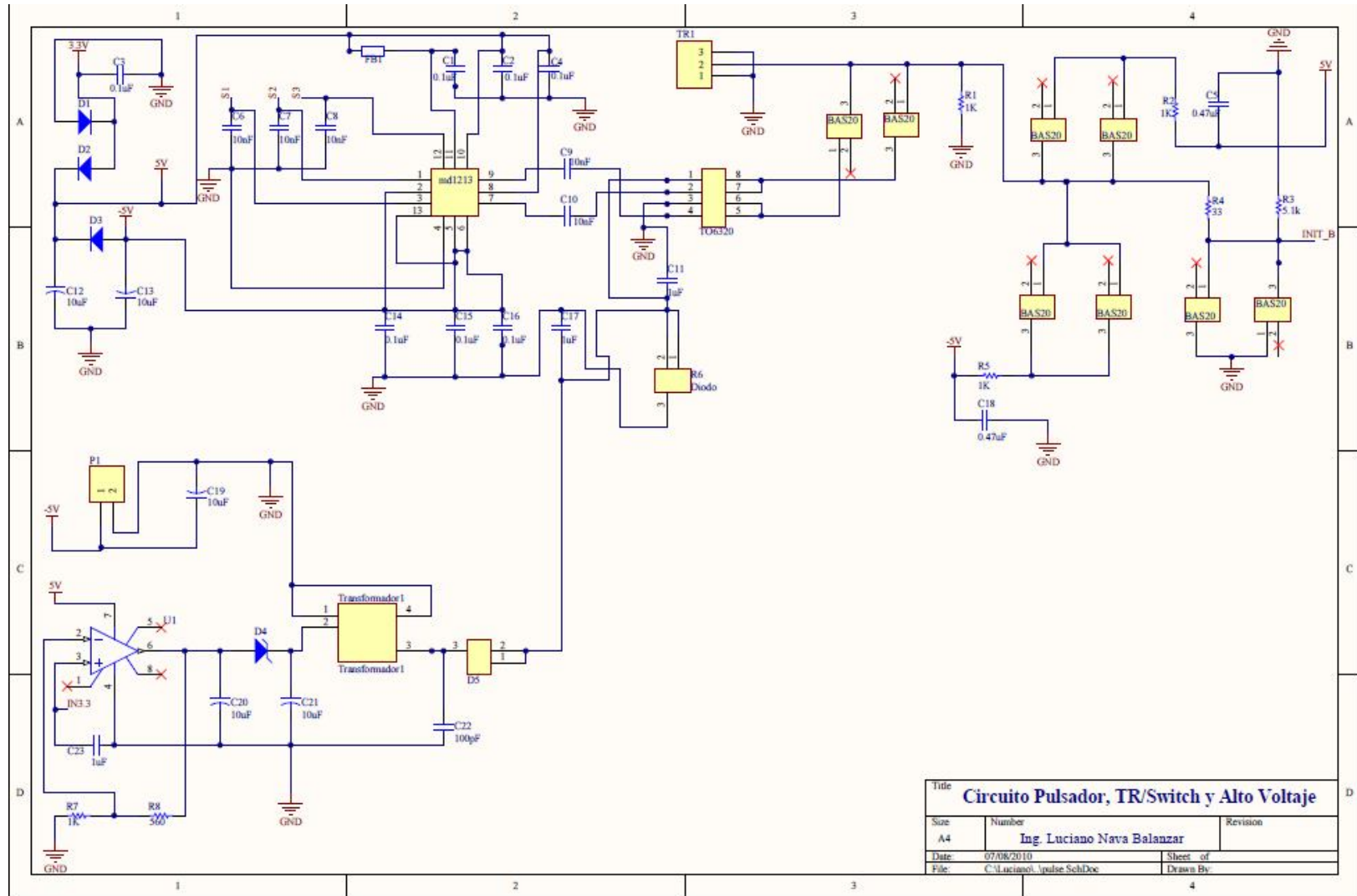
Considerando los resultados obtenidos se puede concluir que el prototipo cumple perfectamente con las especificaciones necesarias en cuanto a precisión y exactitud de la medición de espesores. Por otro lado se observa y se da una mejor idea al lector de cómo se constituye electrónicamente un equipo de ultrasonido. Inicialmente no es una tarea sencilla desarrollar un equipo de ultrasonido pero infiriendo en el comportamiento del ultrasonido, utilizando componentes electrónicos recientes y con algo de conocimientos en electrónica se demostró que es posible desarrollar un prototipo, y que realizando algunas adecuaciones mínimas podría llegar a ser hasta un equipo comercial.

