

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



**UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA**



**ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA**

“Desarrollo de un sistema ultrasónico TOFD configurable”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

Benigno Moreno Sánchez

Tutor/a:

Jorge Gosálbez Castillo

Ignacio Bosch Roig

GANDIA, 2014

Dedicado a mis padres, Benigno y Eloisa, y a mi hermano Antonio.

Índice general

| | |
|---|-------------|
| Sobre el autor | IV |
| Agradecimientos | V |
| Preámbulo | VI |
| Resumen | VII |
| Abstract | VIII |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Objetivos | 1 |
| 1.2. Organización de la memoria | 1 |
| 2. Estado del arte | 3 |
| 2.1. Ultrasonidos | 3 |
| 2.1.1. Propagación de ondas acústicas (ondas mecánicas) | 3 |
| 2.1.2. Tipos de ondas acústicas | 4 |
| 2.1.3. Producción de ultrasonidos | 4 |
| 2.1.4. Propagación de ultrasonidos | 5 |
| 2.1.5. Tipos de ondas ultrasónicas | 6 |
| 2.1.6. Aplicaciones de los ultrasonidos | 7 |
| 2.2. Ensayos No Destructivos | 8 |
| 2.2.1. Ultrasonidos en los END | 8 |
| 2.3. Técnica TOFD | 9 |
| 2.3.1. Configuración de la técnica TOFD | 9 |
| 2.3.2. Parámetros de la técnica TOFD | 10 |
| 2.3.3. A-Scan y B-Scan | 11 |
| 3. Herramientas | 14 |
| 3.1. Sistema ULTRASCOPE TOFD | 14 |
| 3.1.1. Características técnicas ULTRASCOPE TOFD | 15 |
| 3.1.2. Conexiones para transductores | 16 |
| 3.2. Transductores piezoeléctricos | 16 |
| 3.2.1. Gel ultrasónico | 16 |
| 3.3. Encoder rotatorio | 17 |

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 3.4. Arduino | 18 |
| 3.4.1. Arduino Uno | 18 |
| 3.4.2. IDE de Arduino | 19 |
| 3.5. Ordenador personal | 19 |
| 3.6. MATLAB | 19 |
| 4. Desarrollo Hardware | 20 |
| 5. Desarrollo Software | 22 |
| 5.1. Análisis | 22 |
| 5.2. Diseño | 22 |
| 5.2.1. Módulo 1: INICIAR SISTEMA | 23 |
| 5.2.2. Módulo 2: VISUALIZACIÓN OFFLINE | 24 |
| 5.3. Desarrollo | 25 |
| 6. Campaña Experimental | 26 |
| Conclusiones | 28 |
| Desarrollos futuros | 29 |
| Notas | 30 |
| Referencias | 31 |
| ANEXOS | 32 |
| A. MANUAL DE INSTALACIÓN | 33 |
| A.1. Configuración Hardware | 33 |
| A.2. Configuración Software | 33 |
| B. MANUAL DE USUARIO | 35 |
| B.1. Pantalla Inicial | 35 |
| B.2. Módulo 1: INICIAR SISTEMA | 36 |
| B.2.1. Zona: CONFIGURACIONES | 41 |
| B.2.2. Zona: A-Scan Medido | 44 |
| B.2.3. Zona: A-Scan Contínuo | 44 |
| B.2.4. Zona: B-Scan | 45 |
| B.2.5. Zona: Extra | 46 |
| B.3. Módulo 2: VISUALIZACIÓN OFFLINE | 47 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 2.1. Incidencia angular de las ondas. | 5 |
| 2.2. Reflexión y refracción de onda con incidencia angular. | 6 |
| 2.3. Configuración general de la técnica TOFD. | 9 |
| 2.4. Señal temporal | 11 |
| 2.5. Ejemplo de una imagen bidimensional con la técnica TOFD. | 12 |
| 2.6. Proceso de formación de imagen B-Scan a partir de trazas A-Scan. | 12 |
| 3.1. Sistema ULTRASCOPE TOFD | 14 |
| 3.2. Transductores piezoeléctricos Krautkrämer. | 17 |
| 3.3. Encoder rotatorio óptico Kübler. | 18 |
| 3.4. Arduino Uno. | 18 |
| 4.1. Sistema mecanizado para inspecciones mediante técnica TOFD. | 21 |
| 6.1. A-Scan: trama 46 y B-Scan | 27 |
| B.1. Pantalla Inicial | 36 |
| B.2. Zona CONFIGURACIONES y EXTRA - MODO PARADA | 37 |
| B.3. Parte izquierda - Módulo 1: INICIAR SISTEMA - MODO ACTIVO | 39 |
| B.4. Parte derecha - Módulo 1: INICIAR SISTEMA - MODO ACTIVO | 40 |
| B.5. Zona EXTRA - MODO STAND-BY | 41 |
| B.6. Módulo 2: VISUALIZACIÓN OFFLINE (con datos cargados) | 49 |

Sobre el autor

Benigno Moreno Sánchez es natural de Calamonte, Extremadura. Es Ingeniero Técnico de Telecomunicación en la especialidad de Sonido e Imagen por la Universidad de Extremadura desde 2010, habiendo realizado esta titulación en la Escuela Politécnica de Cáceres. Ha realizado su Proyecto Final de Carrera "Localización de fuentes sonoras utilizando un array de micrófonos con LabVIEW", en el Laboratorio de Medición Acústica de la Fakultät Naturwissenschaften und Technik (Facultad de Ciencias Naturales y Tecnología) de la HAWK University, en la ciudad de Göttingen, Alemania, a través del programa de intercambio académico ERASMUS. Su Proyecto Final de Carrera fue calificado con Matrícula de Honor. Ha realizado seis meses de prácticas en acústica en la empresa Soundtec GmbH, también en la ciudad de Göttingen, Alemania, mediante el programa de intercambio Faro Global. En 2011 realiza el Máster Universitario en Postproducción Digital de Audio y Video de la Universidad Politécnica de Valencia, en la Escuela Politécnica Superior de Gandía. En 2012, a través del programa de intercambio académico PROMOE, realiza su Tesina Final de Máster "cityfieldrecordings project" (<http://cityfieldrecordings.blogspot.com>) en CREAMA (Centre for Research of Electro-Acoustic Music and Audio), en la Hanyang University de Seúl, Corea del Sur. Su TFM fue calificado con una nota de 10. Posteriormente, con la intención de actualizar sus estudios universitarios y adaptarlos al Espacio Europeo de Educación Superior, realiza el Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Sonido e Imagen en la Escuela Politécnica Superior de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia. En abril de 2013 y hasta enero de 2014 realiza una beca de colaboración de la que deriva el presente Proyecto Final de Grado en el Grupo de Tratamiento de la Señal del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia de la UPV.

Contacto: moreno.benigno@gmail.com

Agradecimientos

Quisiera agradecer al Profesor Jorge Gosálbez el haberme dado la oportunidad de realizar este Trabajo Final de Grado en y para el Grupo de Tratamiento de la Señal del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia. Quisiera también agradecer a los compañeros del laboratorio: Gonzalo, Alicia, Guille, Patricia, Arturo, Jorge y al profesor Ramón Miralles, a todos ellos, por su ayuda y sus consejos, por haber hecho más que agradable el tiempo que he pasado en el Grupo de Tratamiento de la Señal y por esos estupendos ratos tras un espontáneo "¿almorzamos?".

Benigno Moreno Sánchez

Preámbulo

“Desarrollo de un sistema ultrasónico TOFD configurable” es el Trabajo Final del Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Sonido e Imagen de la Universidad Politécnica de Valencia, impartido en la Escuela Politécnica Superior de Gandía. El presente Trabajo Final de Grado, en adelante TFG, ha sido realizado por mi persona, Benigno Moreno Sánchez, a través de una Beca de Colaboración en el Grupo de Tratamiento de la Señal (GTS) del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM), en la Ciudad Politécnica de la Innovación de la Universidad Politécnica de Valencia, entre los meses de abril de 2013 y enero de 2014 y ha sido dirigido por el Profesor Dr. Jorge Gosálbez Castillo.

Resumen

En el presente Trabajo Final de Grado, Desarrollo de un sistema TOFD configurable, se desarrolla un sistema para la aplicación de la técnica de Ensayos No Destructivos TOFD (*Time of flight diffraction*) o tiempo de vuelo de la difracción, que utiliza señales ultrasónicas, para inspeccionar principalmente material base y determinar y registrar el tamaño real de un defecto.

La primera parte del sistema consiste en una aplicación software con una interfaz gráfica de usuario para el control y la configuración del sistema compacto comercial ULTRASCOPE TOFD; del encoder óptico rotatorio, conectado a través del microcontrolador Arduino; y de las distintas visualizaciones gráficas disponibles; entre otros aspectos.

Mediante la aplicación desarrollada se emiten pulsos ultrasónicos a través de uno de los transductores piezoeléctricos conectados al sistema ULTRASCOPE, el cual funciona como emisor, a través del otro transductor piezoeléctrico situado en el mismo plano que el transductor emisor, se reciben los pulsos ultrasónicos emitidos por el primer transductor y los cuales han sido difractados por heterogeneidades en el interior del material o reflejados desde el fondo.

La segunda parte consiste en un sistema mecanizado adaptable donde acoplar el encoder óptico rotatorio y los transductores piezoeléctricos, para poder realizar inspecciones espaciales en materiales.

La unión de la aplicación software y el sistema mecanizado, permite la toma de forma automatizada de señales ultrasónicas TOFD a lo largo de la pieza. Esto le confiere al sistema la capacidad de obtener trazas temporales equiespaciadas A-Scan para posteriormente formar imágenes B-Scan que equivalen a una "radiografía" interna del material inspeccionado. El sistema también ofrece la posibilidad de configurar un gran número de parámetros.

Palabras clave: TOFD, Ensayos No Destructivos, difracción, ultrasonidos, señales, material base, defectología, desarrollo software, interfaz gráfica de usuario, GUI, ULTRASCOPE, encoder, Arduino, transductores piezoeléctricos, mecanizado, inspecciones, A-Scan, B-Scan.

Abstract

In the current Bachelor's Thesis, Development of a configurable TOFD system, is developed a system for the application of the Non Destructive Technique TOFD (Time of flight diffraction), which uses ultrasonic signals in order to explore mainly base material and determine and register the real size of a defect.

The first part of the system consists of a software application with a graphical user interface, for the control and the configuration of the compact commercial system ULTRASCOPE TOFD; of the optical rotatory encoder, connected through the Arduino microcontroller; and the different available graphical visualizations; among other aspects.

By means of the development application, ultrasonic pulses are emitted through one of the piezoelectric transducers connected to the ULTRASCOPE system, which works as transmitter; through the other piezoelectric transducer, placed in the same level than the emitter transducer, emitted ultrasonic pulses by the first transducer are received, these received ultrasonic pulses have been diffracted by heterogeneities in the interior of the material, or reflected by the bottom.

The second part consists on an adaptable mechanized system where to adapt the optical rotatory encoder and the piezoelectric transducers, in order to make spacial inspections in the materials.

The merge of the software application and the mechanized system, permits the automatized TOFD ultrasonic signals acquisition along the piece. This gives to the system the capacity to obtain equispaced temporary traces A-Scan to subsequently make B-Scan images, which are equivalent to an internal "radiography" of the inspected material. The system also offers the possibility of a large number of parameters' configuration.

Keywords: TOFD, Non Destructive Technique, diffraction, ultrasounds, signals, base material, defectology, software development, graphical user interface, GUI, ULTRASCOPE, encoder, Arduino, piezoelectric transducers, mechanized, inspections, A-Scan, B-Scan.

1. Introducción

Las técnicas de Ensayos No Destructivos y en particular las que utilizan ultrasonidos para la detección de heterogeneidades en materiales, como la técnica TOFD, utilizada en este TFG, han evolucionado mucho en los últimos años gracias, sobre todo, a la evolución de la informática. Dispositivos avanzados electrónicamente como el sistema ULTRASCOPE TOFD, hacen que la inspección de materiales en tiempo real sea posible hoy en día de forma económica y sin la necesidad de dispositivos extremadamente potentes y complejos.

1.1. Objetivos

El objetivo de este TFM es desarrollar un sistema configurable para poder utilizar la técnica TOFD de Ensayos No destructivos para la inspección de heterogeneidades en materiales. Una parte del sistema consistirá en el desarrollo de una aplicación software con una interfaz gráfica desde la que configurar y controlar el sistema ULTRASCOPE TOFD y un encoder óptico rotatorio, y visualizar las trazas temporales A-Scan así como las imágenes B-Scan; la otra parte consistirá en el desarrollo de un sistema mecanizado adaptable donde acoplar el encoder óptico rotatorio y los transductores piezoeléctricos, para poder realizar las inspecciones espaciales en materiales de forma automatizada.

