

UAH

Detección de daños en estructuras mediante análisis de datos en tarjeta "myRIO"

Máster Universitario en Sistemas Electrónicos Avanzados: Sistemas Inteligentes

Presentado por:

D. Ángel Alcaide Pardo

Dirigido por:

Dr./D. Enrique Santiso Gómez

Alcalá de Henares, a 21 de Septiembre de 2015

*A mi familia,
especialmente a mi mujer,
Amaya, no puedo imaginarme la
vida sin ella, a mi hija, Tula
que es el centro de mi Universo,
y a la pequeña, que está por
venir.*

Os quiero.

En primer lugar agradecer a D. Enrique Santiso Gómez, director de este proyecto, por su ayuda, paciencia y comprensión. A D. Mariano Ruiz, por haberme guiados al final de mis estudios y darme la oportunidad de aprender y trabajar con él. Por último agradecer a la empresa AERNNNOVA por confiar en mí durante los últimos cuatro años.

INDICE

I. RESUMEN

II MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. OBJETIVOS	3
1.2. FASES	5
2. SHM Y EL ENTORNO AERONÁUTICO	6
2.1. FUNDAMENTO DE LOS SISTEMAS DE SHM	7
2.2. LAS TÉCNICAS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA EN AERONÁUTICA	10
• Inspección Visual	10
• Eddy Current Foil Sensors (ECFS)	11
• Comparative Vacuum Monitoring (CVMTM)	12
• Microwave Antennas (MWA)	12
• Partículas magnéticas	13
• Fiber Bragg Gratings (FBG)	13
• Emisión acústica (del inglés Acoustic Emission o AE)	14
2.3. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS BASADOS EN ONDAS DE LAMB ..	15
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	18
3.1. ONDAS DE <i>LAMB</i>	18
• Propagación recta de las ondas de <i>Lamb</i> en material isótropo	19
3.2. EFECTO PIEZOELÉCTRICO	22
3.3. TÉCNICA DE INSPECCIÓN <i>ROUND ROBIN</i>	25
4. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN SELECCIONADA	26
4.1. PLATAFORMA DE DESARROLLO	26
4.2. HARDWARE DE DESARROLLO	30

4.3. ALGORITMO SELECCIONADO.....	32
• Descripción del algoritmo	32
• Análisis del algoritmo y adaptación a las necesidades del proyecto.....	37
5. DESARROLLO DEL ALGORITMO DE DETECCIÓN.	48
5.1. CÓDIGO DE PRUEBA PARA EJECUCIÓN EN PC.....	49
• Resultados del código de prueba.....	56
5.2. CÓDIGO FINAL DE LA APLICACIÓN PARA TRABAJAR SOBRE EL DISPOSITIVO <i>MYRIO</i>	58
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	67
6.1. RESULTADOS.	67
6.2. CONCLUSIONES.....	72
6.3. TRABAJOS FUTUROS.....	73

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Analogía entre el sistema nervioso humano y un sistema de SHM instalado en una aeronave. Los sensores distribuidos por la estructura de la aeronave cumplen la función de las terminaciones nerviosas del cuerpo humano, mientras un computador realiza la función del cerebro.....	8
Figura 2. Ejemplo de daños en estructuras aeronáuticas: despegado, fractura y corrosión.	9
Figura 3 Modo de funcionamiento de un sistema de SHM. a) En primer lugar se transmite una señal a la estructura utilizando el transductor número 1 (que cumple la función de actuador), la señal se propaga por la estructura y después de sufrir múltiples rebotes en la misma, se adquiere mediante los transductores 2, 3 y 4, que actúan como sensores. b) Representación de las señales adquiridas por los sensores. c) Representación de la imagen ultrasónica bidimensional, indicando la posición del defecto. d) Representación tridimensional de la estructura, mostrando la posición y gravedad del defecto.....	9
Figura 4. Funcionamiento de la técnica de ECFS. a) La corriente alterna (de una cierta frecuencia) que fluye a través de la bobina de una sonda, genera un campo magnético alrededor de la bobina. b) Cuando se sitúa la bobina cerca de un material conductor de la electricidad, se inducen unas corrientes de Foucault en el material. c) En caso de existir un defecto en el material conductor, la circulación de las corrientes de Foucault se distorsiona y el acoplamiento magnético con la sonda se ve alterado, permitiendo detectar la presencia de un defecto en base a la variación de la impedancia de la bobina	11
Figura 5. Sonda para el análisis mediante CVM TM . Cuando un defecto se encuentra entre cavidades adyacentes que se encuentran en el vacío (V) o bajo presión atmosférica (A), se produce un incremento en la diferencia de presión entre las cavidades.	12
Figura 6. Estructura de una fibra de Bragg, mostrando además el perfil del índice de refracción que cambia a lo largo del núcleo de la fibra. La respuesta espectral de la fibra muestra cómo una señal de entrada de banda ancha se divide en las componentes transmitida y reflejada.	13
Figura 7. Aplicación de la técnica de Emisión Acústica o AE (Acoustic Emission) para la detección de las ondas de estrés generadas en el interior de un material.	14

Figura 8. Placa infinita de espesor $2h$ con superficies libres de esfuerzos.....	20
Figura 9 Modos simétrico (S) y anti simétrico (A) de las ondas de Lamb.....	20
Figura 10. Curvas de dispersión de los modos simétricos y anti simétricos para la velocidad de fase, C_P (izquierda) y velocidad de grupo, C_g (derecha).....	22
Figura 11. Diferentes momentos de la simulación por elementos finitos de un panel de aluminio excitado mediante un transductor piezoeléctrico adherido a su superficie, en los que se puede observar la evolución de la propagación de las ondas y los dos modos, simétrico(S0) y anti simétrico(A0), de los que se compone la perturbación generada. .	23
Figura 12 Panel frontal del módulo PT100.vi, donde se indican los diferentes elementos que aparecen en el mismo.....	27
Figura 13. Diagrama de bloques del módulo TempPT100.vi en el cual se indican los diferentes elementos que lo forman. Dichos elementos intercambian información mediante líneas de datos a modo de cableado.	28
Figura 14. Icono y conector del módulo TempPT100.vi, donde se muestra la relación entre las entradas y salidas del mismo con los terminales de su conector.....	29
Figura 15. Equipo <i>NI myRIO1900</i> , de la familia RIO (arquitectura E/S reconfigurable) de <i>National Instruments</i> , que es un dispositivo portátil y reconfigurable, que ha sido empleado para el desarrollo de la aplicación de detección de daños.....	30
Figura 16. Diagrama de bloques de la arquitectura del dispositivo <i>NI myRIO1900</i> , de la familia RIO (arquitectura E/S reconfigurable) de <i>National Instrument</i>	31
Figura 17. Representación de la geometría del problema definiendo la nomenclatura asociada al problema, donde E y R representan, respectivamente, piezoeléctrico emisor y receptor, y O el punto de observación o inspección sobre la estructura. A la derecha se muestran las diferentes señales que intervienen en el algoritmo.....	34
Figura 18. Comparativa entre a) señal medida en el canal de excitación. b) señal medida en un canal de recepción, dentro de un mismo ensayo.....	38
Figura 19. Panel "3" de aluminio Al T3 2024, típicamente aeronáutico, de medidas 1mm x 480mm x 580mm, con un <i>array</i> de transductores piezoeléctricos adherido, sobre el que se han realizado diferentes ensayos de los que se dispone varios archivos de datos de adquisición.....	39
Figura 20. <i>Array</i> de piezoeléctricos integrados sobre una PCB y situación del origen de coordenadas para los cálculos posteriores sobre el piezoeléctrico asociado al canal 1..	39