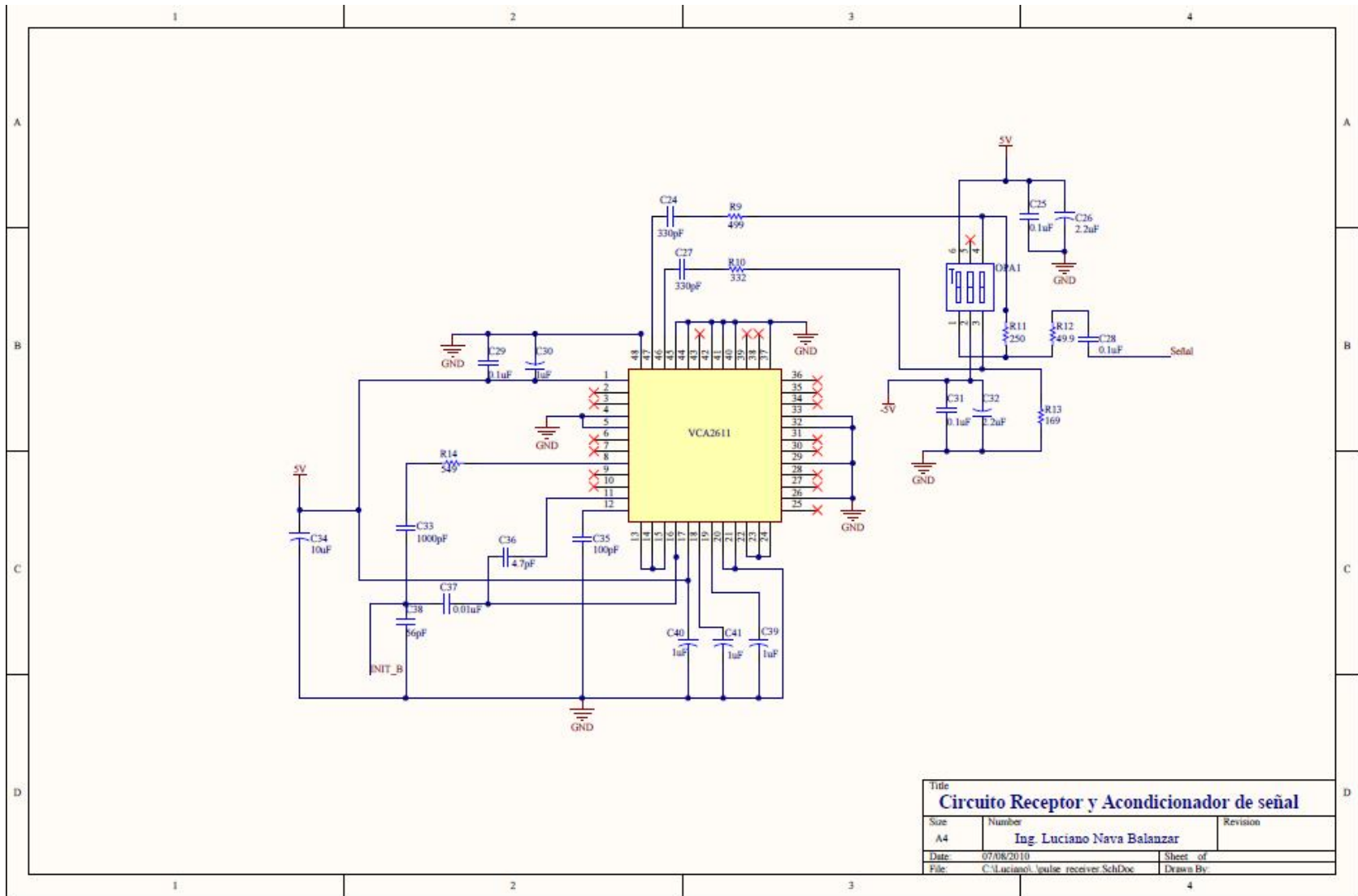
En la etapa de multiplexor funciona bien para ocho canales y en trabajo futuro, se realizará la misma tarjeta prototipo y con ello hacer pruebas con dos tarjetas de ocho transductores cada una, para pasar a otra etapa de guardar la información y comprimirla para optimizar el espacio de un disco duro o una computadora.