1.2. Organización de la memoria

La organización de la presente memoria consiste en un primer capítulo, el actual, con una breve introducción sobre la citada memoria. En el segundo capítulo, "Estado del arte", se hace una descripción teórica de conceptos necesarios para el entendimiento del TFG. Las herramientas software y hardware utilizadas se describen en el capítulo 3. Ya en el capítulo 4 se describe el desarrollo hardware que se ha realizado, que corresponde a la parte en la que se desarrolla un sistema mecanizado para la inspección espacial en materiales. En el capítulo 5 se trata el desarrollo de la aplicación software. Finalmente en el capítulo 6 se comenta brevemente la pequeña campaña experimental realizada de forma complementaria. Para concluir la memoria se citan unas conclusiones, unos desarrollos futuros y se incluyen dos anexos. El primer anexo es un manual de

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

instalación del sistema desarrollado, tanto la configuración hardware como la configuración software. El segundo anexo es un manual de usuario para la aplicación software desarrollada.

2. Estado del arte

En el presente capítulo se van a tratar los conceptos teóricos de los ultrasonidos, qué son los ensayos no destructivos y la técnica TOFD dentro de los ensayos no destructivos. Se abordará además cómo los ultrasonidos son utilizados para la realización de ensayos no destructivos y específicamente cómo son utilizados los ultrasonidos en la técnica TOFD.

2.1. Ultrasonidos

Se van a introducir brevemente conceptos básicos de las ondas acústicas en general y se desarrollarán algo más conceptos específicos de ultrasonidos.

2.1.1. Propagación de ondas acústicas (ondas mecánicas)

Cuando un medio elástico es perturbado por una acción instantánea o continua hace que esta perturbación se propague a través del referido medio, mediante lo que se llama movimiento ondulatorio u onda.

Esta propagación no supone traslación real de la materia, sino transmisión de energía. Así, cada partícula afectada por la perturbación, se desplaza de su posición de equilibrio, tendiendo a volver a la posición de reposo, y sobrepasando la misma pendularmente en un movimiento vibratorio armónico.

El movimiento vibratorio armónico se define por los parámetros: amplitud y frecuencia. Asimismo, los parámetros que definen la propagación real a través de un medio son: longitud de onda y velocidad acústica. Todos estos parámetros tipifican el movimiento ondulatorio y la transmisión de ondas acústicas. Esta transmisión de ondas acústicas, se realiza por la transmisión de energía de unas partículas a sus adyacentes mediante sus enlaces elásticos, por tanto es necesario un soporte material, ya sea sólido, líquido o gaseoso. [1]

Parámetros de las ondas acústicas

- La amplitud es el desplazamiento máximo de la partícula de su posición de equilibrio.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

- La frecuencia es el número de oscilaciones completas que la partícula realiza por segundo. Se mide en ciclos por segundo o en Herzios¹ (o Herzios por segundo). 1 ciclo por segundo es igual a 1 Herzio.
- La longitud de onda es la distancia entre dos planos de partículas que se encuentran en el mismo estado de movimiento. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, estando además relacionada con la velocidad acústica.
- La velocidad acústica es la velocidad de propagación de la onda acústica a través del medio. Es característica de cada material y, sobre todo en líquidos y gases, no tanto en sólidos, es dependiente de la presión y de la temperatura.
- La velocidad máxima de vibración es la velocidad propia de la partícula en su movimiento oscilatorio.
- La presión acústica en los puntos de gran densidad de partículas es mayor que la normal, mientras que en zonas dilatadas es menor.
- La fase es la condición instantánea dentro de una oscilación.
- La atenuación es la disminución de la amplitud de una oscilación en función del tiempo. La atenuación es debida a la suma de la dispersión y la absorción.

2.1.2. Tipos de ondas acústicas

Las ondas acústicas se dividen en tres grupos: la infrasónica, con frecuencias de oscilación menores a 16 Hz; la sónica, sonidos audibles para el ser humano, siempre que tenga un mínimo de presión acústica necesaria para ser registrada por el oído o no sobrepase la presión máxima soportable por el mismo, que está comprendida en el rango 16 Hz a 20 kHz; y finalmente la ultrasónica, donde las oscilaciones son mayores a 20 kHz. [1]

2.1.3. Producción de ultrasonidos

Los métodos más utilizados para producir vibraciones con frecuencias ultrasónicas son a través del fenómeno conocido como piezoelectricidad.

La piezoelectricidad es un fenómeno que aparece en ciertos materiales naturales y sintéticos y se refiere al cambio de dimensiones de un material sólido cuando se aplica una carga eléctrica a las caras del cristal obtenido del mismo. Los cristales que presentan el efecto piezoeléctrico son los que no tienen centro de simetría; si se les aplica un campo alterno, vibrarán a cierta frecuencia y transmitirán su vibración al medio que les rodea. En el caso de hacer trabajar a los cristales piezoeléctricos a su frecuencia de resonancia, la energía transmitida es máxima.

¹En honor al físico alemán Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894).

2.1.4. Propagación de ultrasonidos

El haz sónico que sale del cristal piezoeléctrico se transmite a través de un medio de acoplamiento (aceite, silicona, gel, etc.) [1], para minimizar la alteración de la onda ultrasónica al cambiar de material.

Además de al cambiar de material, las ondas ultrasónicas sufren alteraciones al atravesar imperfecciones de los propios materiales a través de los que se propagan.

Las ondas ultrasónicas, al propagarse a través de una frontera, entre un material y otro, experimentan alteraciones en su dirección, intensidad y modo de vibración. El límite o frontera entre medios se denomina interfaz y la forma en la que la onda incide puede ser perpendicular u oblicua.

Incidencia perpendicular o normal de la onda ultrasónica

Al incidir la onda ultrasónica de forma perpendicular en la interfaz entre los dos medios, una parte de su energía es reflejada y otra transmitida con la misma dirección y sentido.

Incidencia angular u oblicua de la onda ultrasónica

Al incidir la onda ultrasónica con un determinado ángulo α_i (figura 2.1) respecto a la normal sobre una interfaz entre dos medios de diferentes impedancias, una parte de la onda se refleja y otra se transmite al segundo medio, produciéndose el fenómeno de la refracción, donde el haz transmitido cambia su dirección de propagación.

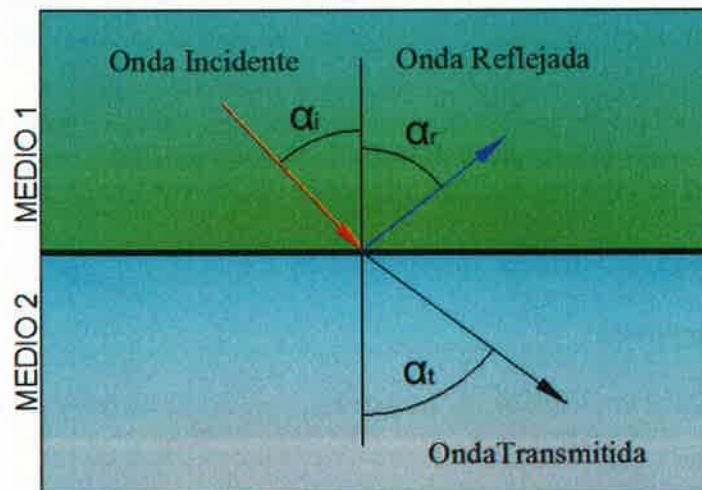


Figura 2.1.: Incidencia angular de las ondas.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Los ángulos de reflexión y refracción dependen directamente del ángulo de incidencia y de la velocidad de propagación del sonido en los diferentes medios, relacionándose éstos mediante la ley de Snell².

Además aparece un desdoblamiento de la onda incidente (figura 2.2), ya sea longitudinal o transversal, originando dos ondas reflejadas y dos ondas refractadas, para cada caso una de tipo longitudinal y otra de tipo transversal.

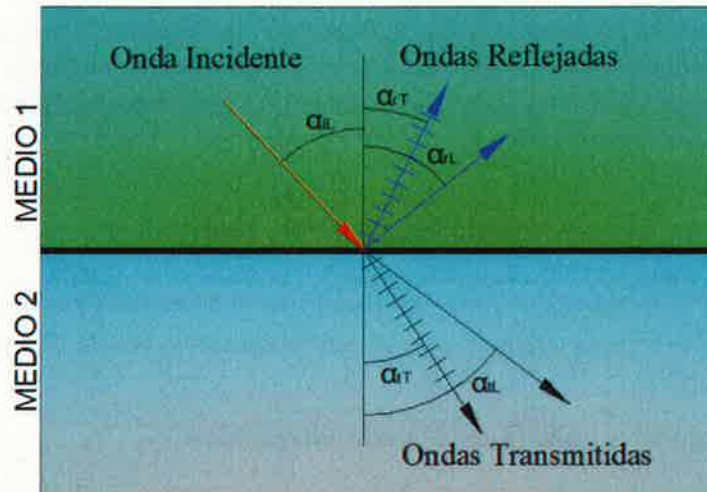


Figura 2.2.: Reflexión y refracción de onda con incidencia angular.

Al intercalarse entre los materiales un medio de acoplamiento o cuña acústicamente conductora, se sigue verificando la ley de Snell entre el primer material y el tercero, aunque se produce un pequeño desplazamiento paralelo de la onda. [2]

Cabe indicar que la propagación de los ultrasonidos conlleva una gran absorción, por lo que el aire podría considerarse prácticamente opaco para los ultrasonidos. [3]

2.1.5. Tipos de ondas ultrasónicas

Ondas longitudinales

Se caracterizan por la oscilación de las partículas en la misma dirección que el sentido de propagación de la onda.

²La ley de Snell es una fórmula utilizada para calcular el ángulo de refracción de ondas ópticas y acústicas al atravesar la superficie de separación entre dos medios por los que se propaga.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Ondas transversales

Se caracterizan porque la vibración de las partículas es perpendicular al sentido de la propagación de las ondas.

Ondas superficiales (o Rayleigh)

Son un caso particular de la onda transversal. En este caso, las ondas ultrasónicas se propagan únicamente en la superficie plana o curva de un sólido siguiendo su contorno e irregularidades.

Ondas Lamb

Se obtienen en materiales cuyo espesor es del orden de la longitud de onda. Al transmitirse la onda ultrasónica vibra todo el material en conjunto, propagándose paralelamente a su superficie y en la dirección del impulso recibido. Existen dos tipos de estas ondas: simétricas de compresión y asimétricas de flexión.

Ondas de borde

Se producen por difracción cuando un haz ultrasónico incide sobre el borde de una discontinuidad y desvía las ondas alrededor de los bordes y esquinas en diferentes direcciones.

2.1.6. Aplicaciones de los ultrasonidos

El interés práctico del empleo de los ultrasonidos reside, bien sea en el aprovechamiento de la energía transmitida, o bien en el análisis del rayo ultrasónico que pasa de un medio a otro de diferente impedancia acústica.

Las aplicaciones pueden clasificarse ateniéndose a la gama de frecuencias:

Frecuencias entre aproximadamente 30 y 100 kHz se utilizan en procesos industriales como comunicaciones, navegación y pesca, química, biología, soldadura, mecanizado, colada-moldeo, etc.

Frecuencias entre aproximadamente 100 kHz y 100 MHz se utilizan en control de calidad para ensayos de defectología, metrología y caracterización.

2.2. Ensayos No Destructivos

Los ensayos no destructivos, también conocidos por sus siglas END o por su nombre en inglés *Non Destructive Techniques* (NDT), son cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo. Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada.

La amplia aplicación de los métodos de ensayos no destructivos en materiales se encuentran resumidas en los tres grupos siguientes:

- Defectología. Permite la detección de discontinuidades, evaluación de la corrosión y deterioro por agentes ambientales; determinación de tensiones; y detección de fugas.
- Caracterización. Evaluación de las características químicas, estructurales, mecánicas y tecnológicas de los materiales; propiedades físicas (elásticas, eléctricas y electromagnéticas); transferencias de calor y trazado de isotermas.
- Metrología. Control de espesores; medidas de espesores por un solo lado, medidas de espesores de recubrimiento; niveles de llenado.