Figura 21. Pantallas de configuración del programa <i>Vallen Dispersión</i> para el cálculo teórico de las velocidades de propagación para material aluminio Al T3 2024 de 1 mm de espesor	40
Figura 22. Resultado del programa de cálculo teórico de las velocidades de propagación para material aluminio Al T3 2024 de 1 mm de espesor. Se representan los modos simétrico S0 y anti simétrico A0, únicos presentes en las frecuencias de trabajo utilizadas.....	41
Figura 23. Resultados obtenidos por Dr. Giurgiutiu para un panel de 1mm de espesor de aluminio. Arriba el modelo teórico y abajo los resultados experimentales.....	42
Figura 24. El resultado teórico de compensar una señal temporal distorsionada por la dispersión de la velocidad en frecuencia obteniendo una señal compensada en el dominio del espacio, a través del proceso descrito en la documentación.....	43
Figura 25. Comportamiento capacitivo del piezoeléctrico de excitación al acumular y descargar parte de la energía recibida. Piezo de excitación (arriba) y señal en un piezo receptor (abajo) voltios/muestras.....	44
Figura 26. Comparativa entre la señal de adquisición (roja) y la señal tras el acondicionamiento realizado (azul), mostrando el detalle de una sección de las mismas para mejor observación de las mejoras inducidas. Voltios/muestras	45
Figura 27. Detalle de la simulación de la propagación de la perturbación generada mediante la excitación de un piezoeléctrico.	46
Figura 28. Secuencia de señales obtenidas en la lectura de los canales 1,2 y 3 para un ensayo en el que la excitación se aplica sobre el canal 1 y donde se puede observar la señal directa que parte del canal 1 y se va propagando apareciendo en el primer termino de todas las señales.	46
Figura 29. Proyecto de <i>Labview</i> Damage_indexing creado para la prueba y ejecución del algoritmo de detección de daño seleccionado.	49
Figura 30. Panel frontal del programa desarrollado con las diferentes secciones diferenciadas por funcionalidades. Los controles numerados por bloques como 1 y 2 permiten la configuración de la aplicación y la introducción de datos necesaria para la correcta ejecución del algoritmo. Los bloques 3 y 4 corresponden con la visualización de resultados y presentación de datos de interés	50
Figura 31. Captura del resultado del análisis temporal y de uso de memoria para los casos en que se han utilizado 25.000 muestras (1) y 10.000 muestras (2).....	51

Figura 32. Diagrama de bloques correspondiente al programa principal del sistema donde, se pueden identificar los cuatro pasos principales del desarrollo del algoritmo. 1. Apertura archivo de datos y configuración del algoritmo. 2. Acondicionado y tratamiento datos. 3. Ejecución del algoritmo. 4. Representación de resultados.	52
Figura 33. Diagrama de bloques del módulo Acondicionamiento.vi.	54
Figura 34. El diagrama de bloques del módulo Dcomplex.vi que se encarga del cálculo del índice de daño complejo asociado a las coordenadas que recibe como entrada.....	55
Figura 35. Panel de aluminio Al 2024 T3, de uso típicamente aeronáutico de dimensiones 580mm x 480mm x 1mm con un <i>array</i> de piezoeléctricos instalado, sobre el que se han realizado los ensayos cuyos datos de adquisición se han usado para la comprobación del algoritmo.....	56
Figura 36. Comparativa entre el panel real objeto de la inspección en el que se han señalado los daños simulados mediante taladros y la imagen generada por la aplicación	57
Figura 37. Diagrama de bloques del proyecto.	58
Figura 38. Proyecto de <i>Labview</i> que integra todos los módulos de la aplicación, donde se observan los VI que se ejecutarán en las distintas localizaciones <i>hardware</i> posibles, PC, Procesador interno y FPGA.....	59
Figura 39. Panel frontal y diagrama de bloques de la interfaz del usuario.....	60
Figura 40. Diagrama de bloques del módulo principal de la aplicación, main.vi	61
Figura 41. Código diseñado para el cálculo de la transformada rápida de Hilbert.....	63
Figura 42 Comparativa entre la señal resultante de utilizar el módulo proporcionado por <i>Labview</i> para el cálculo de la transformada rápida de Hilbert y el módulo que se ha diseñado a tal efecto por el autor.	63
Figura 43 Captura de pantalla del resultado del sintetizado del bloque acondicionamiento.vi.....	64
Figura 44. Diagrama de bloques del módulo acondicionamiento.vi en código sintetizable para la FPGA.	65
Figura 45. Captura de las pantallas de configuración de los filtros diseñados para la FPGA.	65
Figura 46 Resultados de la temporización y ocupación de la FPGA.	66

Figura 47. Comparativa entre el panel real objeto de la inspección en el que se han señalado los daños simulados mediante taladros y la imagen generada por la aplicación	68
Figura 48. La aplicación para los diferentes archivos de datos de adquisición disponibles y en los que se varía el número de ciclos de la señal de excitación a) 11 ciclos b) 7 ciclos c) 5 ciclos y d) 3 ciclos. Se ha configurado la aplicación para generar una imagen centrada en los daños y en la que aparezca el borde frontal del panel.	68
Figura 49. Imagen en 3 dimensiones resultante de ejecutar el algoritmo.....	69
Figura 50. Comparativa entre el proceso normal (izquierda) y la ejecución sin acondicionamiento (derecha).....	70
Figura 51. Imagen resultante obtenida por la aplicación final desarrollada sobre el dispositivo <i>myRIO</i>	70
Figura 52. Panel "4", con idénticas características que el panel utilizado anteriormente, con una serie de daños diferentes y dos imágenes generadas por la aplicación, donde se ha variado el umbral de detección.	71

RESUMEN

Este proyecto está enmarcado dentro del proyecto *PAMELA SHM SYSTEM™* (*Phased Array Monitoring for Enhanced Life Assessment Structural Health Monitoring System*), desarrollado por la empresa *AERNNOVA*, y tiene como principal objetivo el análisis e implementación práctica de una propuesta teórica de detección y visualización de daños en estructuras delgadas basado en ondas ultrasónicas guiadas de Lamb.

La aplicación, que ha sido desarrollada con la herramienta de programación gráfica *Labview*, e integrada en la tarjeta de desarrollo *myRIO* ambas herramientas del fabricante National Instruments, y pretende mostrar un primer acercamiento a la implementación de sistemas autónomos e inteligentes para la monitorización estructural en industrias complejas y con estándares de seguridad muy restrictivos como es la aeroespacial resaltando la idoneidad de este tipo de dispositivos de desarrollo en un campo de investigación todavía en los albores de su desarrollo.

MEMORIA

1. Introducción

1.1. Objetivos

Uno de los principales objetivos que busca la industria es desarrollar estructuras y vehículos cada vez más eficientes y seguros, a la vez que optimiza todos los sistemas y procesos relacionados con los mismos, como pueden ser su fabricación y mantenimiento. De esta manera, se busca conseguir una disminución de los costes por parte de los fabricantes y de las compañías, así como un incremento de la seguridad y fiabilidad. Por lo tanto, la monitorización de integridad estructural (*Structural Health Monitoring, SHM*) es uno de los campos mayor interés y margen de crecimiento para la industria en sectores como el aeronáutico, obra civil, energético,....