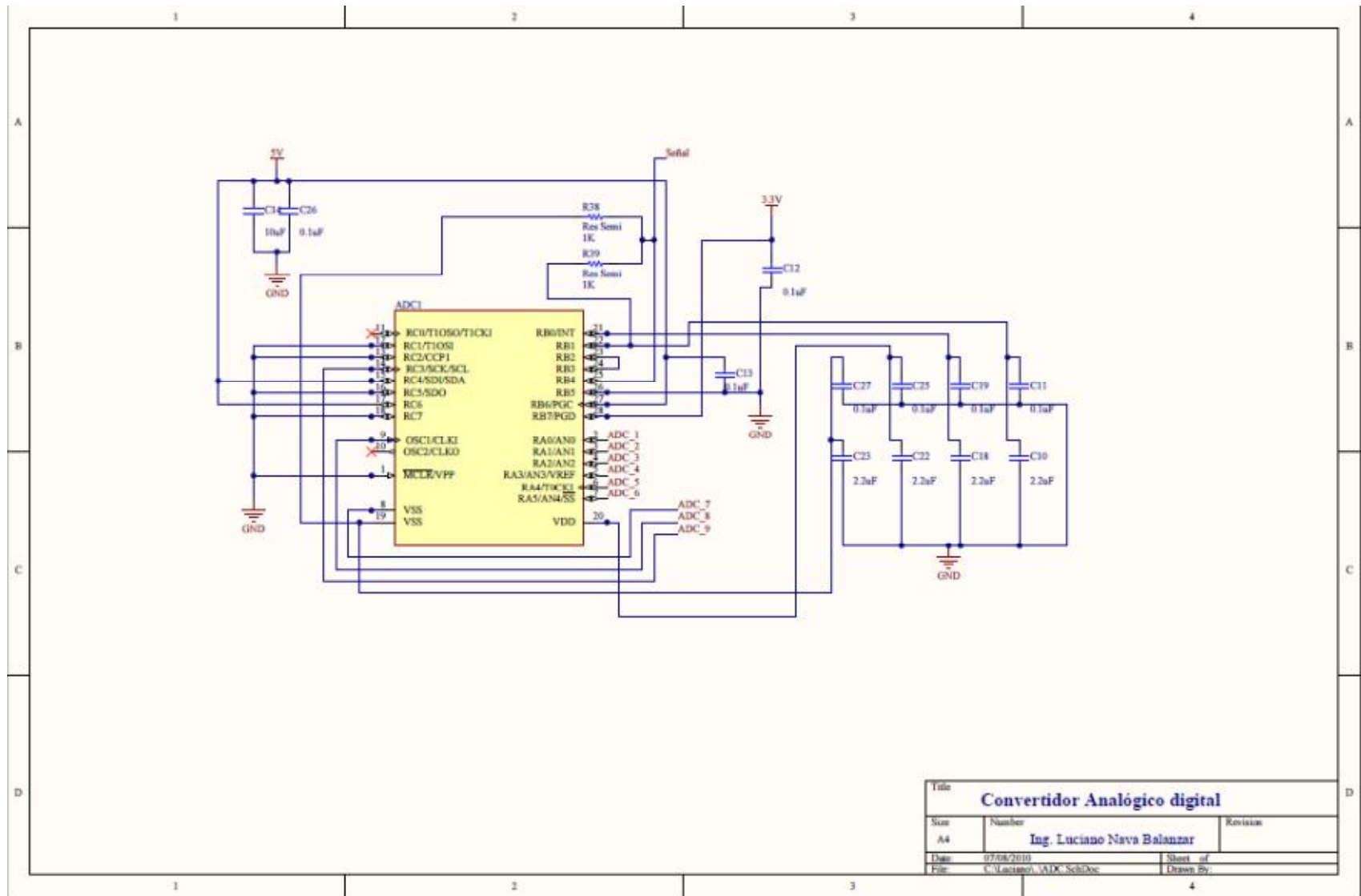
6. REFERENCIAS

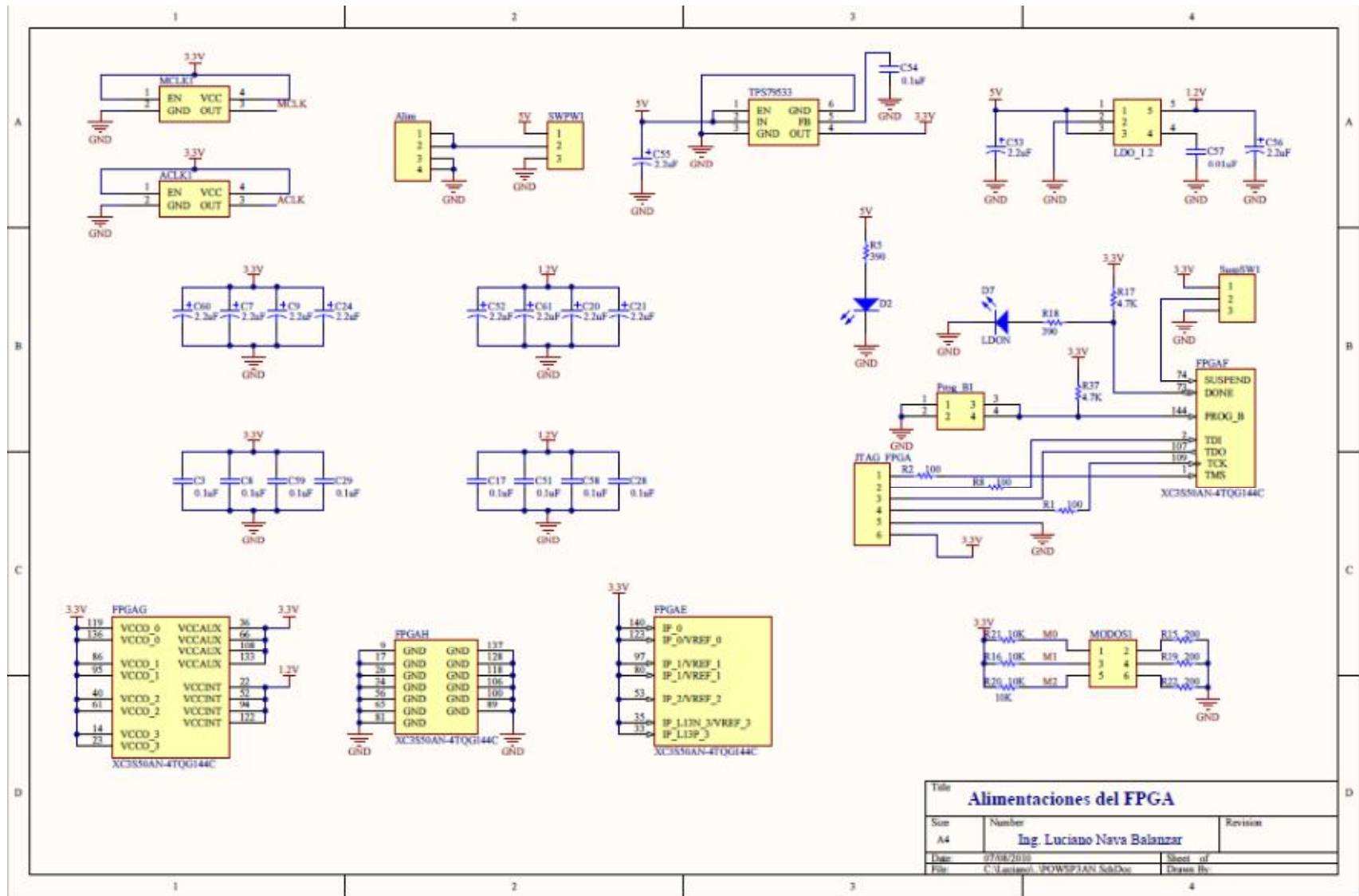
- [1] Baldev Raj, V. Rajendran, P. Palanichamy. "Science and Technology of Ultrasonic" Book, 2004.