2.2.1. Ultrasonidos en los END

Dentro de los ensayos no destructivos, los ultrasonidos se han empleado junto a otras técnicas para la búsqueda de defectos internos en estructuras metálicas. Las soldaduras ocupan un lugar especial en este empeño y durante años los métodos ultrasónicos basados en leyes de reflexión han acompañado a los rayos X y a la gammagrafía en la detección de grietas y defectos internos. Otras técnicas como líquidos penetrantes y partículas magnéticas, han estado más orientadas a la búsqueda de defectos superficiales.

Como consecuencia de los problemas de aplicación y seguridad que presentan los rayos X y la gammagrafía, en los últimos años se están sustituyendo estas técnicas por técnicas ultrasónicas.

Los ultrasonidos han evolucionado en los últimos tiempos como consecuencia del desarrollo de la electrónica digital así como de nuevos materiales para transductores. Esto ha permitido pasar de un concepto de ensayo ultrasónico convencional, mediante técnicas de reflexión, a un ensayo con técnicas de difracción que conduce a la formación de un nuevo tipo de imagen conocida por las siglas TOFD. [4]

2.3. Técnica TOFD

La técnica TOFD (del inglés *Time Of Flight Diffraction*), tiempo de vuelo de la difracción, es una nueva tecnología de ensayo no destructivo. Esta técnica utiliza imágenes ultrasónicas para determinar y registrar el tamaño real de un defecto. Su ámbito se centra fundamentalmente en la detección de defectos en elementos metálicos como soldaduras, aunque también se están empezando a aplicar en otros sectores como el constructivo.

La técnica TOFD utiliza las diferencias de las señales difractadas sobre la base de tiempo para evaluar el tamaño de un defecto [4]; de ahí su nombre, que indica la medición del tiempo de vuelo y/o retardo de la onda difractada. [2]

Gracias a su bajo coste y al escaso tiempo empleado en realizar inspecciones, esta técnica está teniendo actualmente un gran desarrollo y aceptación.

2.3.1. Configuración de la técnica TOFD

Esta técnica emplea dos transductores, también llamados palpadores, de incidencia angular, trabajando uno en transmisión y otro en recepción, enfrentados a una cierta distancia. En la figura 2.3 se puede apreciar un esquema general de la disposición de los palpadores sobre la pieza de ensayo. En la citada figura se pueden observar también la trayectoria de las diferentes ondas que son registradas por el receptor (R) ante una única fuente de emisión (T).

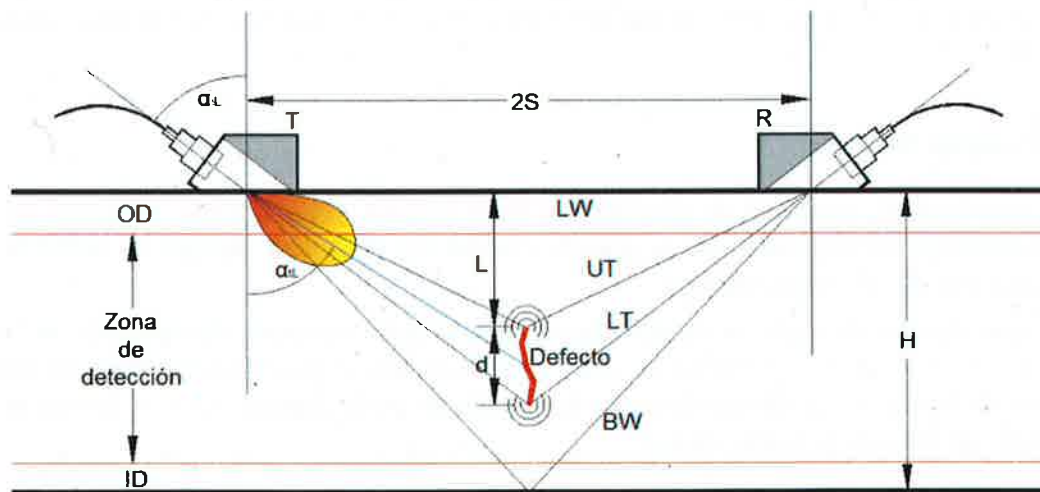


Figura 2.3.: Configuración general de la técnica TOFD.

Esta técnica mide los diferentes tiempos de vuelo que toma la onda en llegar al receptor. El tipo de ondas mayormente utilizadas son las longitudinales, debido a que tienen un alto coeficiente de difracción y una mayor rapidez de propagación dentro del material.

2.3.2. Parámetros de la técnica TOFD

Los parámetros de la técnica TOFD que se explican a continuación se pueden apreciar en la figura 2.3.

Se necesitan un mínimo de dos transductores³, T, transmisor y R, receptor, enfrentados entre sí a una distancia de separación, $2S$, medido entre los ejes de los cristales piezoeléctricos.

Considerando la existencia de un solo defecto en el material de prueba, al emitirse una onda ultrasónica desde el transductor transmisor sobre la pieza a inspeccionar, son cuatro los pulsos que se registran a diferentes tiempos de vuelo en el receptor: el primero es la onda lateral (LW), que es una onda longitudinal que viaja en una trayectoria muy cerca de la superficie de la probeta; el último pulso recibido en el receptor es el eco de fondo (BW), también onda longitudinal; y entre estas dos ondas características se observan las trayectorias que tomarían los pulsos difractados en los bordes superior e inferior del defecto, y el tiempo en el que son registrados estos pulsos por el receptor estarán comprendidos entre la onda lateral, primer pulso recibido, y el eco de fondo, último pulso recibido.

Trayectorias de las ondas

Las ondas difractadas por el defecto se denominan: onda de borde superior (UT) y onda de borde inferior (LT), donde sus trayectorias dependerán tanto de la posición relativa del defecto entre los dos transductores, como de su inclinación. En estos dos parámetros influyen la profundidad del defecto (L) y la longitud de la discontinuidad (d).

Tiempos de vuelo

Conociendo la velocidad de propagación de la probeta inspeccionada, así como las trayectorias correspondientes, se pueden calcular los diferentes tiempos de vuelo de cada una de las ondas descritas.

Estos tiempos de vuelo se pueden observar en la señal temporal representada en la figura 2.4, siendo t_{LW} el tiempo de vuelo de la onda lateral, t_{BW} el tiempo de vuelo del eco de fondo, t_{UT} el tiempo de vuelo de la onda de borde superior y t_{LT} el tiempo de vuelo de la onda de borde inferior.

Ángulos de refracción

El ángulo de refracción o transmisión de las ondas longitudinales (α_{tL}) depende del tipo de material inspeccionado y de sus correspondientes ángulos de incidencia

³Existen variables de la técnica TOFD que emplean más de dos transductores.

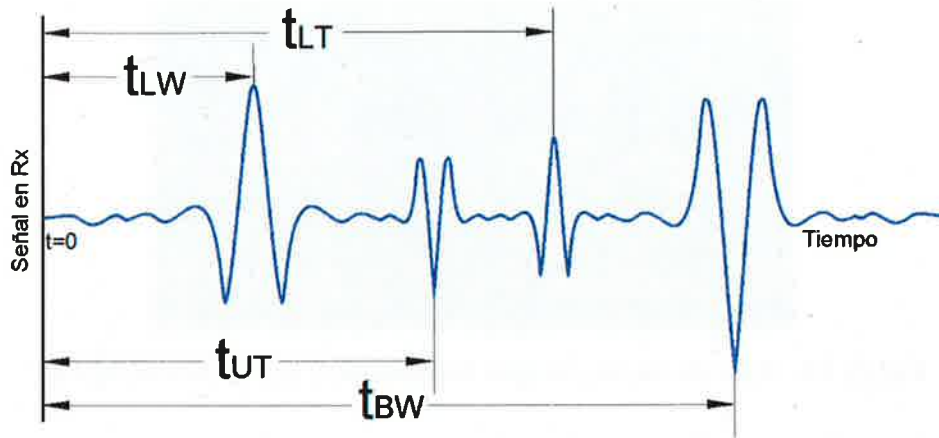


Figura 2.4.: Señal temporal

(α_{iL}), pudiendo ser éste último variable en algunos transductores o fijo según la cuña de acople que se utilice.

Zonas muertas

Una de las desventajas de la técnica TOFD es que existen dos zonas muertas, la primera está cercana a la superficie superior (OD) y la segunda está cercana a la superficie inferior (ID) de la probeta de inspección. En estas zonas, por lo general, no se pueden llegar a dimensionar con exactitud el tamaño de los defectos, pero sí detectarlos cuando éstos están abiertos al exterior.

Siendo H el espesor del material de inspección, estas dos zonas muertas pueden reducirse mediante la disminución de la distancia $2S$ existente entre los dos transductores y el empleo de tiempos más cortos de excitación del transductor. [2]

2.3.3. A-Scan y B-Scan

La técnica TOFD se identifica por el empleo de una imagen bidimensional similar a la de la figura 2.5, en la cual se visualizan y caracterizan las discontinuidades y/o defectos que pueda tener el material inspeccionado.

Estas imágenes bidimensionales reciben el nombre de B-Scan, y están conformadas por un elevado número de trazas temporales denominadas A-Scan. En la figura 2.6 se muestra el proceso para la obtención de la imagen B-Scan a partir de trazas temporales A-Scan registradas por el transductor receptor, para lo que es necesario el desplazamiento sincronizado de los palpadores de forma paralela al eje de inspección y la toma de medidas equiespaciadas.

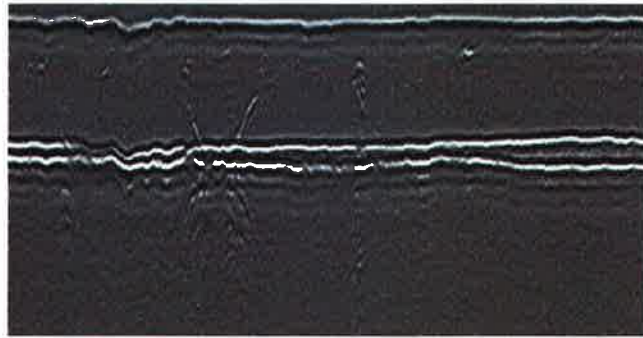


Figura 2.5.: Ejemplo de una imagen bidimensional con la técnica TOFD.

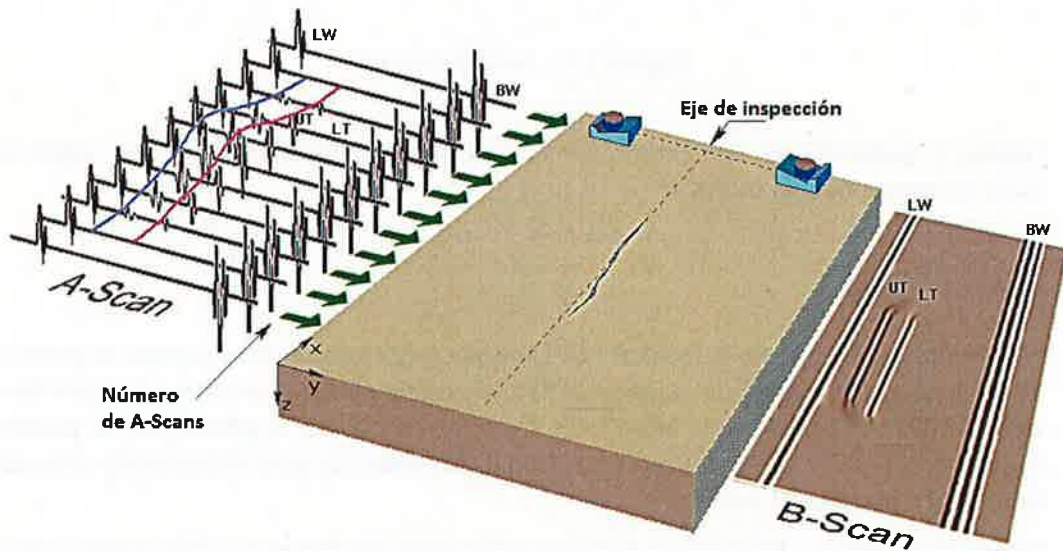


Figura 2.6.: Proceso de formación de imagen B-Scan a partir de trazas A-Scan.

A-Scan

La representación A-Scan muestra la cantidad de energía ultrasónica recibida en función del tiempo. La cantidad relativa de energía recibida es mostrada a lo largo del eje vertical y el tiempo transcurrido es mostrado a lo largo del eje horizontal. [5]

En los A-Scan las ondas laterales presentan una fase invertida respecto a las ondas reflejadas, así como también lo hacen las ondas difractadas, una respecto a la otra. Este fenómeno ha de tenerse en cuenta a la hora de dimensionar el defecto. [2]

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

B-Scan

La representación B-Scan es una vista de perfil del espécimen inspeccionado. El tiempo de vuelo de la energía ultrasónica es mostrada a lo largo del eje vertical, la posición lineal del transductor es mostrado a lo largo del eje horizontal, mientras que el color de la imagen representa el nivel de la señal. A partir del B-Scan se puede determinar la profundidad de la discontinuidad y/o defecto y su dimensión lineal aproximada. [5]

3. Herramientas

En este capítulo se hace una descripción de las características más relevantes de las herramientas, tanto hardware como software, utilizadas para el desarrollo del presente TFM.