En lo referente al sector aeroespacial, las técnicas tradicionales de evaluación no destructiva (*Non-destructive Evaluation, NDE*) no pueden ser empleadas como técnicas de evaluación estructural en tiempo real, ya que la mayoría de sus procedimientos requieren desmontar las diferentes partes para poder ser analizadas, así como equipos

muy caros y pesados. Por este motivo, son necesarios sistemas de monitorización estructural ligeros, que puedan ir integrados en las diferentes estructuras, que sean capaces de actuar en tiempo real y con la mínima interferencia humana. De esta manera se pueden reducir labores de mantenimiento innecesarias y costosas. Además, en el caso de estructuras nuevas, la inclusión de estos sistemas desde la etapa de diseño contribuye a la disminución del peso, tamaño y coste de las mismas. Es por esta razón que la investigación y trabajo que se propone en el presente documento esté enmarcada en el desarrollo de sistemas embebidos basados en FPGA para la monitorización de estructuras.

Partiendo de la solución teórica publicada por el grupo de acústica del departamento de ingeniería mecánica de la universidad de Sherbrooke, Canadá, para la generación de imágenes para detección de daños, se desarrollará una aplicación capaz de reproducir el proceso y los resultados del mismo. Con este fin, se utilizarán señales adquiridas en ensayos reales proporcionadas por la empresa AERNNOVA que permitan el correcto diseño y validación del proyecto.

En una primera fase se estudiará la metodología utilizada, así como, el mecanismo de funcionamiento del algoritmo seleccionado. Un análisis pormenorizado permitirá el desarrollo de una aplicación *software* optimizada del proceso, que servirá como punto de partida para la integración del algoritmo como *firmware* en un sistema basado en un FPGA. A partir de este primer desarrollo obtenido se fijarán las necesidades y requisitos para el diseño de la solución final a integrar en el sistema, adaptando la aplicación al lenguaje de programación y capacidades de la lógica programable integrada en el *hardware*.

Para alcanzar este objetivo se utilizará el dispositivo para diseño embebido *myRIO* de National Instruments, un sistema basado en un FPGA y un procesador ARM dual-core. Haciendo uso de herramientas y recursos de alto nivel se desarrollará la aplicación sobre lógica programable que permitirá validar el funcionamiento de la metodología elegida, así como, concluir si es posible la integración como *firmware* del algoritmo seleccionado en un dispositivo de estas características indicando una serie de pautas, requisitos y requerimientos necesarios para la migración del algoritmo a cualquier sistema embebido de monitorización basado en FPGA's.

1.2. Fases

Las fases que se han seguido para la realización de este proyecto han sido:

- 1.- Estudio y análisis del Algoritmo seleccionado para ser implementado.
(2 semanas)
- 2.- Programación como aplicación *software* del algoritmo. Optimización y validación.
(3 semanas)
- 3.- Análisis de los resultados de la herramienta desarrollada. Requisitos y necesidades para la migración como *software* embebido para FPGA.
(1 semana)
- 4.- Implementación del proyecto *software* embebible.
(6 semanas)
- 5.- Pruebas de validación y análisis de resultados.
(2 semanas)
- 6.- Documentación y memoria del proyecto.
(2 semanas)

2. SHM y el entorno aeronáutico

Este capítulo persigue, en primer lugar, exponer el fundamento de los sistemas de análisis de integridad estructural o SHM (*Structural Health Monitoring*), así como realizar una revisión sobre el estado del arte de las técnicas de testeo no destructivo disponibles en la actualidad.

Por otro lado, se expone la importancia del análisis de integridad estructural en el campo aeronáutico, analizando las carencias encontradas en la aplicación de las técnicas de análisis no destructivo. Asimismo, se realiza un estudio sobre la madurez de las áreas tecnológicas involucradas y se plantea una vía de investigación alrededor de la automatización de los sistemas de SHM.

Se concluye mostrando que la utilización de un sistema de SHM basado en la técnica de ondas guiadas ultrasónicas es un camino válido para abordar las carencias encontradas. Camino éste que se ha seguido durante la investigación y cuyos resultados se presentarán en los capítulos posteriores.

2.1. Fundamento de los sistemas de SHM

Los sistemas de monitorización de integridad estructural (SHM o Structural Health Monitoring) surgen ante la necesidad de controlar la integridad de las estructuras a lo largo de su vida útil y de mejorar los métodos de evaluación y testeo no destructivos (NDE/T, *nondestructive evaluation and testing*). En los últimos años, se aprecia un continuo crecimiento en el rol de los métodos NDE/T para asegurar la calidad de los componentes antes de entrar en servicio y para monitorizar la degradación durante la vida útil y evitar así fallos prematuros de las estructuras.

El proceso SHM consiste, por una parte, en analizar una estructura concreta capturando de manera periódica su respuesta dinámica, y por otra, en realizar un análisis detallado de dicha característica para determinar la integridad de la estructura. La definición del término SHM incluye la integración de dispositivos sensores y posiblemente de dispositivos actuadores para grabar las cargas y condiciones de daño a las que se encuentra sometida una estructura, para posteriormente analizar los datos, localizar los problemas y predecir la respuesta de la estructura, de modo que el NDE/T se convierta en una parte integral de la misma estructura. De esta manera, el mantenimiento de las estructuras se limita a situaciones en las que la técnica SHM determina que hay una clara evidencia de que se encuentra próximo un deterioro estructural, lo que se conoce en inglés como *on condition maintenance* (OCM).

Como se aprecia de la Figura 1, un sistema de SHM tiende a imitar el funcionamiento del sistema nervioso humano. En esta analogía, los nervios se sustituyen por sensores y el cerebro por una unidad de procesamiento de la información que suministran dichos sensores. De esta manera, ambos sistemas son capaces de detectar, cuantificar y localizar los daños ocasionados, siendo incluso capaces de discernir entre diferentes tipos de desperfectos.

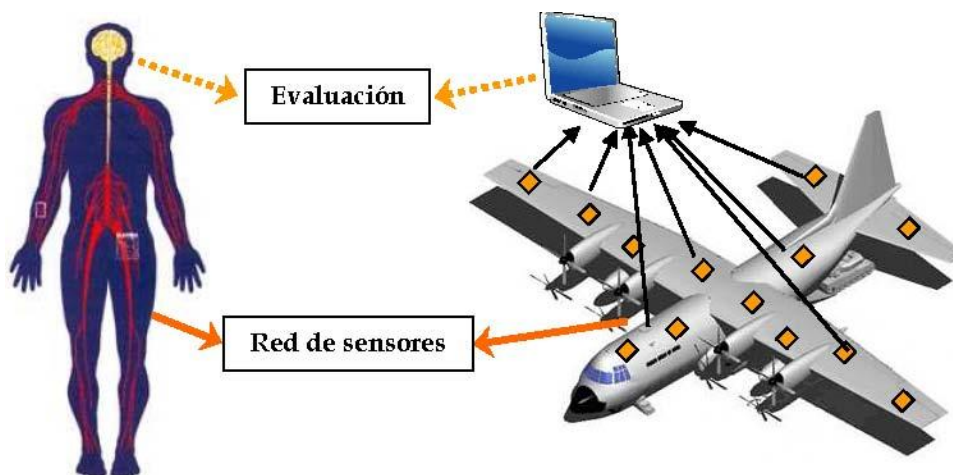


Figura 1. Analogía entre el sistema nervioso humano y un sistema de SHM instalado en una aeronave. Los sensores distribuidos por la estructura de la aeronave cumplen la función de las terminaciones nerviosas del cuerpo humano, mientras un computador realiza la función del cerebro.