- [2] Christopher R. Cole, C. Geoffrey, E. Fernald. "Ultrasound Beamformation Integrated Circuit and Method" Patent Number 5970025, United States of America, Oct 19, 1999.
- [3] Brown J. A., Lockwood G. R. "A low-cost, high-performance pulse generator for ultrasound imaging. IEEE transactions on ultrasonics ferroelectrics and frequency control." Vol 49. No 6. P. 848-851, 2002.
- [4] L. Svilainis, G. Motiejūnas. "Power Amplifier for Ultrasonic Transducer Excitation" ISSN 1392-2114 ULTRAGARSAS. Nr 1(58), 2006.
- [5] M. Kondo, M. Kobayashi, M. Karashima. "Ultrasonic Corrosion Inspection of Crude Oil Pipeline" Paper Number 525, 1999.
- [6] "Technical Notes of Olympus of the Ultrasonic principles important to transducer application and design".

Anexo 4: Proyecto en Altium Designer Summer 2009.

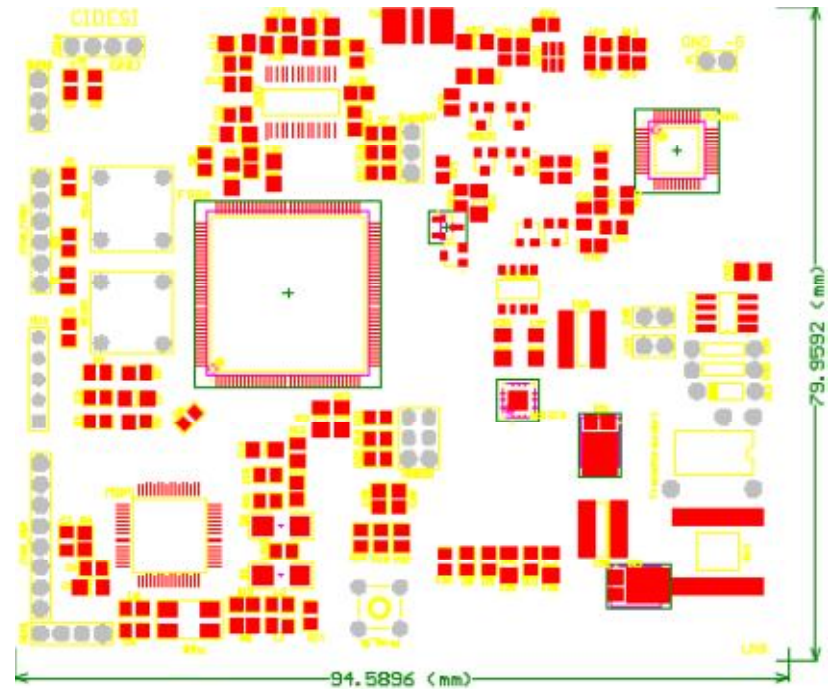
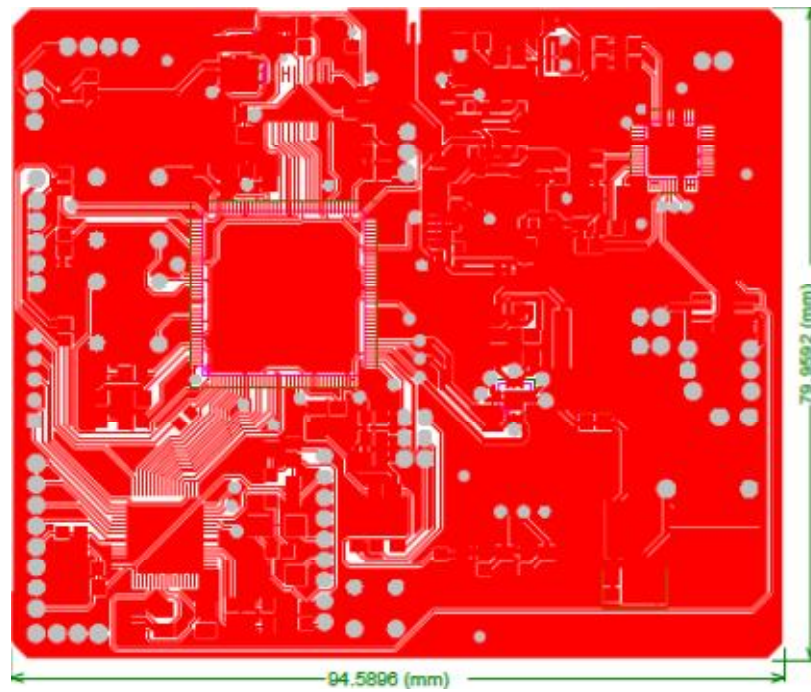




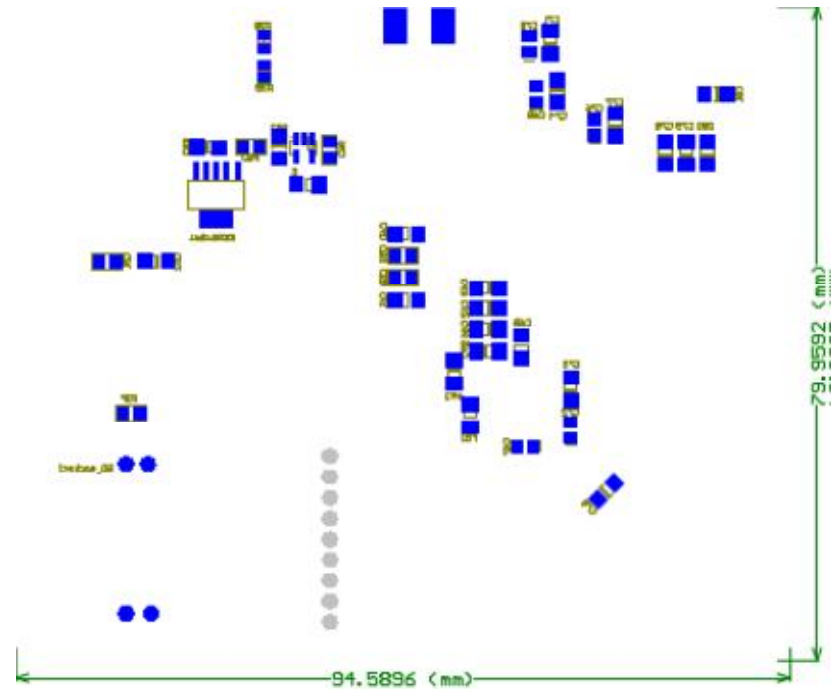
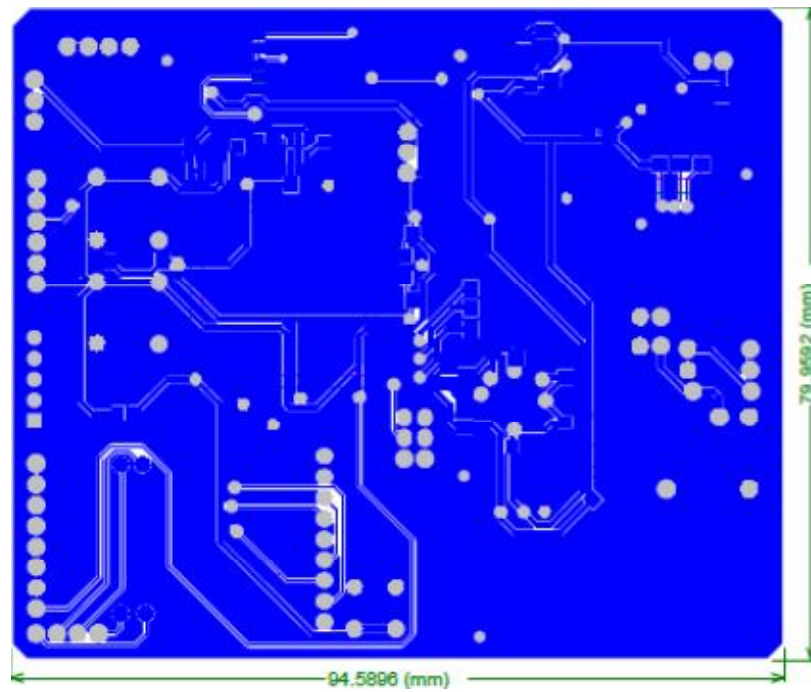




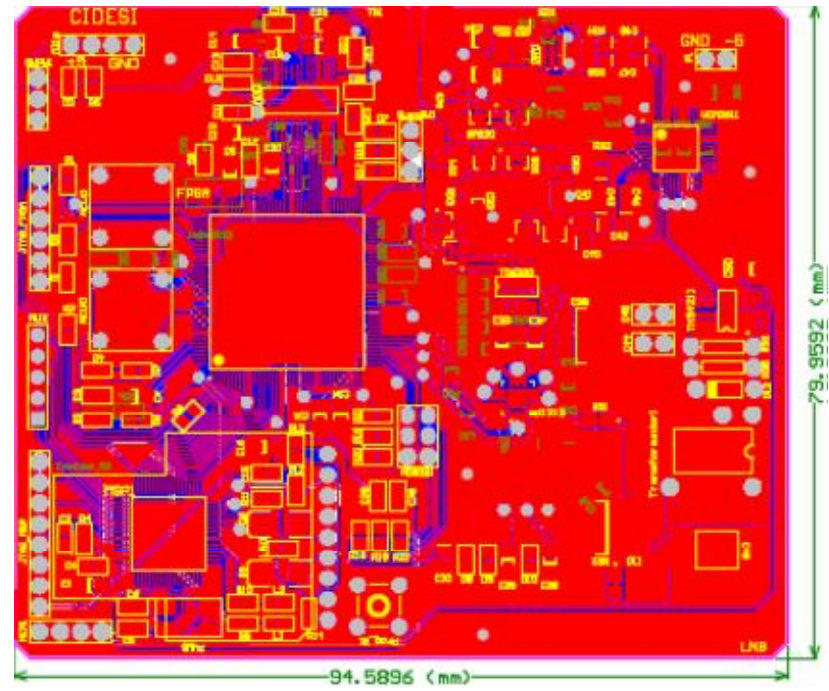
Pistas y componentes electrónicos de la parte de arriba de la tarjeta impresa.