3.1. Sistema ULTRASCOPE TOFD

El sistema compacto ULTRASCOPE TOFD (figura 3.1) se comenzó a desarrollar en el IAI (Instituto de Automática Industrial) del CSIC (Centro Superior de Investigaciones Científicas), para posteriormente pasar a ser desarrollado plenamente por la empresa iberoamericana DASEL, S.L.¹.



Figura 3.1.: Sistema ULTRASCOPE TOFD

Es un sistema que utiliza señales ultrasónicas para la aplicación de la técnica de ensayos no destructivos TOFD. Se basa en tecnología FPGA² y, por tanto, puede ser configurado por diferentes lenguajes de programación. En el presente TFG se ha trabajado con librerías desarrolladas para configurar el sistema ULTRASCOPE TOFD con el lenguaje de programación MATLAB.

¹Web corporativa de DASEL S.L.: www.daselsistemas.com

²FPGA, del inglés *Field-Programmable Gate Array*, es un circuito integrado diseñado para ser configurado por el usuario.

3.1.1. Características técnicas ULTRASCOPE TOFD

Características técnicas del sistema ULTRASCOPE TOFD utilizadas para el presente TFG atendiendo a las necesidades del mismo.

Pulser

- Pulso de disparo: onda cuadrada negativa
- Ancho del pulso programable de 40 ns a 2000 ns
- Número de pulsos (modo ráfaga) programable de 1 pulso a 16 pulsos
- Amplitud pulso programable de 20 V a 400 V

Receptor: Amplificador

- Amplificador de bajo ruido y banda ancha
- Ganancia programable de 0 dB a 80 dB
- Máxima señal de entrada 1.4 Vpp
- Impedancia de entrada 1.6 kOhmios

Receptor: Digitalización (Convertor A/D)

- Resolución 10 bits
- Frecuencia de muestreo programable 5 MHz a 26.67 MHz

Receptor: Modos de recepción

- Pulso-eco
- Transmisión

Receptor: Otros

- Tiempo de adquisición (retardo inicial) programable de 375 us a 2000 us
- Atenuador programable de 0 dB o -20 dB

Modos de disparo

- Interno por software

CAPÍTULO 3. HERRAMIENTAS

Otros

- Consumo: 900 mA (5 V) máximo
- Alimentación: 100-220 V, 47-63 Hz, fusible 2 A
- Dimensiones: 150 x 106 x 38 mm
- Peso: 0.45 kg
- Sistema operativo: Microsoft Windows XP
- Interfaz: USB 2.0
- Memoria interna: 1 MByte

3.1.2. Conexiones para transductores

Conexiones del sistema ULTRASCOPE TOFD para conectar los transductores piezoeléctricos emisor y receptor.

LEMO EPL.00.250.NTN (receptáculo) Un conector para un transductor que en modo "Transmisión" funcionará como emisor, y en modo "Pulso-Eco" funcionará como emisor/receptor (E/R en la figura 3.1).

Otro conector para un transductor que funcionará como receptor en modo "Transmisión" (R en la figura 3.1).

3.2. Transductores piezoeléctricos

Los transductores piezoeléctricos utilizados durante el desarrollo del presente TFG para generar ondas ultrasónicas han sido principalmente dos modelos de Krautkrämer: dos unidades del MUWB 2-N de 2 MHz y ángulo variable (figura 3.2a) y dos unidades del KB-A 66492 de 5 MHz de cuña acoplable (figura 3.2b). Las cuñas acoplables poseen diferentes ángulos de incidencia.

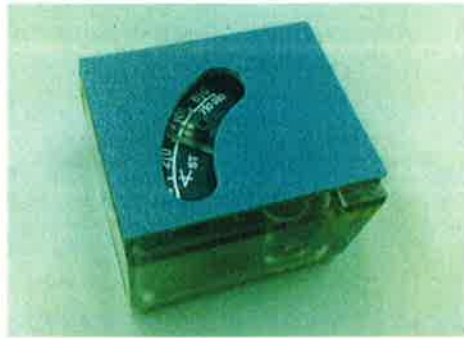
Ambos transductores son de haz angular, de elemento piezoeléctrico sencillo. Estos transductores permiten que el haz ultrasónico sea introducido en el material de prueba con un ángulo determinado.

Ambos modelos se conectan al sistema ULTRASCOPE TOFD mediante conectores LEMO ABF.00.250.CTA, adaptados a BNC.

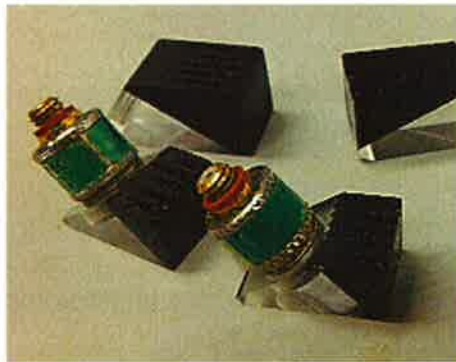
3.2.1. Gel ultrasónico

Se ha utilizado un gel ultrasónico como medio de acoplamiento entre los transductores piezoeléctricos y el material a inspeccionar.

CAPÍTULO 3. HERRAMIENTAS



(a) MUWB 2-N de 2 MHz y ángulo variable.



(b) KB-A 66492 de 5 MHz y cuñas acoplables.

Figura 3.2.: Transductores piezoeléctricos Krautkrämer.

3.3. Encoder rotatorio

El encoder rotatorio utilizado es un encoder óptico incremental Kübler modelo 05.2400.1122.0500 (figura 3.3), de 24 mm de diámetro, sistema push-pull con señal invertida, alimentación de 5 a 24 V DC y 50 mA, y una tasa de 500 pulsos por vuelta.

Se han utilizado 4 de las 8 señales disponibles en el encoder rotatorio para interconectarlo a través de Arduino a la aplicación desarrollada en MATLAB. Una señal para la alimentación de 5 V, otra para tierra (GND) y otras dos para las señales A y B respectivamente. El encoder rotatorio, a través de Arduino, se alimenta e indica a la aplicación desarrollada el número de pulsos incrementales que realiza.

CAPÍTULO 3. HERRAMIENTAS



Figura 3.3.: Encoder rotatorio óptico Kübler.

3.4. Arduino

Arduino³ es una plataforma de hardware libre basada en una placa microcontroladora y en un entorno de desarrollo.

3.4.1. Arduino Uno

El Arduino Uno Rev. 2 (figura 3.4) es el modelo de placa microcontroladora utilizado en este TFG.

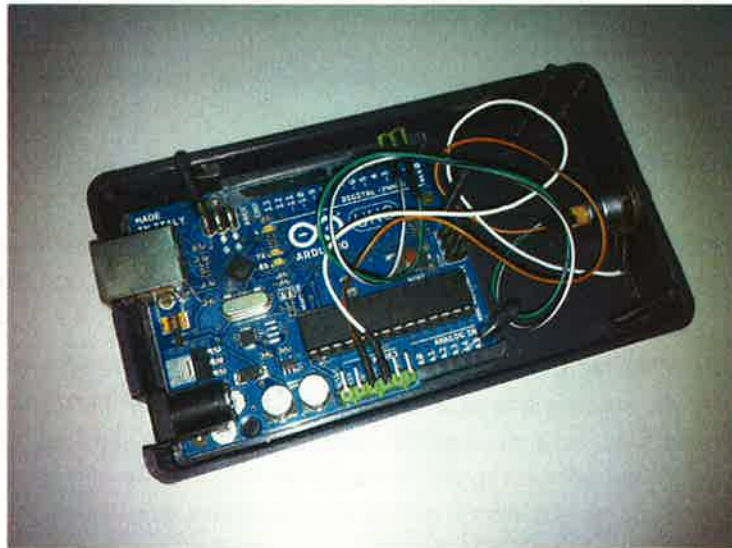


Figura 3.4.: Arduino Uno.

Se ha utilizado Arduino Uno como puente entre el encoder rotatorio y la aplicación desarrollada con MATLAB en el PC. A través del Arduino Uno, el encoder rotatorio se

³Más información sobre Arduino en www.arduino.cc. Pera.

CAPÍTULO 3. HERRAMIENTAS

alimenta e indica a la aplicación desarrollada el número de pulsos incrementales que realiza.

Se han utilizado 2 de los 14 pines de entrada/salida digitales, uno para la señal A del encoder rotatorio y otra para la señal B, además de los pines de 5 V y tierra (GND) para la alimentación del encoder.

3.4.2. IDE de Arduino

El software de Arduino consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring y el cargador de arranque que es ejecutado en la placa.

La comunicación de la placa microcontroladora Arduino Uno con MATLAB se realiza mediante un sketch específico cargado en la placa, mediante el IDE⁴ de Arduino, y una librería específica, utilizada en MATLAB.

3.5. Ordenador personal

Se ha utilizado un PC u ordenador personal, con MATLAB instalado, como máquina donde interconectar el microcontrolador Arduino y el sistema ULTRASCOPE TOFD y desde el cual operar todo el sistema.

3.6. MATLAB

MATLAB es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para cómputo numérico, visualización y programación. MATLAB permite analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos y aplicaciones. El lenguaje de programación de alto nivel, las herramientas y las funciones matemáticas "built-in" permiten una rápida resolución de problemas. MATLAB es utilizado en un gran número de aplicaciones, como procesado de señal y comunicaciones, procesado de imágenes y vídeo, sistemas de control, mediciones, etc. [6]

En el presente TFG se utilizan unas librerías⁵ para poder trabajar con MATLAB como entorno para el control y la comunicación con el sistema ULTRASCOPE TOFD.

En MATLAB se desarrolla el software para el control y la comunicación con el sistema ULTRASCOPE TOFD, el control y la comunicación con el encoder a través de la microcontroladora Arduino y la interfaz gráfica de usuario.

⁴IDE, del inglés *integrated development environment*, entorno de desarrollo integrado.

⁵Estas librerías han sido suministradas por DASEL S.L.

4. Desarrollo Hardware

Se ha desarrollado un sistema mecanizado para realizar las inspecciones mediante la técnica TOFD y así obtener, mediante trazas temporales A-Scan, imágenes B-Scan. Este sistema se ha desarrollado de tal manera que sea ajustable y adaptable según las necesidades.

En la figura 4.1 se aprecian dos visualizaciones de la configuración que se le ha dado inicialmente al sistema mecanizado para inspeccionar piezas de ensayo como la que se aprecia en las dos visualizaciones de la citada figura.

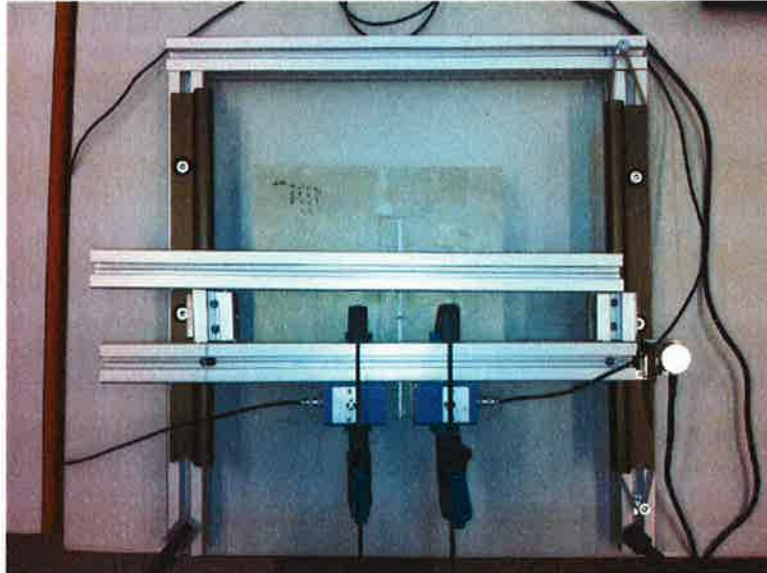
El sistema mecanizado, como se aprecia en la figura 4.1, posee los siguientes elementos ajustables y adaptables:

- Una estructura-base en forma de U, formada por tres piezas.
- Dos guías paralelas entre sí sobre los dos lados paralelos de la estructura-base.
- Un raíl dentado en un lateral de una de las guías donde hacer rodar el encoder rotatorio.
- Una estructura-puente deslizable sobre las guías mediante adaptadores precisos.
- Un adaptador a uno de los lados del puente, el mismo lado donde se encuentra el raíl dentado, para acoplar el encoder rotatorio.
- Dos pinzas para acoplar libremente los dos transductores, el emisor y el receptor, a la estructura-puente.