Entre las diferentes imperfecciones que pueden darse en una estructura aeronáutica, destacan las siguientes:

Fracturas por fatiga, particularmente en uniones.

Corrosión, en el interior de uniones y en compartimentos cerrados.

Delaminación, por corrosión en uniones y en estructuras de panal de abeja (despegado de la cubierta).

Daños por impacto en materiales compuestos.

Daños ocasionados durante la fabricación en materiales compuestos.

Despegado de rigidizadores en paneles de material compuesto.

Etc.

En la Figura 2 se pueden apreciar algunos de los tipos de daños comentados, para estructuras de material aeronáutico.



Figura 2. Ejemplo de daños en estructuras aeronáuticas: despegado, fractura y corrosión.

Por otra parte, en la Figura 3 se representa el proceso que sigue un sistema SHM para llegar a la detección y caracterización de un defecto. Una serie de actuadores/sensores adheridos a la estructura se utilizan para realizar los ensayos no destructivos. Uno de los actuadores (en la figura, el elemento número 1) se excita, por ejemplo, con una forma de onda determinada, transmitiendo a la estructura una señal que viaja por el material y es recibida por los sensores (elementos 2, 3 y 4). Las señales adquiridas se digitalizan y se dibujan con un programa específico de representación para después generar una imagen bidimensional que representa la estructura analizada y los defectos encontrados en ella. Asimismo, se puede llegar a crear una imagen tridimensional que represente las características de la estructura y la posición de los posibles defectos.

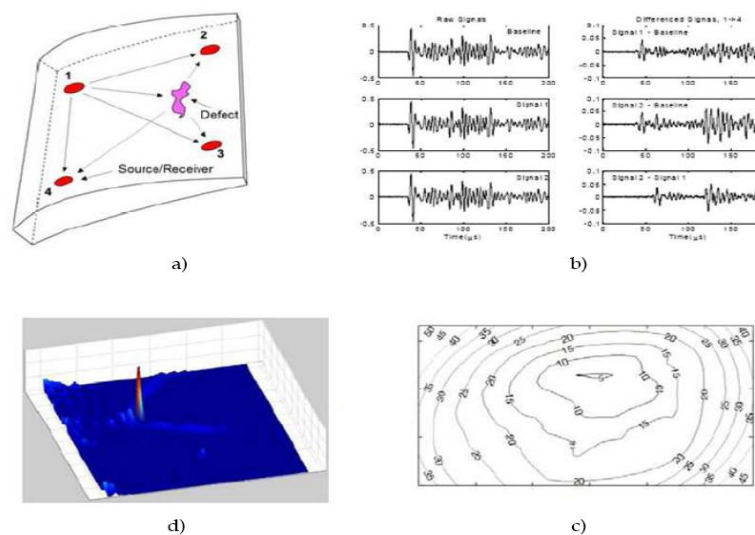


Figura 3 Modo de funcionamiento de un sistema de SHM. a) En primer lugar se transmite una señal a la estructura utilizando el transductor número 1 (que cumple la función de actuador), la señal se propaga por la estructura y después de sufrir múltiples rebotes en la misma, se adquiere mediante los transductores 2, 3 y 4, que actúan como sensores. b) Representación de las señales adquiridas por los sensores. c) Representación de la imagen ultrasónica bidimensional, indicando la posición del defecto. d) Representación tridimensional de la estructura, mostrando la posición y gravedad del defecto.

Los sistemas de SHM pueden estar basados en alguna de las muchas técnicas de NDE/T existentes en la actualidad. Por ello, a continuación se presentan las técnicas de NDE/T más utilizadas en la actualidad en el campo aeroespacial, haciendo hincapié en las características diferenciadoras de cada una de ellas, así como en su rango de aplicación.

2.2 Las técnicas de inspección no destructiva en aeronáutica

En el campo aeronáutico, actualmente se utilizan varios tipos de técnicas de NDE/T para asegurar la completa integridad de las estructuras aeronáuticas. En el presente apartado se van a mostrar algunas de las técnicas más utilizadas.

En la actualidad, las estructuras aeronáuticas se realizan tanto con materiales metálicos como con materiales compuestos. De entre todos los métodos de inspección no destructiva utilizados en la actualidad en aeronáutica, algunos de ellos sólo son aplicables a un tipo de material, mientras que otros se pueden aplicar tanto a metales como a materiales compuestos. No obstante, aunque el objetivo de todos los métodos sea la detección de defectos sin alterar la propia estructura sometida a monitorización, todos los métodos están basados en principios científicos distintos.

De entre todas las técnicas de testeo no destructivo disponibles en el campo aeroespacial, destacan las siguientes:

- **INSPECCIÓN VISUAL.**

La inspección visual es la forma natural de evaluar la integridad de los componentes estructurales. Este método es efectivo a la hora de detectar daños superficiales o casi superficiales. El método de inspección visual es el más común de los métodos utilizados para el análisis de aeronaves que se encuentran en servicio. No obstante, en la práctica se utilizan diversas variantes de este método. Éstas incluyen varios niveles de sofisticación, desde un simple examen visual hasta la utilización de microscopios manuales. Un operario, con la ayuda de su vista, no puede dar demasiados detalles sobre la formación o la severidad de un daño. Asimismo, la inspección visual realizada sin elementos auxiliares (lupas, microscopios, etc.) presenta grandes limitaciones a la hora de analizar estructuras de material compuesto, en las que los daños ocurren normalmente bajo la superficie. Aunque la microscopía puede

proporcionar información detallada sobre microfisuras e inicios de fisuras en elementos metálicos o áreas con delaminación en estructuras de material compuesto, sólo puede ser utilizada en condiciones de laboratorio, debido a que el componente a analizar debe ser desmontado de la aeronave.

- EDDY CURRENT FOIL SENSORS (ECFS).

Este método se utiliza principalmente en operaciones de mantenimiento. Se basa en la generación de un campo de corrientes de Eddy o Foucault sobre la estructura, de cara a detectar la aparición de defectos superficiales de hasta 6 mm de profundidad (Figura 4). Las fisuras o zonas con corrosión hacen variar el campo de corrientes de Foucault generado por la sonda correspondiente. Este método sólo es aplicable en estructuras metálicas y se utiliza en componentes limitados de la aeronave, como ruedas, frenos y otros, sin necesidad de desmontar dichos elementos. Se utilizan técnicas tanto de alta como de baja frecuencia, e inspección dinámica. Esta técnica requiere desplazar la bobina por toda la estructura, por lo que no es apta para diseñar un sistema embarcable.