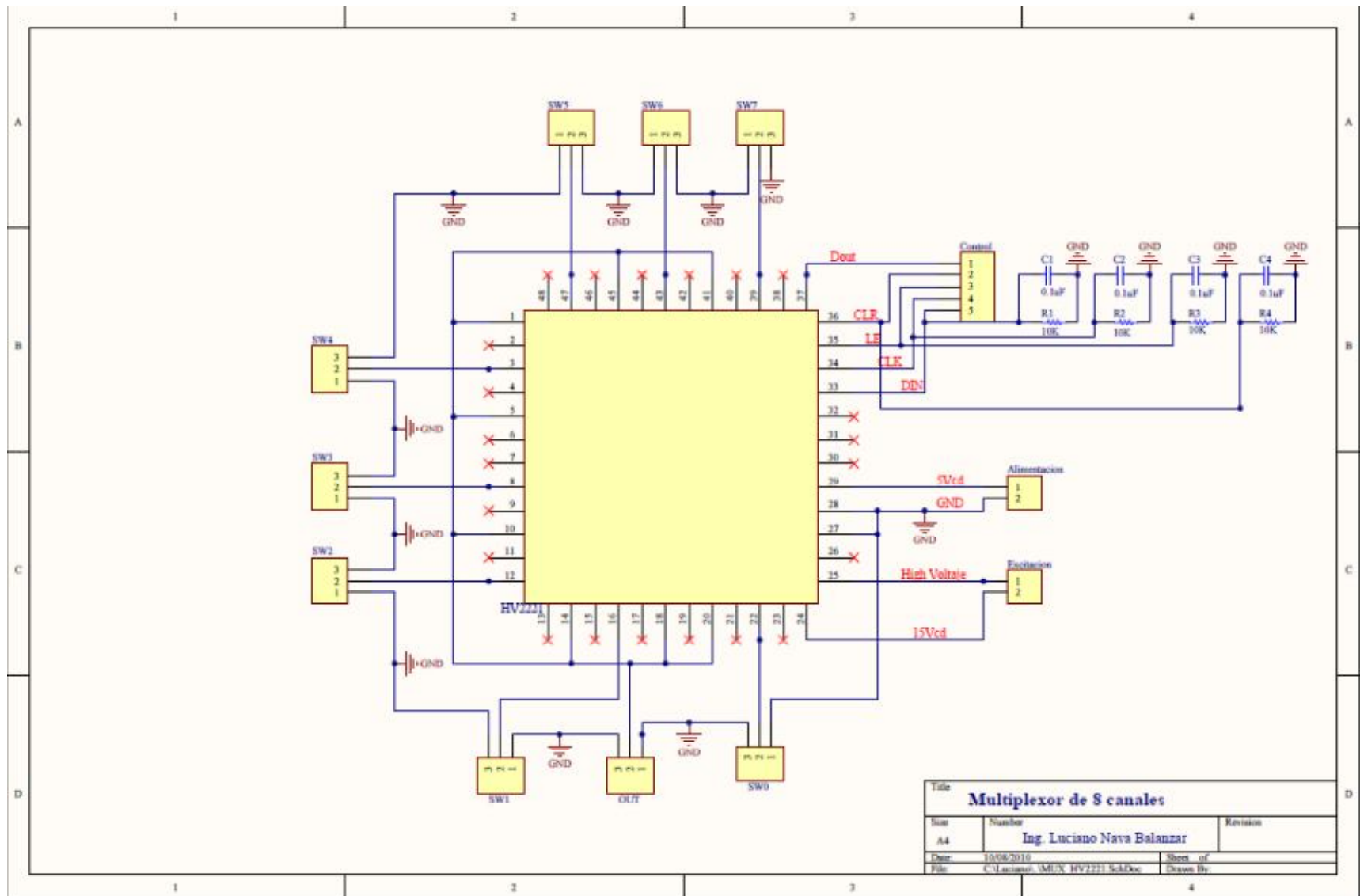


Pistas y componentes electrónicos de la parte de abajo de la tarjeta impresa.



PCB final para leer un transductor.





Title		
Multiplexor de 8 canales		
Size	Number	Revision
A4	Ing. Luciano Nava Balanzar	
Date:	10/08/2010	Sheet of
File:	C:\Luciano\MUX HV2221 SckDoc	Drawn By:

Pistas y componentes electrónicos del Multiplexor de 8 canales.