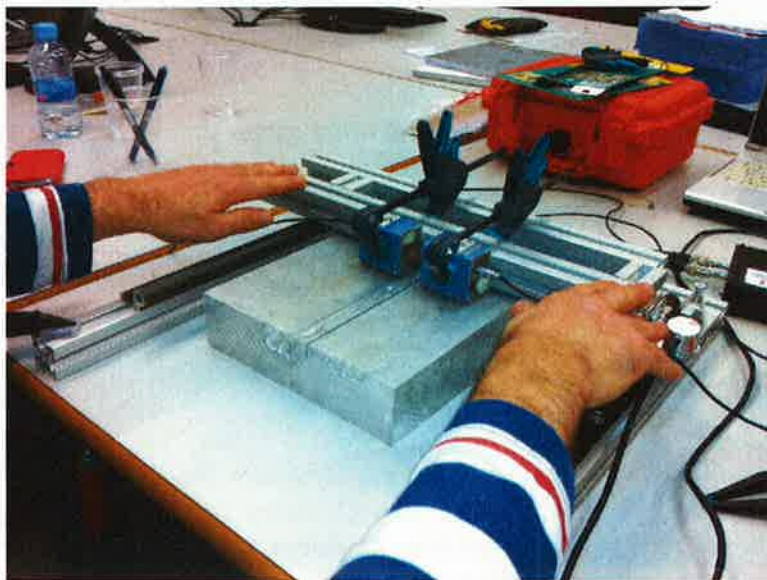
Para realizar las inspecciones la estructura-base se ancla a una superficie con el método más óptimo, según lo que se vaya a inspeccionar y en qué superficie; durante el presente TFM se han utilizado sargentos para anclar la estructura-base a la mesa, ya que las piezas inspeccionadas se han colocado sobre la mesa y se ha regulado la altura del sistema mecanizado para que los transductores pudieran deslizarse sobre la pieza a inspeccionar. Se ajustan, mediante las dos pinzas, la distancia entre los transductores piezoeléctricos y se afina en la regulación de la altura de éstos con respecto a la pieza a inspeccionar. Se actúa manualmente sobre la estructura-puente deslizándola con un movimiento suave y continuado sobre la zona de la pieza que se quiera inspeccionar, siguiendo el recorrido de las guías paralelas, por tanto, la zona a inspeccionar ha de encontrarse dentro de los límites del recorrido de la estructura-puente sobre las dos guías paralelas.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO HARDWARE

La zona de inspección máxima es de 40 cm y viene condicionada por la longitud máxima del soporte menos el margen de los patines. Por otro lado, la separación máxima de los transductores es de 25 cm y viene condicionada por la anchura del puente.



(a)



(b)

Figura 4.1.: Sistema mecanizado para inspecciones mediante técnica TOFD.

5. Desarrollo Software

5.1. Análisis

En esta fase se define el problema para que pueda ser analizado con todo detalle.

La idea general del problema es desarrollar una aplicación con una interfaz gráfica de usuario para determinar:

- La configuración de la FPGA Ultrascope TOFD para realizar la emisión de pulsos.
- Realizar la adquisición de pulsos de manera manual o de manera automática según la posición de un encoder externo, conectado a través del microcontrolador Arduino.
- Tratar los datos de los pulsos adquiridos, visualizar por pantalla mediante gráficos las exploraciones A-Scan y B-Scan.
- Almacenar los datos de configuración del Ultrascope TOFD, los datos de las adquisiciones de los pulsos y comentarios introducidos por el usuario en un archivo con formato ".mat".
- Desarrollar a su vez un módulo que permita cargar todos los datos almacenados en los archivos ".mat", creados a partir de la aplicación previamente descrita, para poder analizarlos "a posteriori" gráfica y numéricamente con la posibilidad de, por parte del usuario, borrar tramas adquiridas y editar y añadir comentarios, pudiendo guardar las modificaciones en un nuevo archivo ".mat".

5.2. Diseño

La aplicación final se ha dividido en dos módulos básicos (figura B.1): un módulo (ver 5.2.1 Módulo 1: INICIAR SISTEMA) que permite utilizar todo el sistema: configuración de la FPGA, emisión de pulsos, adquisición de pulsos, tratamiento de datos, visualización en tiempo real y almacenamiento de datos; y otro módulo (ver 5.2.2 Módulo 2: VISUALIZACIÓN OFFLINE) para el análisis "a posteriori" de datos.

5.2.1. Módulo 1: INICIAR SISTEMA

Este módulo permite utilizar todo el sistema en tiempo real, además de ofrecer una interfaz gráfica e intuitiva de usuario (figura B.3) que permite al mismo:

- Mediante teclado y ratón, decidir y visualizar los parámetros de configuración del Ultrascope TOFD .
 - Configuración de disparos, organizada a su vez en dos apartados; uno para realizar adquisiciones de disparos de forma manual (figura B.2b), en cuyo caso el usuario, mediante ratón, indicará cuando realizar la adquisición de un disparo, habiendo un indicador del número de adquisiciones realizadas; y otro para realizar adquisiciones de disparos de forma automática (figura B.2a), según la posición de un encoder externo y de dos parámetros introducidos por el usuario a través de teclado: la longitud total a inspeccionar y la resolución o distancia entre medidas realizadas, parámetros obligatorios, además habrá dos indicadores, uno que indique el milímetro en el cual, una vez se encuentre ahí el encoder, se realizará la siguiente adquisición de disparo, y otro en el que se indique en milímetros la posición actual del encoder.
 - Configuración de adquisición (figura B.2c), dispondrá de dos parámetros introducidos por el usuario mediante teclado: ganancia y delay (retardo); tres parámetros con valores predefinidos seleccionables por el usuario mediante ratón: tiempo de adquisición, modo de adquisición y modo de recepción; y un parámetro seleccionable por el usuario mediante ratón que será si se activa o no de una atenuación de 20dB a la señal de los disparos.
 - Configuración del pulser (figura B.2d), dispondrá de dos parámetros introducidos por el usuario mediante teclado: ancho del pulso y número de pulsos; y un parámetro con valores predefinidos seleccionables por el usuario mediante ratón: amplitud del pulso.
 - Configuración de tramas (figura B.2e), dispondrá de dos parámetros accionables por parte del usuario mediante ratón: uno para seleccionar las diferentes tramas adquiridas y otro para borrar la trama seleccionada. Además se dispondrá de un indicador que muestre la trama seleccionada. A la configuración de tramas únicamente puede accederse cuando la aplicación esté en funcionamiento.
- Visualizar mediante gráficos (figura B.3) los datos de la adquisición de pulsos a través de las exploraciones A-Scan y B-Scan y configurar, mediante teclado y ratón, las visualizaciones. Una configuración, la misma, para los gráficos de las dos visualizaciones A-Scan, y otra configuración para el gráfico de visualización B-Scan. La configuración para los gráficos de las visualizaciones A-Scan consistirá en tres parámetros seleccionables por el usuario mediante ratón: uno que

CAPÍTULO 5. DESARROLLO SOFTWARE

cambie la visualización de los gráficos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, FFT, y viceversa y otros dos que activen/desactiven la introducción manual de los valores de los ejes de abscisas y de ordenadas. Habrá otros cuatro parámetros que introducirá el usuario mediante teclado que serán los valores de los ejes. La configuración para el gráfico de la visualización B-Scan consistirá en los mismos parámetros utilizados para la configuración de los gráficos de las visualizaciones A-Scan exceptuando el que cambia la visualización del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, el cual no existirá. Las visualizaciones y sus configuraciones estarán disponibles cuando la aplicación esté en funcionamiento.

- Gráfico para una visualización de la última adquisición realizada -última trama-, o de la trama seleccionada en la configuración de tramas A-Scan.
- Gráfico para una visualización continua de la exploración A-Scan.
- Gráfico para la visualización de la exploración B-Scan en tiempo real.
- “Iniciar” (figura B.2f) y “Parar” (figura B.3), mediante ratón, el funcionamiento de la aplicación, para que ésta comience a emitir pulsos y permita la adquisición de los mismos. El botón “Iniciar” estará disponible cuando la aplicación no esté en funcionamiento, en el momento en que este botón se pulse para activar el funcionamiento de la función, éste pasará a ser el botón “Parar”.
- Añadir, mediante teclado, comentarios (figura B.2f).
- Configurar, mediante teclado y ratón, el promediado de la señal (figura B.2f). Habrá dos parámetros, uno introducido por el usuario mediante ratón que indicará si se realiza promediado de la señal o no, y otro introducido mediante teclado, que indicará el número de trazas para realizar el promediado. La configuración del promediado de la señal estará disponible cuando la aplicación no esté en funcionamiento, en el momento en que se active el funcionamiento de la misma, el promediado de la señal quedará deshabilitado.
- “Guardar” o “No Guardar” (figura B.5) los datos en formato “.mat” mediante ratón una vez la aplicación haya finalizado de realizar todas las adquisiciones que han sido programadas o el usuario haya detenido la toma de adquisiciones. Estos botones únicamente estarán disponibles una vez la aplicación haya finalizado de realizar todas las adquisiciones que han sido programadas o el usuario haya detenido la toma de adquisiciones.

Para la resolución del problema, en el momento de iniciar el funcionamiento de la aplicación, ciertos datos de configuración se aplicarán por defecto en el caso de que el usuario no indique datos específicos, excepto en el caso indicado anteriormente.

5.2.2. Módulo 2: VISUALIZACIÓN OFFLINE

Este módulo debe permitir el análisis “a posterior” de datos (figura B.6). Mostrará por pantalla una interfaz gráfica de usuario donde se puede indicar, mediante ratón,

CAPÍTULO 5. DESARROLLO SOFTWARE

qué archivo ".mat" cargar a la aplicación; una vez se haya cargado el archivo a la aplicación, se podrán visualizar, a través de tres gráficos, las exploraciones A-Scan en el dominio del tiempo; A-Scan en el dominio de la frecuencia (FFT) y la exploración B-Scan; el usuario, mediante ratón, podrá seleccionar la trama a visualizar en los gráficos A-Scan; podrá borrar tramas, mediante ratón; podrá editar comentarios, mediante teclado; y podrá guardar los cambios realizados, mediante ratón y teclado, en un nuevo archivo ".mat". A su vez, el usuario podrá visualizar por pantalla todos los datos de configuración del Ultrascopio TOFD y del promediado de la señal, así como los siguientes datos: frecuencia de muestreo, número de muestras, nombre del archivo cargado y los comentarios almacenados.

5.3. Desarrollo

El software desarrollado, uscApp, se describe en Anexo B. MANUAL DE USUARIO.

6. Campaña Experimental

Con todo el sistema ultrasónico TOFD configurable desarrollado y configurado, y aunque queda prácticamente fuera del ámbito de actuación de este TFG, se ha realizado una pequeña campaña experimental donde se han obtenido muestras del funcionamiento real del sistema.

Para el análisis "a posteriori" de los datos obtenidos durante la campaña experimental, se ha utilizado la Aplicación 2: VISUALIZACIÓN OFFLINE del software desarrollado (ver Anexo B.3).

Para el caso mostrado en la figura 6.1, se ha inspeccionado una probeta metálica con unos transductores de 2 MHz, un ángulo de incidencia de 30 grados y 9 cm de separación entre transductores. Se puede apreciar en la citada figura que existe una discontinuidad o defecto sobre el tiempo de adquisición 52 microsegundos, como se puede apreciar en la traza 46 del A-Scan seleccionada, durante prácticamente todo el largo de la inspección, como se puede ver en la imagen B-Scan, estando su parte más pronunciada alrededor de la medida 38, por verse una intensidad mayor de adquisición sobre el citado valor.