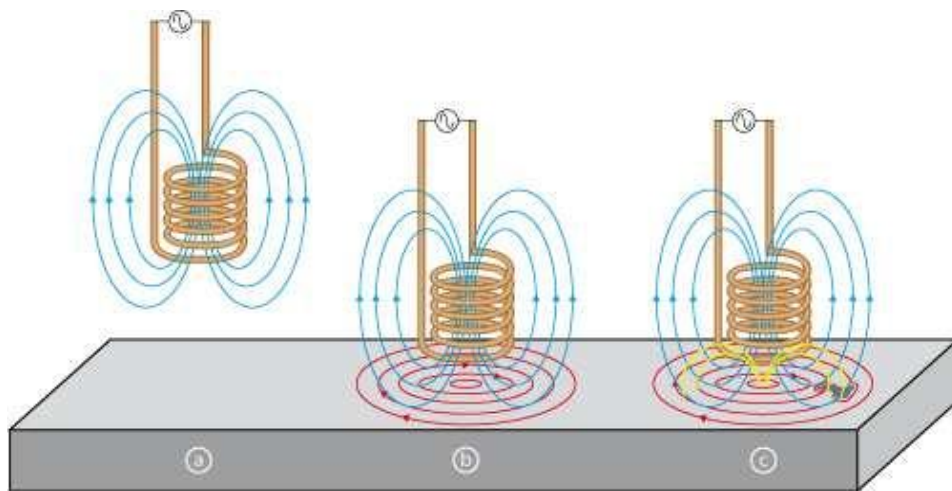


Figura 4. Funcionamiento de la técnica de ECFS. a) La corriente alterna (de una cierta frecuencia) que fluye a través de la bobina de una sonda, genera un campo magnético alrededor de la bobina. b) Cuando se sitúa la bobina cerca de un material conductor de la electricidad, se inducen unas corrientes de Foucault en el material. c) En caso de existir un defecto en el material conductor, la circulación de las corrientes de Foucault se distorsiona y el acoplamiento magnético con la sonda se ve alterado, permitiendo detectar la presencia de un defecto en base a la variación de la impedancia de la bobina .

- COMPARATIVE VACUUM MONITORING (CVMTM).

La técnica de CVMTM fue patentada por Ken Davey en 1995. Esta técnica se basa en la utilización de una sonda especial formada por cavidades que se encuentran alternadamente en el vacío y a presión atmosférica. La sonda se encarga de medir el incremento de la diferencia de presión entre las cavidades, de modo que si en la estructura no existe ningún defecto, las cavidades en vacío se mantienen a la misma presión. Sin embargo, si se desarrolla un defecto en el material, el aire fluirá desde las cavidades a presión atmosférica hacia las cavidades en vacío (Figura 5). La sonda mide el flujo de aire entre cavidades contiguas, por lo que las diferencias de presión medidas son indicativas de defectos estructurales en la superficie, como fisuras, corrosión o desprendimientos en uniones con adhesivos. La técnica de CVMTM se puede utilizar tanto en metales como en materiales compuestos. La técnica requiere de contacto directo con la superficie de la estructura y un desplazamiento de la sonda o de la estructura, por lo que el uso de esta técnica está limitado a laboratorio o taller.

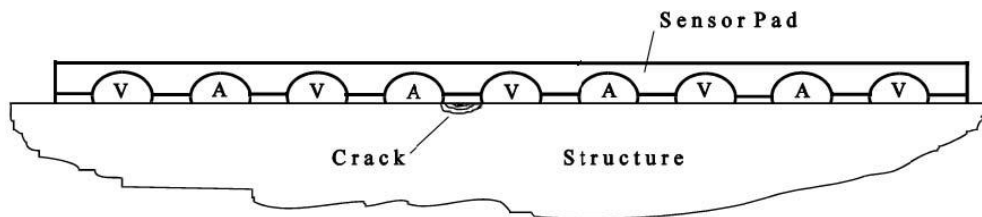


Figura 5. Sonda para el análisis mediante CVMTM. Cuando un defecto se encuentra entre cavidades adyacentes que se encuentran en el vacío (V) o bajo presión atmosférica (A), se produce un incremento en la diferencia de presión entre las cavidades.

- MICROWAVE ANTENNAS (MWA).

Las antenas de microondas emiten y captan microondas que delatan la presencia de inclusiones de agua en el material compuesto y en estructuras de tipo sándwich. Se utilizan, por supuesto, en materiales compuestos, pero no se pueden utilizar en materiales metálicos, dado que las microondas son bloqueadas por dichos materiales.

- PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.

Este método se basa en la creación de campos magnéticos mediante la utilización de partículas ferromagnéticas que se sitúan sobre piezas imantadas. La técnica de partículas magnéticas se utiliza en piezas magnéticas para detectar grietas superficiales y subsuperficiales, de hasta 6 mm de profundidad, por lo que su aplicación se limita a dichos materiales.

- FIBER BRAGG GRATINGS (FBG).

Estos sensores de fibra óptica contienen un segmento de fibra óptica (grating) que refleja unas determinadas longitudes de onda lumínicas y deja pasar otras. Al adherir las fibras de Bragg en el material a monitorizar, las fibras sufren las mismas deformaciones que el material. Al estar las fibras fijadas a una estructura, permiten medir las tensiones de origen térmico o mecánico a las que está siendo sometida la estructura, los cambios de temperatura, desperfectos causados por impactos, así como delaminaciones, tanto en metales como en materiales compuestos. En la Figura 6 se muestra la estructura de una fibra de Bragg, mostrando el perfil del índice de refracción y la respuesta espectral.

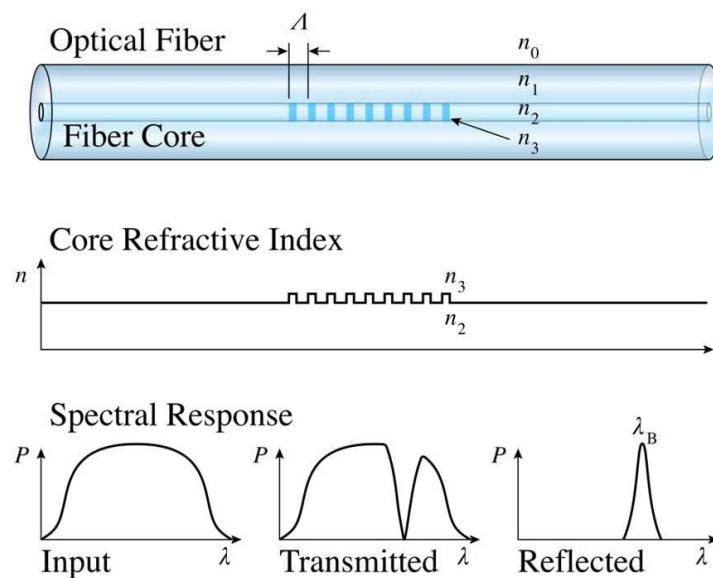


Figura 6. Estructura de una fibra de Bragg, mostrando además el perfil del índice de refracción que cambia a lo largo del núcleo de la fibra. La respuesta espectral de la fibra muestra cómo una señal de entrada de banda ancha se divide en las componentes transmitida y reflejada.

- EMISIÓN ACÚSTICA (DEL INGLÉS ACOUSTIC EMISSION O AE).

La técnica de AE es una de las primeras y más extendidas técnicas de NDE/T para la detección de defectos estructurales. Existe numerosa documentación disponible sobre esta técnica. Se trata de una técnica totalmente pasiva, que se basa en la lectura de las ondas de estrés provenientes de los defectos que surgen en el interior del material, cuando éste es sometido a cargas externas (Figura 7). Las ondas de estrés tienen una corta duración y presentan una energía significativa entre 100 kHz y 1000 kHz. Una de las ventajas de esta técnica es que el número de transductores a utilizar para realizar la detección es relativamente bajo. La técnica de emisión acústica se puede utilizar para analizar tanto metales como materiales compuestos.

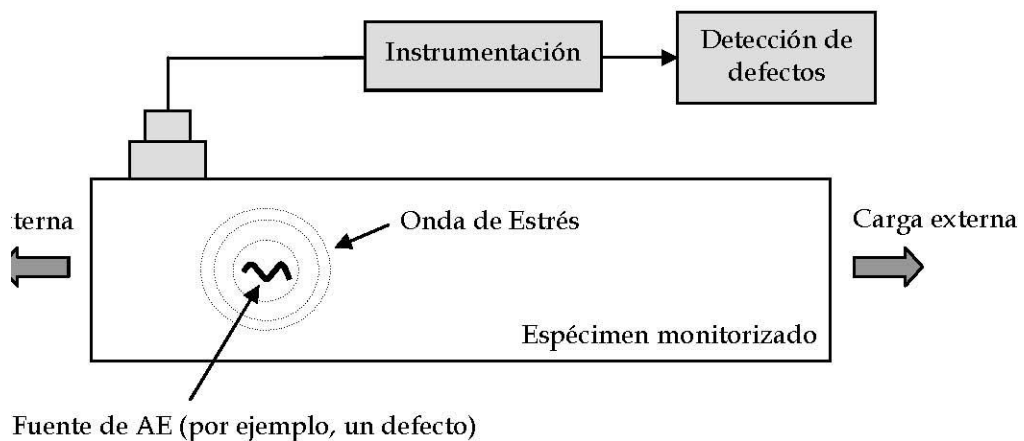


Figura 7. Aplicación de la técnica de Emisión Acústica o AE (Acoustic Emission) para la detección de las ondas de estrés generadas en el interior de un material.

Las técnicas de testeo no destructivo presentadas en este capítulo se emplean actualmente, entre otras, para asegurar la completa integridad estructural de una aeronave. Estas técnicas se utilizan para analizar las estructuras aeronáuticas durante el proceso de fabricación y durante los periodos de mantenimiento, en los que las aeronaves se llegan a desmontar pieza a pieza.

Sin embargo, según su definición, un sistema de SHM debe ser capaz de realizar la detección de los defectos y su posterior caracterización. Para un análisis SHM a largo plazo, este proceso se repite periódicamente actualizando la información relativa a la

capacidad de la estructura para ejecutar la función para la que ha sido diseñada, teniendo en cuenta su inevitable envejecimiento y degradación resultado del entorno de operación en el que se encuentra.

Es por ello que algunas de las técnicas expuestas, por su propio fundamento, presentan impedimentos de cara a realizar la detección y caracterización autónoma (sin gestión externa) de los daños. Asimismo, técnicas como ECFS o CVMTM, en la mayoría de los casos no pueden ser automatizadas debido a que, para realizar el susodicho examen estructural, previamente se debe desmontar la estructura de la aeronave en la que se encuentra alojada.

Por consiguiente, si se desea diseñar un sistema de SHM autónomo, se debe buscar un método de entre los expuestos que no suponga ningún impedimento a su implantación. Una de las técnicas que se presenta como una solución viable de cara a la automatización y el funcionamiento autónomo de un sistema de SHM es la técnica basada en la toma de imágenes ultrasónicas utilizando las propiedades de las ondas guiadas ultrasónicas, también conocidas como ondas de Lamb. Las ondas de Lamb son particularmente atractivas para detectar deterioros en las estructuras aeronáuticas, como demuestra la ingente cantidad de literatura que se ha publicado durante los últimos quince años. Este método tiene una gran proyección debido a que permite realizar múltiples ensayos que abren la puerta al equipamiento embebido basado en esta técnica

2.3 Introducción a los sistemas basados en ondas de Lamb

Actualmente, los sistemas SHM basados en ondas de Lamb son sistemas exclusivamente destinados a su uso en laboratorio, permitiendo analizar los fenómenos del método y su aplicación a diferentes especímenes. Es por ello que estos sistemas necesitan costosos y voluminosos equipos para funcionar, tales como osciloscopios o generadores de señal, algo por otra parte lógico dado su propósito de laboratorio. No obstante, en la actualidad existen equipos ultrasónicos comerciales dedicados para SHM que integran todas las funciones de los sistemas de laboratorio, pero que debido a su elevado peso, volumen y energía consumida tampoco hacen factible su embarcado en una aeronave. El fabricante Accellent dispone de equipos dedicados a SHM que sí pueden ser utilizados de manera portátil, pero que sólo cumplen una función

determinada, como detección de impactos, detección de fisuras y roturas o análisis de materiales compuestos.

El Dr. Victor Giurgiutiu, del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Sur de Carolina (Columbia), ha realizado varias patentes sobre sistemas de SHM basados en la técnica de ondas guiadas ultrasónicas. La primera de estas patentes, presenta algunas técnicas y procedimientos de análisis mediante ondas ultrasónicas y plantea de manera teórica la creación de un sistema de gran potencia y versatilidad, que permita desarrollar técnicas de análisis avanzado como, por ejemplo, *Beamforming* sintético en transmisión y recepción, time reversal, etc. Sin embargo, dicha patente no expone la arquitectura electrónica que sería necesaria para hacer posible este sistema, lo cual hace que se encuentre con una serie de problemas o limitaciones que hacen inviable su utilización embarcada.

En una segunda patente, el Dr. Giurgiutiu plantea una extensión de la primera patente, donde se describe un sistema omnidireccional (en 360°) para la detección de defectos estructurales, explicando el funcionamiento y fundamento del sistema, pero de nuevo, sin plantear la arquitectura electrónica que sería necesaria para llevar a cabo dicho sistema de monitorización. Al igual que la primera patente, esta patente se basa en un sistema secuencial que sólo puede actuar sobre un canal, o al menos con una sola señal de excitación, y con una sola señal de recepción, gestionadas a través de un procesador de señal, evidentemente secuencial.

En una tercera patente y en un artículo, el mismo Dr. Giurgiutiu describe un sistema portátil, de pequeñas dimensiones, bajo coste y peso, basado en la técnica de medida de la impedancia electromecánica (E/M). La técnica de impedancia E/M se utiliza principalmente para detectar defectos en campo muy cercano. Sin embargo, esta técnica no es aplicable a campo lejano porque no proporciona la suficiente resolución de cara a la detección y localización de defectos en campo lejano. La técnica de ondas guiadas ultrasónicas que se ha propuesto como vía de se puede utilizar tanto en campo cercano como en campo lejano, por lo que el ámbito de aplicación y las técnicas de análisis utilizables por el equipo planteado en la tercera patente y el sistema que AERNNOVA está desarrollando tienen enfoques totalmente diferentes. Además, esta

técnica utiliza un único sensor y, por tanto, sería imposible utilizar las técnicas avanzadas de múltiples canales.

Se ha encontrado otra serie de patentes relacionadas con la técnica de E/M, pero debido a las limitaciones ya comentadas, no se van a mostrar en este documento para no hacer de nuevo incapié sobre las mismas limitaciones.

Otros autores han planteado propuestas de cara a un equipamiento embebido basado en ondas guiadas ultrasónicas, utilizando diferentes placas de evaluación de componentes electrónicos. Aunque, una solución como las que se han planteado, puede inicialmente parecer lo suficientemente viable, la no utilización de *arrays* de transductores impide poner en práctica técnicas como *Round Robin* o *Beamforming* sintético, indispensables para llevar a cabo un sistema básico de SHM basado en ondas guiadas ultrasónicas. No hablemos ya del planteamiento de un sistema avanzado de SHM que permita utilizar técnicas avanzadas como *Beamforming*, el algoritmo de autoenfoco, time reversal, etc.