CAPÍTULO 6. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

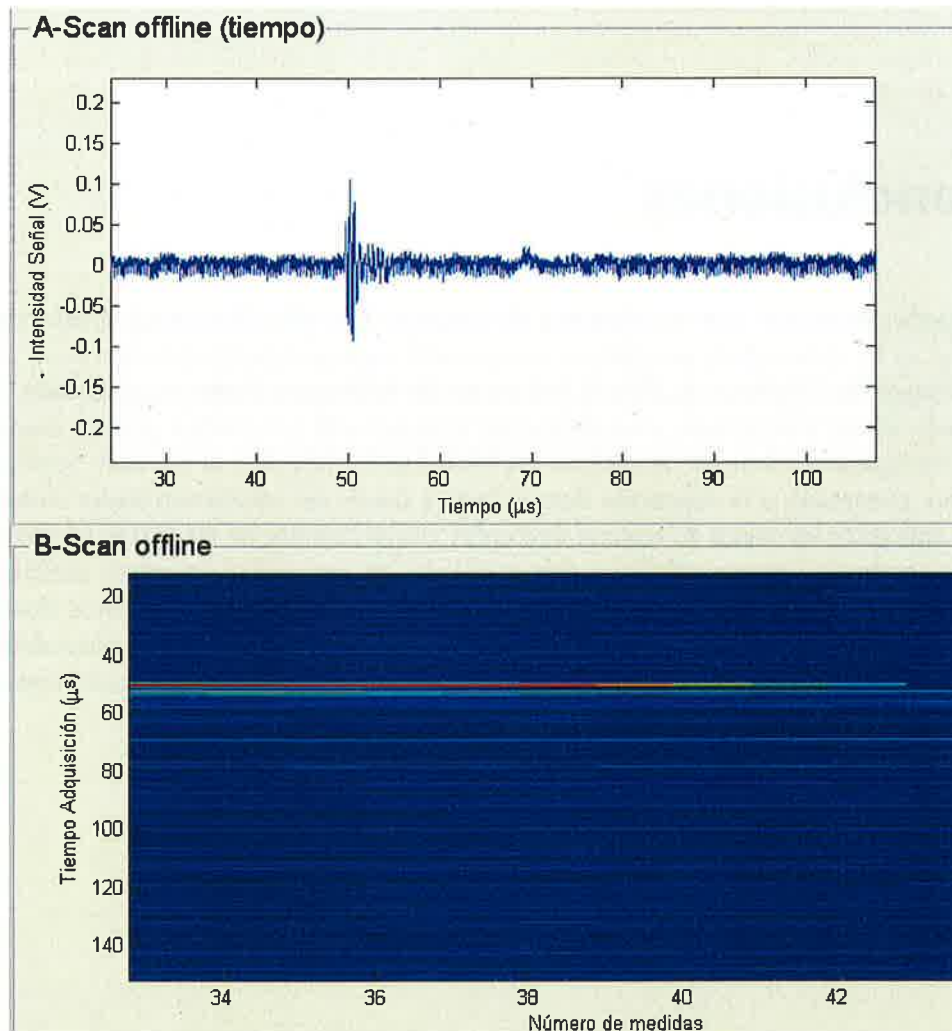


Figura 6.1.: A-Scan: trama 46 y B-Scan

Conclusiones

Se puede determinar que los objetivos del proyecto han sido alcanzados satisfactoriamente: se ha desarrollado un sistema configurable para poder utilizar la técnica TOFD de Ensayos No Destructivos para la inspección de heterogeneidades en materiales. Por un lado se ha desarrollado una aplicación software con la interfaz gráfica desde la que configurar y controlar el sistema ULTRASCOPE TOFD y el encoder óptico rotatorio, conectado a la aplicación desarrollada a través del microcontrolador Arduino. Esta aplicación es capaz de realizar diferentes visualizaciones de las trazas temporales A-Scan y de las imágenes B-Scan. Por otro lado, ha desarrollado también satisfactoriamente el sistema mecanizado adaptable donde se pueden acoplar distintos tipos de transductores piezoeléctricos, así como el encoder óptico rotatorio. La adaptabilidad proporcionada permite al sistema acoplarse a las necesidades de las inspecciones que se vayan a realizar.

Desarrollos futuros

Entre los desarrollos futuros se contemplan la inclusión de distintos sistemas utilizados para realizar Ensayos No Destructivos aparte del utilizado en el presente TFM, para tener así, además de un sistema mecanizado adaptable, una aplicación software adaptable. Se contempla también la posibilidad de realizar el desplazamiento de los transductores piezoeléctricos sobre el puente del sistema mecanizado, de manera motorizada, para no requerir de un desplazamiento manual como en el caso actual. La toma no equiespaciada de tramas también se contempla para agilizar la adquisición, así como la interpolación de tramas para convertirlas en equiespaciadas. Este TFG sirve como trampolín al desarrollo de algoritmos de procesado que ayuden en la detección, caracterización, dimensionamiento y representación de heterogeneidades internas. Como puede observarse, el presente TFG tiene múltiples desarrollos futuros con los que adaptarse a las necesidades y refinar la inspección de materiales en búsqueda de heterogeneidades.

Notas

Copyright

Las figuras 2.1, 2.2, 2.3, 2.5, 2.6 y 2.4 han sido extraídas de [2] y son propiedad de su autor.

La figura 3.1 ha sido extraída de la web oficial de DASEL S.L. www.daselsistemas.com y es propiedad de sus autores.

La figura 3.3 ha sido extraída de la web oficial de Kübler GmbH www.kuebler.com y es propiedad de sus autores.

El uso que se hace de las citadas figuras en el presente TFG es meramente académico.

Las horas dedicadas a la realización del presente TFG han sido consecuentes con los 12 créditos ECTS relativos al Trabajo Final de Grado.

Este documento ha sido desarrollado con el sistema de composición de textos \LaTeX .

Referencias

- [1] Gómez de León, E. 2006. "END, Ultrasonidos Nivel II". Madrid, FC Editorial. ISBN 84-96169-92-8
- [2] Cuenca Granda, J. F. 2013: "Desarrollo y experimentación de un sistema ultrasónico TOFD configurable" Trabajo de fin de Máster. Valencia, Universidad Politécnica de Valencia.
- [3] Recuero López, M. 2000. "Ingeniería Acústica". Paraninfo. ISBN 84-283-2639-8
- [4] Martín, C. J., González Bueno, R., Giacchetta, R., Moreno Hernández, E. 2007. "ULTRASCOPE TOFD: un sistema compacto para la captura y procesamiento de imágenes TOFD". IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires.
- [5] "Data Presentation" <www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/DataPres.htm> [Consultado: 15/05/2013]
- [6] "MATLAB, The Language of Technical Computing", 91199v02 09/12. www.mathworks.com/matlab

Documentos impresos

Kuttruff, H. 1991. "Ultrasonics, Fundamentals and Applications". Elsevier Applied Science. ISBN: 1-85166-553-6.

Recuero López, M. 2000. "Ingeniería Acústica". Paraninfo. ISBN: 84-283-2639-8

DASEL, S.L. "Manual de Usuario Librería Ultrascop". Versión 2.7 - 20/11/2011.

Documentos electrónicos

www.matlabtips.com Learning Matlab for new and advanced users (artículos: optimizing your code, making interfaces without guide, code is poetry, function and sub-functions)

<http://www.mathworks.es/es/help/matlab/index.html> (varios artículos)

ANEXOS

A. MANUAL DE INSTALACIÓN

A.1. Configuración Hardware

1. Se dispone el **sistema mecanizado** (Capítulo 4) de la manera más óptima según las inspecciones que se vayan a realizar, regulándolo en altura, anchura y longitud, ajustándolo para que la base se mantenga estática.
2. Se adapta el **encoder óptico** (Sección 3.3) al sistema mecanizado, a través de su adaptador desarrollado conjuntamente y se conecta al microcontrolador Arduino Uno.
3. Se conecta el **Arduino Uno** (Subsección 3.4.1) al ordenador personal, mediante cableado USB.
4. Al **ordenador personal** (Sección 3.5) se conecta el sistema ULTRASCOPE TOFD, mediante cableado USB.
5. Al sistema **ULTRASCOPE TOFD** (Sección 3.1) se conectan los transductores piezoeléctricos.
6. Los **transductores piezoeléctricos** (Sección 3.2) se acoplan al sistema mecanizado mediante sistemas de sujección.

A.2. Configuración Software

Ha de disponerse previamente de: Ordenador personal, MATLAB instalado, conexión a internet, el ejecutable del UltraView (driver del sistema ULTRASCOPE TOFD) y las librerías del sistema ULTRASCOPE TOFD para MATLAB.

Configuraciones a realizar en el ordenador personal:

APÉNDICE A. MANUAL DE INSTALACIÓN

- Se descargan las librerías de comunicación Arduino-MATLAB, **ArduinoIO**, disponibles para libre descarga en la web de MathWorks¹.
 1. Se siguen los pasos descritos en el archivo **readme.txt**, entre los que se indican:
 - Instalar el **IDE Arduino**.
 - Cargar el sketch **adio.pde** en el IDE Arduino para soporte de encoders.
- Se instalan los drivers para el sistema **ULTRASCOPE TOFD**:
 1. **Sin conectar** el sistema ULTRASCOPE TOFD al ordenador personal.
 2. Se ejecuta el **Setup UltraView**, preferiblemente la versión 2.9.40.1, driver del sistema ULTRASCOPE TOFD.
 3. Una vez instalado UltraView, se **conecta por primera vez**, via USB, el sistema ULTRASCOPE TOFD:
 - a) Seleccionar **Instalar automáticamente el software** para proceder a la instalación automática por parte de Windows.
 - b) **Verificar la instalación** en: Panel de Control - Sistema - Administración de dispositivos. Debe aparecer el nuevo hardware instalado "Cypress EZ-USB FX2 (68613) - EEPROM missing".
- Se especifica en el propio código de la aplicación uscApp.m, en la parte especificada, la carpeta donde están ubicadas las librerías del ULTRASCOPE TOFD para MATLAB.

¹www.mathworks.com

B. MANUAL DE USUARIO

Este es el manual de usuario de la aplicación uscApp, desarrollada como parte principal del TFM "Desarrollo de un sistema ultrasónico TOFD configurable".

El sistema ULTRASCOPE TOFD, se menciona como USC.

B.1. Pantalla Inicial

Ver figura B.1.

Pantalla inicial que aparece al lanzar la aplicación uscApp.

1. Botón: INICIAR SISTEMA

>>>Inicializa USC y va a 2.

2. Visualización: "Info. inicialización sistema ULTRASCOPE TOFD"

Si inicialización correcta: cierra pantalla inicial y lanza Módulo 1: INICIAR SISTEMA.

Si inicialización NO correcta: Mensaje de error: Usuario debe revisar sistema y volver a intentar.

3. Botón: VISUALIZACIÓN OFFLINE

>>>Lanza Aplicación 2: VISUALIZACIÓN OFFLINE y cierra pantalla inicial.

APÉNDICE B. MANUAL DE USUARIO

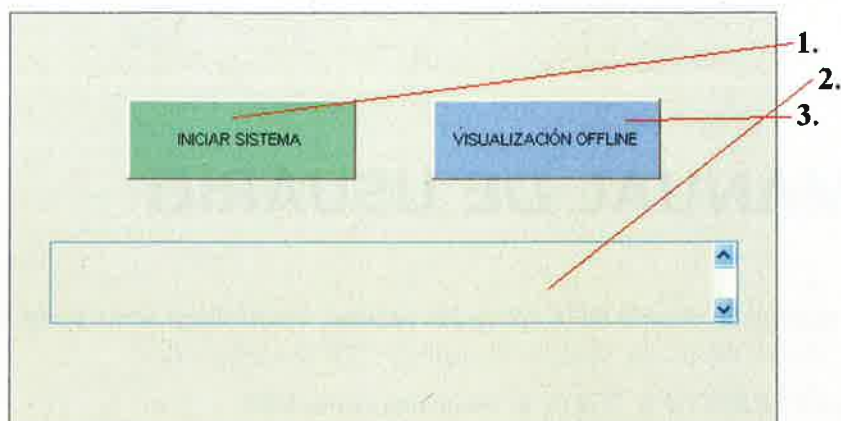


Figura B.1.: Pantalla Inicial

B.2. Módulo 1: INICIAR SISTEMA

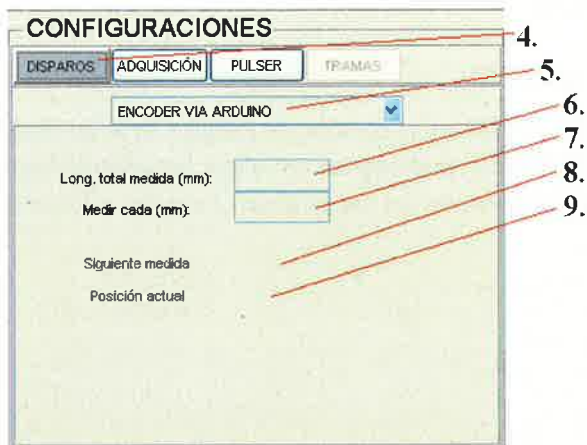
El Módulo 1: INICIAR SISTEMA presenta tres modos:

MODO PARADA (Figura B.2)

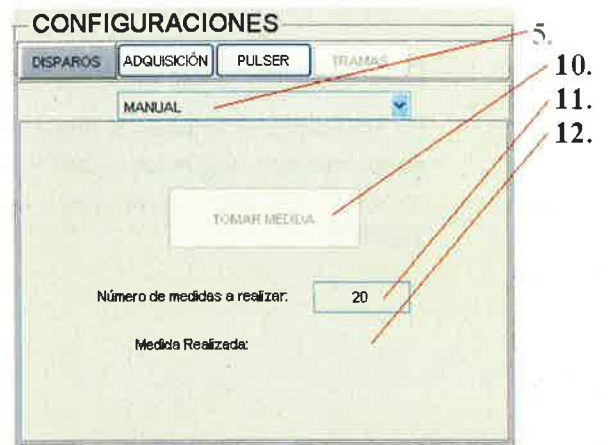
El Módulo 1: INICIAR SISTEMA es lanzada en MODO PARADA.

En este modo es posible ajustar la mayoría de las CONFIGURACIONES, el PROMEDIADO e indicar COMENTARIOS.

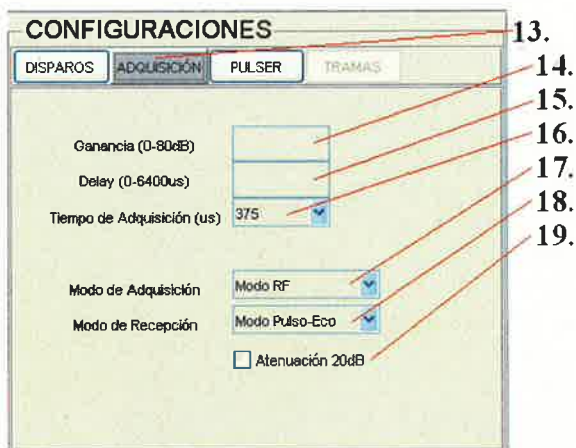
APÉNDICE B. MANUAL DE USUARIO



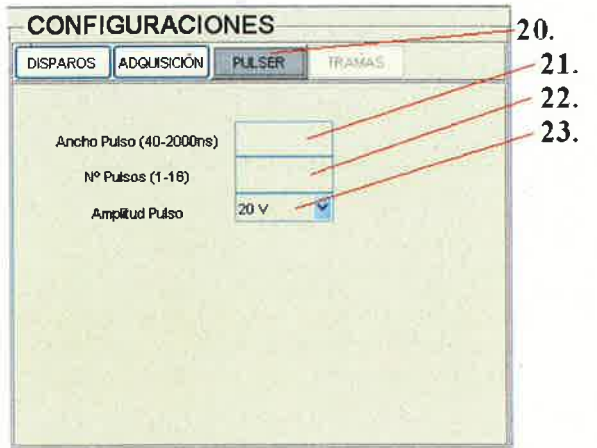
(a) Zona CONFIG: Disparos ENCODER VIA ARDUINO



(b) Zona CONFIG: Disparos MANUAL



(c) Zona CONFIG: Adquisición



(d) Zona CONFIG: Pulser



(e) Zona CONFIG: Tramas



(f) Zona EXTRA

Figura B.2.: Zona CONFIGURACIONES y EXTRA - MODO PARADA

APÉNDICE B. MANUAL DE USUARIO

MODO ACTIVO (Figuras B.3 y B.4)

Es el modo de funcionamiento de la aplicación.

En este modo el Módulo 1: INICIAR SISTEMA realiza emisión de pulsos y la adquisición de los mismos, según las CONFIGURACIONES, pudiéndose visualizar las adquisiciones en diferentes gráficos, el ajuste de la visualización de los mismos y escribir COMENTARIOS.

APÉNDICE B. MANUAL DE USUARIO

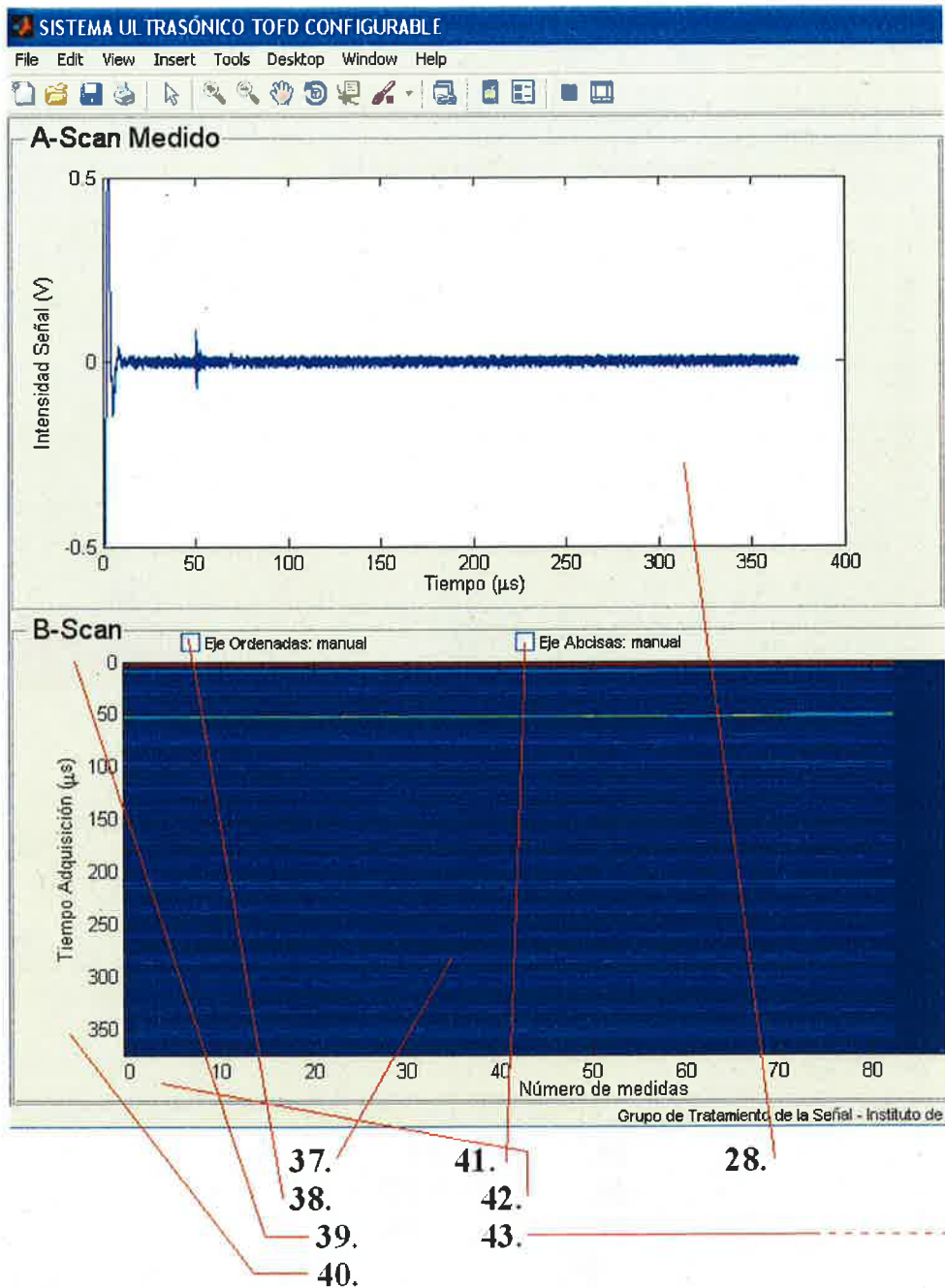


Figura B.3.: Parte izquierda - Módulo 1: INICIAR SISTEMA - MODO ACTIVO

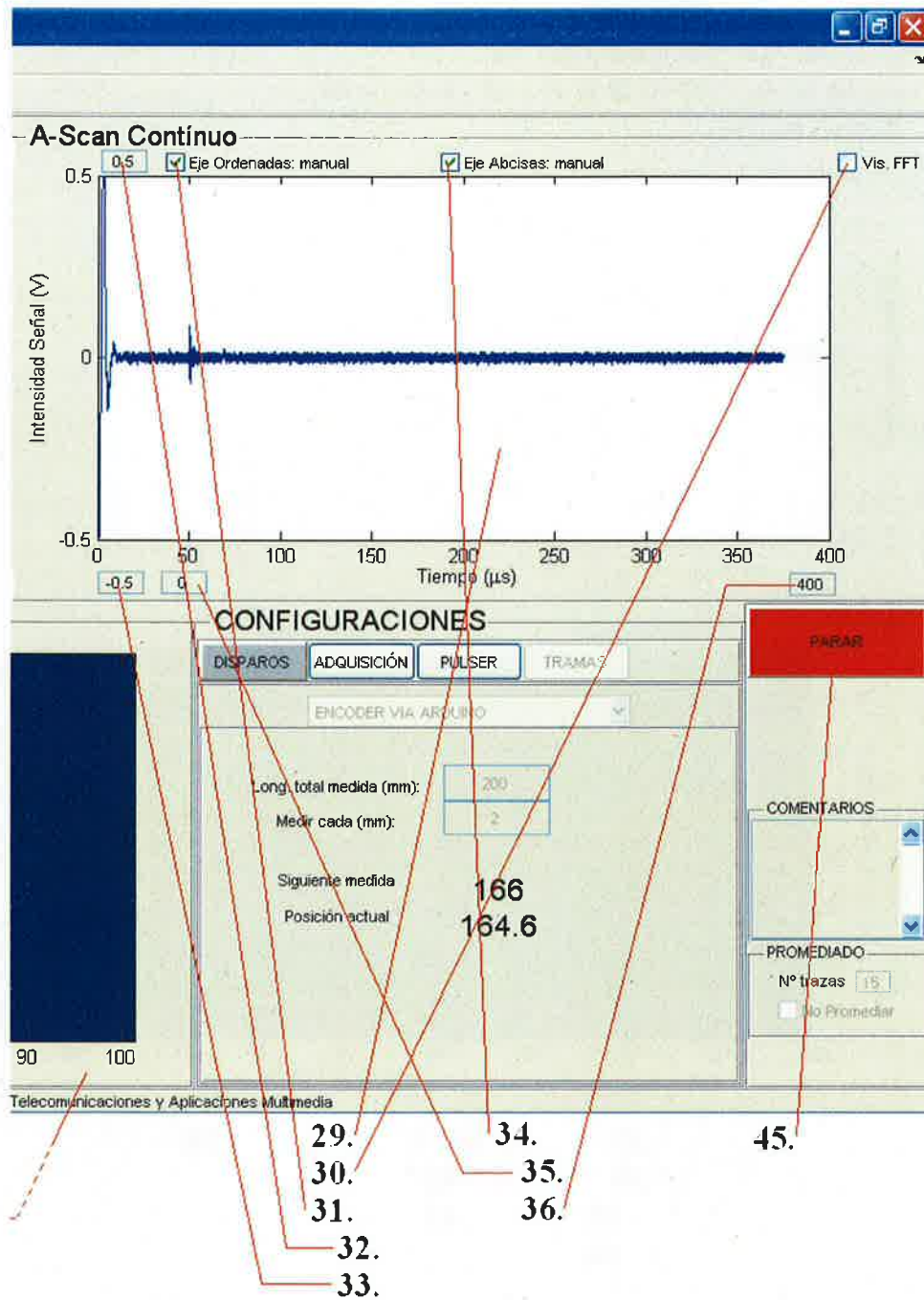


Figura B.4.: Parte derecha - Módulo 1: INICIAR SISTEMA - MODO ACTIVO

MODO STAND-BY (Figura B.5)

Es el modo en el que se puede PARAR el funcionamiento de la aplicación para guardar o no guardar los datos adquiridos y de las adquisiciones.

Es el MODO en que se encuentra el Módulo 1: INICIAR SISTEMA, cuando se actúa sobre el botón PARAR y cuando llega a realizar todas las adquisiciones indicadas en CONFIGURACIONES.

Cuando termina de medir o se para manualmente y botones GUARDAR / NO GUARDAR.



Figura B.5.: Zona EXTRA - MODO STAND-BY

B.2.1. Zona: CONFIGURACIONES

4. Botón: DISPAROS

>>>Selecciona módulo de configuración del USC: (fuente indicadora de adquisición de) disparos.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA / ACTIVO

5. Desplegable: "Fuente de disparos"

>>>Selecciona la fuente indicadora de adquisición de disparos.

APÉNDICE B. MANUAL DE USUARIO

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA

Si ENCODER VIA ARDUINO *Adquisición disparos según pasos encoder rotatorio via Arduino.* Inicialización Arduino. Si no inicia correctamente: mensaje de ¡Atención!: usuario debe revisar sistema y volver a intentar.

6. Editable: Longitud total medida (mm)

>>>Usuario indica la longitud total a inspeccionar en milímetros.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA

7. Editable: Medir cada (mm)

>>>Usuario indica cada cuántos milímetros realizar una adquisición de disparos.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA

8. Visualización: Siguiete medida

>>>Muestra el milímetro en que se realizará la siguiete medida.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

9. Visualización: Posición actual >>>Muestra la posición actual en milímetros del encoder rotatorio.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

Si MANUAL *Adquisición de disparos manualmente.*

10. Botón: TOMAR MEDIDA

>>>Realiza una adquisición de disparo.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

11. Editable: Número de medidas a realizar:

>>>Usuario indica número de adquisiciones de disparo manuales a realizar.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA

12. Visualización: Medida Realizada:

>>>Muestra número de medidas realizadas.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

13. Botón: ADQUISICIÓN

>>>Selecciona módulo de configuración del USC: (parámetros de) adquisición (de disparos).

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA / ACTIVO

14. Editable: Ganancia (0.80dB)

APÉNDICE B. MANUAL DE USUARIO

>>>Usuario indica ganancia de señal adquirida.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA / ACTIVO

15. Editable: Delay (0-6400us)

>>>Usuario indica retardo entre emisión pulser e inicio adquisición.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA / ACTIVO

16. Desplegable: Tiempo de Adquisición(us)

>>>Usuario indica tiempo de adquisición de A-Scan.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA

17. Desplegable: Modo de Adquisición

>>>Usuario indica modo de adquisición: RF / Video.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA

18. Desplegable: Modo de Recepción

>>>Usuario indica modo de recepción: Pulso-Eco / Transmisión.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA / ACTIVO

19. Checkbox: Atenuación 20dB

>>>Usuario activa atenuador de 20dB en adquisición.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA / ACTIVO

20. Botón: PULSER

>>>Selecciona módulo de configuración del USC: (disparo de los) pulser(s).

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA / ACTIVO

21. Editable: Ancho Pulso (40-2000ns)

>>>Usuario indica ancho pulso de disparo.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA / ACTIVO

22. Editable: NºPulsos(1-16)

>>>Usuario indica número de pulsos del pulser.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA / ACTIVO

23. Desplegable: Amplitud Pulso

>>>Usuario selecciona la tensión del pulso de excitación.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA / ACTIVO

24. Botón: TRAMAS

APÉNDICE B. MANUAL DE USUARIO

>>>Selecciona módulo de configuración del USC: (seleccionar / borrar) tramas.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO (Si 5. Desplegable: "Fuente de disparos": MANUAL)

25. Visualización: Trama N°:

>>>Muestra número de trama actual.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO (Si 5. Desplegable: "Fuente de disparos": MANUAL)

26. Slider: "Selección de tramas"

>>>Usuario selecciona trama a visualizar/borrar.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO (Si 5. Desplegable: "Fuente de disparos": MANUAL)

27. Botón: Borrar Trama

>>>Borra trama actual.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO (Si 5. Desplegable: "Fuente de disparos": MANUAL)

B.2.2. Zona: A-Scan Medido

28. Visualización gráfica: A-Scan Medido

>>>Muestra gráfico último A-Scan adquirido / A-Scan seleccionado.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

B.2.3. Zona: A-Scan Continuo

29. Visualización gráfica: A-Scan Continuo

>>>Muestra gráfico adquisiciones A-Scan continuadas.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

30. Checkbox: Vis.FFT

APÉNDICE B. MANUAL DE USUARIO

>>> Cambia visualizaciones gráficas 28 y 29 al dominio de la frecuencia (FFT).

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

31. Checkbox: Eje Ordenadas: manual

>>> Cambia eje ordenadas (eje Y) a manual de visualizaciones gráficas 28 y 29.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

32. Editable: "Valor superior eje ordenadas"

>>> Usuario indica valor superior eje ordenadas.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

33. Editable: "Valor inferior eje ordenadas"

>>> Usuario indica valor inferior eje ordenadas.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

34. Checkbox: Eje Abcisas: manual

>>> Cambia eje abcisas (eje X) a manual de visualizaciones gráficas 28 y 29.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

35. Editable: "Valor izquierdo eje abcisas"

>>> Usuario indica valor izquierdo eje abcisas.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

36. Editable: "Valor derecho eje abcisas"

>>> Usuario indica valor derecho eje abcisas.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

B.2.4. Zona: B-Scan

37. Visualización gráfica: B-Scan

>>> Muestra gráfico B-Scan.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

38. Checkbox: Eje Ordenadas: manual

>>> Cambia eje ordenadas (eje Y) a manual de visualización gráfica 37.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

APÉNDICE B. MANUAL DE USUARIO

39. Editable: "Valor superior eje ordenadas"

>>>Usuario indica valor superior eje ordenadas.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

40. Editable: "Valor inferior eje ordenadas"

>>>Usuario indica valor inferior eje ordenadas.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

41. Checkbox: Eje Abcisas: manual

>>>Cambia eje abcisas (eje X) a manual de visualización gráfica 37.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

42. Editable: "Valor izquierdo eje abcisas"

>>>Usuario indica valor izquierdo eje abcisas.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

43. Editable: "Valor derecho eje abcisas"

>>>Usuario indica valor derecho eje abcisas.

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

B.2.5. Zona: Extra

44. Botón: INICIAR

>>>Módulo 1: INICIAR SISTEMA pasa a MODO ACTIVO

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA

45. Botón: PARAR

>>>Módulo 1: INICIAR SISTEMA pasa a MODO STAND-BY: Mensaje: "¿Guardar datos medidos?"

Si "Aceptar": >>>Guarda datos medidos y configuraciones en archivo ".mat" especificado por usuario y pasa a MODO PARADA

Si "No Guardar": no se guardan datos medidos y pasa a MODO PARADA.

Si "Cancelar": pasa a MODO ACTIVO

DISPONIBILIDAD MODO: ACTIVO

APÉNDICE B. MANUAL DE USUARIO

***Si todas las medidas realizadas** pasa a MODO STAND-BY

Si 46. Botón: GUARDAR

>>>Guarda datos medidos y configuraciones en archivo ".mat" especificado por usuario y pasa a MODO PARADA.

DISPONIBILIDAD MODO: STAND-BY

Si 47. Botón: NO GUARDAR

>>>No guarda datos adquiridos ni configuraciones y pasa a MODO PARADA.

DISPONIBILIDAD MODO: STAND-BY

48. Editable: COMENTARIOS

>>>Usuario añade comentarios opcionalmente.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA / ACTIVO / STAND-BY

49. Editable: Nº Trazas

>>>Usuario indica nº trazas para promediar.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA

50. Checkbox: No Promediar

>>>Usuario selecciona no promediar.

DISPONIBILIDAD MODO: PARADA

B.3. Módulo 2: VISUALIZACIÓN OFFLINE

Ver figura B.6.

51. Botón: CARGAR DATOS

>>>Abre cuadro de diálogo: usuario selecciona archivo ".mat" para cargar al Módulo 2: VISUALIZACIÓN OFFLINE.

Único elemento disponible antes de cargar datos desde archivo ".mat".

52. Visualización: Trama Nº:

>>>Indica número de trama A-Scan seleccionada.

APÉNDICE B. MANUAL DE USUARIO

53. Slider: "Seleccionar trama"

>>> Usuario selecciona trama A-Scan.

54. Botón: Borrar Trama

>>> Usuario borra trama A-Scan seleccionada.

55. Botón: Guardar

>>> Usuario guarda de nuevo los datos cargados con modificaciones realizadas.

56. Editable: "Comentarios"

>>> Usuario modifica/añade comentarios.

57. Visualización: DATOS

>>> Se muestran todos los datos de configuración.

58. Visualización gráfica: A-Scan offline (tiempo)

>>> Muestra gráfico trama A-Scan seleccionada en dominio del tiempo.

59. Visualización gráfica: A-Scan offline (FFT)

>>> Muestra gráfico trama A-Scan seleccionada en dominio de frecuencia (FFT).

60. Visualización gráfica: B-Scan offline

>>> Muestra gráfico B-Scan.

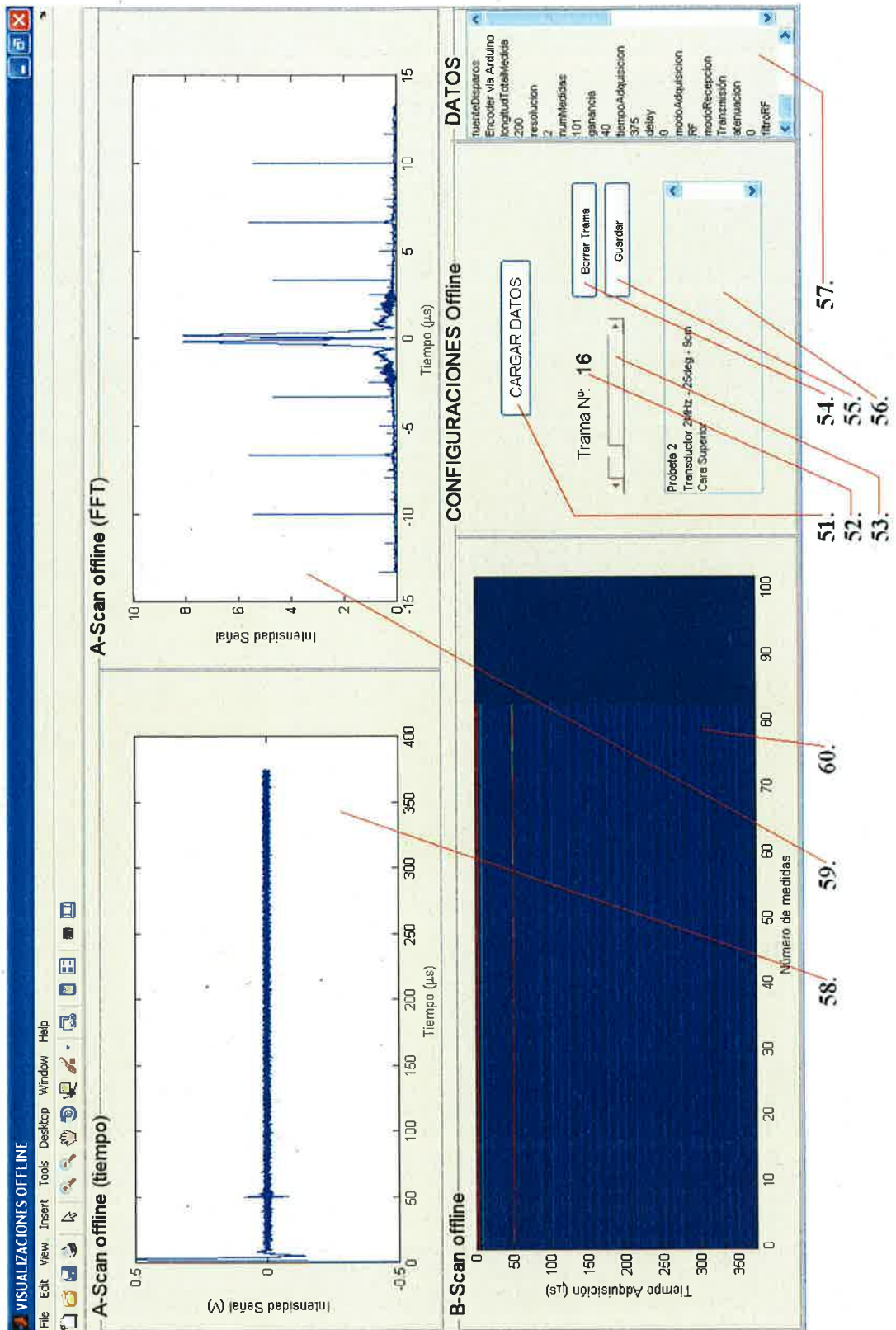


Figura B.6.: Módulo 2: VISUALIZACIÓN OFFLINE (con datos cargados)