En definitiva, queda patente que los sistemas SHM basados en ondas guiadas ultrasónicas disponibles en la actualidad presentan una importante carencia: no están basados en arquitecturas electrónicas específicas y eficaces que permitan desarrollar dispositivos embarcables de pequeño volumen, por lo que no se pueden utilizar en una aeronave para realizar análisis de integridad estructural en modo autónomo y en tiempo real.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se van a explicar, brevemente, los fundamentos físicos teóricos más importantes para la comprensión de este proyecto.

3.1. ONDAS DE *LAMB*

Las ondas guiadas son perturbaciones elásticas que pueden propagarse largas distancias en estructuras de pared delgada con una baja pérdida de energía, además permanecen confinadas entre las paredes de dichas estructuras durante su propagación. Estas características las hacen muy interesantes para ser empleadas en las técnicas de evaluación no destructiva y en los sistemas de *SHM*.

Entre las ondas guiadas, las más interesantes en nuestro caso, son las ondas de *Lamb*. Como ya se ha dicho, estas ondas se caracterizan porque las paredes de las estructuras por las cuales se propagan, cuyos espesores serán menores que la longitud de onda, son dos superficies paralelas libres, es por ello que también se las conoce como ondas de placa.

No es objetivo de este capítulo realizar un amplio análisis matemático sobre la solución al problema de la propagación de las ondas de *Lamb*, sino presentar los puntos más importantes para entender mejor el origen teórico de los resultados que se obtendrán.

- PROPAGACIÓN RECTA DE LAS ONDAS DE *LAMB* EN MATERIAL ISÓTROPO

Aplicando la teoría de la elasticidad para un sólido elástico, isótropo y homogéneo se obtienen las siguientes relaciones:

$$\text{Ecuaciones de esfuerzos: } \sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

$$\text{Ecuaciones de compatibilidad en deformaciones: } \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3.2)$$

$$\text{Ley de Hooke: } \sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (3.3)$$

donde σ_{ij} representa el tensor de esfuerzos, ρ la densidad, f_i las fuerzas por unidad de masa, u_i el vector de desplazamiento, ε_{ij} el tensor de deformaciones, λ y μ son las constantes de *Lamé* y δ_{ij} es la delta de *Kronecker*.

Mediante las ecuaciones anteriores se obtienen las ecuaciones de *Navier*:

$$(\lambda + \mu)u_{j,ji} + \mu u_{i,jj} + \rho f_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (3.4)$$

que expresadas de manera vectorial resultan:

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot \bar{u}) + \mu\nabla^2\bar{u} + \rho\bar{f} = \rho \frac{\partial^2\bar{u}}{\partial t^2} \quad (3.5)$$

Manipulando estas ecuaciones y aplicando las condiciones de contorno apropiadas se puede llegar a dividir el problema en términos pares e impares. Para aplicar las condiciones de contorno se considera que las ondas se propagan a través de una placa homogénea e isotrópica, cuyas superficies están libres de esfuerzos (véase la figura 8).

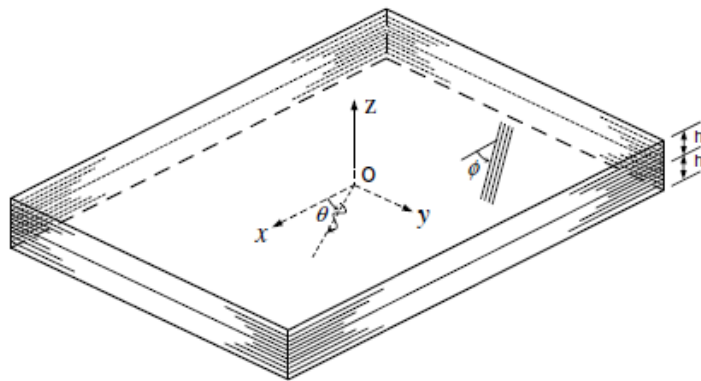


Figura 8. Placa infinita de espesor 2h con superficies libres de esfuerzos

Esta división del problema en términos pares e impares, muestra que las ondas de *Lamb* están formadas por una suma de modos simétricos y antisimétricos (ver Anexo A). El modo simétrico también es conocido como longitudinal, ya que las partículas de la zona media o fibra neutra se comportan según oscilaciones puramente longitudinales; en cambio, al modo anti simétrico se le denomina de flexión, dado que las partículas de la zona media se desplazan según oscilaciones puramente transversales, como se observa en la figura 9.

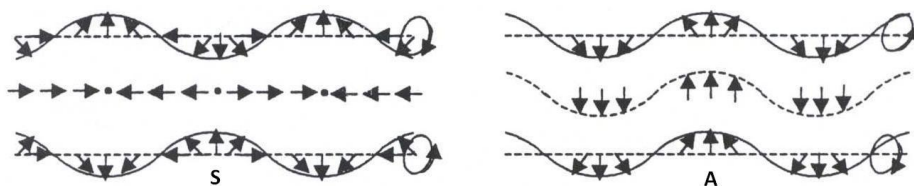


Figura 9 Modos simétrico (S) y anti simétrico (A) de las ondas de Lamb

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones se llega al siguiente sistema de ecuaciones:

$$\text{Para los modos simétricos: } \frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2pq}{(q^2-k^2)^2} \quad (3.6)$$

$$\text{Para los modos anti simétricos: } \frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2-k^2)^2}{4k^2pq} \quad (3.7)$$

donde $p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2$, $q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2$ y $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ (c es la velocidad de fase, k el número de onda y ω la pulsación).

Estas ecuaciones son conocidas como relaciones de frecuencia de *Rayleigh-Lamb*, o curvas de dispersión. Mediante la resolución de estas ecuaciones se obtiene la velocidad de fase, c_p a partir de ahora, para ambos modos. Estas ecuaciones no pueden resolverse de forma analítica y es necesario aplicar algún tipo de algoritmo numérico. Ambas ecuaciones presentan un número infinito de soluciones, cada una de las cuales equivale a un orden diferente de los modos, tanto simétrico como anti simétrico. Por lo tanto, queda clara la naturaleza dispersiva de las ondas de Lamb, ya que la velocidad de fase c , a través de la variable k , es una función de la frecuencia de la onda, presente en las variables p , q y k .

Considerando la velocidad de los paquetes de ondas de *Lamb* viajando a través de la placa, podemos definir el concepto de velocidad de grupo c_g , que está relacionada con la velocidad de fase a través de la expresión:

$$c_g = \frac{c_p}{1 - \frac{\omega}{c_p} \frac{\partial c_p}{\partial \omega}} \quad (3.8)$$

En la figura 10 se muestra un ejemplo de las curvas de dispersión de las velocidades de fase y de grupo, las cuales representan dichas velocidades en función del

producto de la frecuencia de la onda por el espesor de la placa (fd), para un grupo de modos simétricos y anti simétricos:

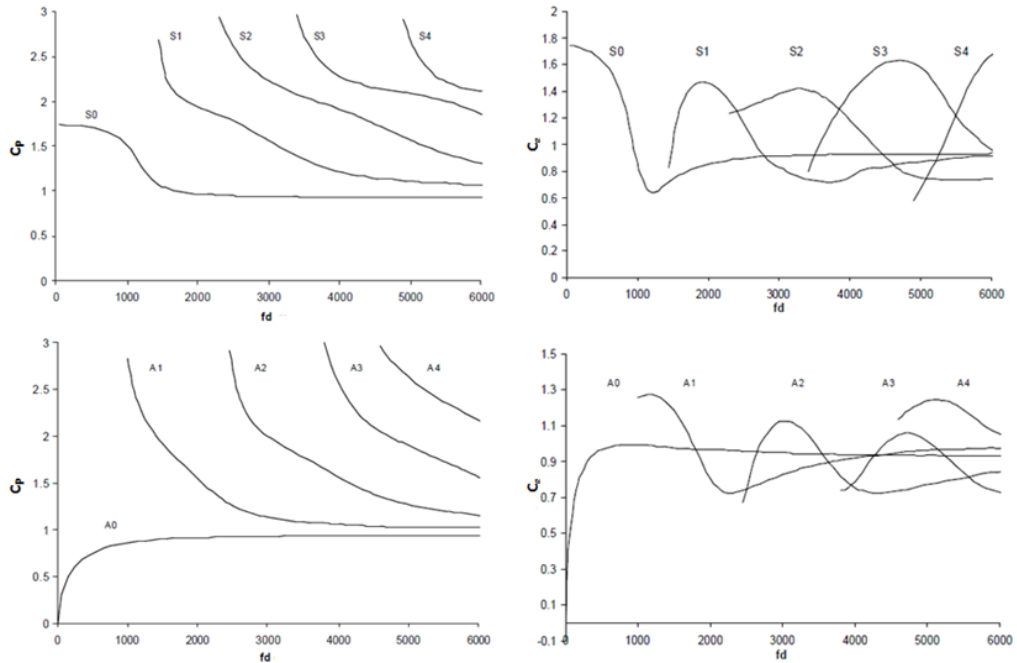


Figura 10. Curvas de dispersión de los modos simétricos y anti simétricos para la velocidad de fase, CP (izquierda) y velocidad de grupo, Cg (derecha)

Esta cualidad dispersiva de la velocidad de propagación con la frecuencia es de vital importancia para entender las dificultades y imitaciones del uso de este tipo de ondas a la vez que su comprensión permite diseñar estrategias validas para trabajar con ellas.

3.2. EFECTO PIEZOELÉCTRICO

El efecto piezoeléctrico es un fenómeno por medio del cual determinados cristales generan una corriente eléctrica al ser sometidos a esfuerzos mecánicos (efecto piezoeléctrico directo). Este fenómeno también se presenta a la inversa, es decir, los cristales se deforman al ser sometidos a un campo eléctrico. De esta forma, podrán ser

excitados mediante corrientes eléctricas para que vibren a la frecuencia deseada y transmitan esa vibración a la estructura y de modo inverso convertir su vibración en una corriente eléctrica al recibir las señales.

Para este proyecto, es vital un conocimiento exhaustivo de este efecto y del comportamiento de los transductores piezoeléctricos ya que constituyen la base física sobre la que se sustenta la detección de daños propuesta en este trabajo.

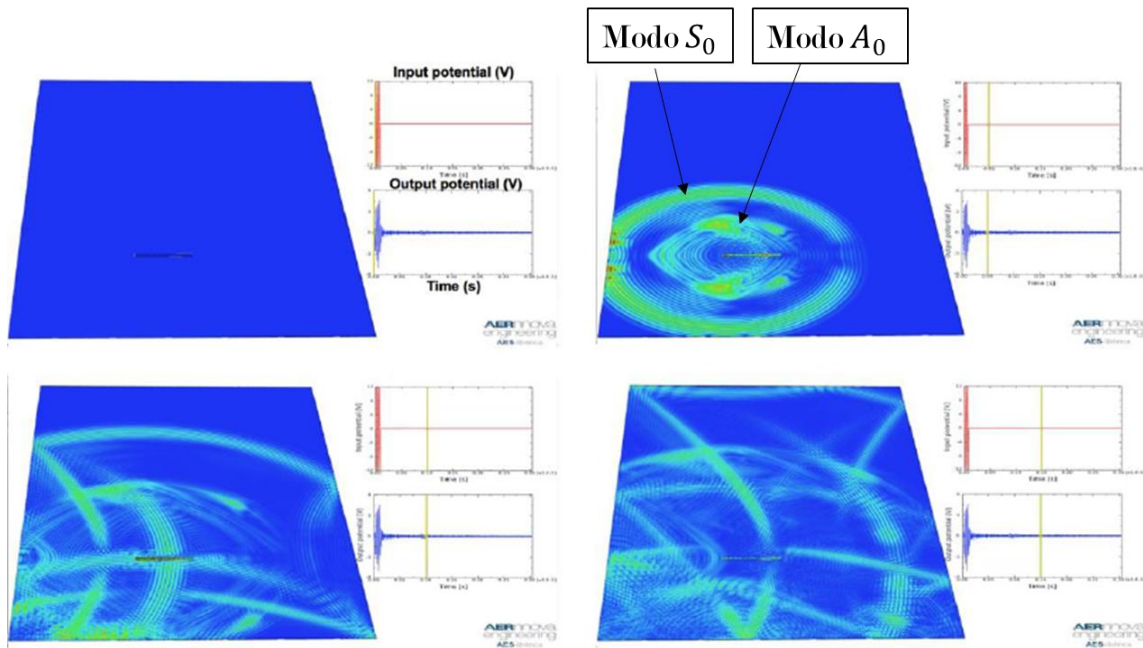


Figura 11. Diferentes momentos de la simulación por elementos finitos de un panel de aluminio excitado mediante un transductor piezoeléctrico adherido a su superficie, en los que se puede observar la evolución de la propagación de las ondas y los dos modos, simétrico(S₀) y anti simétrico(A₀), de los que se compone la perturbación generada.

Como se ha comentado, el efecto piezoeléctrico es un fenómeno que presentan determinados cristales que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica en su masa, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie (efecto piezoeléctrico directo). Este fenómeno también se presenta a la inversa, es decir, los cristales se deforman al ser sometidos a un campo eléctrico. El efecto piezoeléctrico es normalmente reversible, al dejar de someter los cristales a un voltaje exterior o campo eléctrico recuperan su forma.

Los materiales piezoeléctricos son cristales naturales o sintéticos que no poseen centro de simetría. El efecto de una compresión o de un cizallamiento consiste en

disociar los centros de gravedad de las cargas positivas y de las cargas negativas. De esta forma aparecen dipolos elementales en la masa y, con ello, cargas de signo opuesto en las superficies enfrentadas.

Pueden distinguirse dos grupos de materiales: los que poseen carácter piezoeléctrico de forma natural (cuarzo, turmalina) y los llamados ferro-eléctricos, que presentan propiedades piezoeléctricas tras ser sometidos a una polarización (tantalio de litio, nitrato de litio, berlinita en forma de materiales mono-cristalinos y cerámicas o polímeros polares bajo forma de micro-cristales orientados).

Las ecuaciones constitutivas de los materiales piezoeléctricos combinan tensiones, deformaciones y comportamiento eléctrico y de forma simplificada pueden escribirse como:

$$(D) = \varepsilon(E)$$

$$(S) = [s](T)$$

donde D es la densidad de flujo eléctrico, ε es la permitividad, E es el campo eléctrico, S es la deformación y T la tensión.

Estas ecuaciones pueden combinarse en una ecuación que considera la relación entre carga y deformación:

$$(S) = [s^E](T) + [d]^T(E)$$

$$(D) = [d](T) + [\varepsilon]^T(E)$$

aquí d representa las constantes piezoeléctricas del material, y el superíndice E indica que la magnitud está medida bajo campo eléctrico constante o cero.

3.3. TECNICA DE INSPECCION *ROUND ROBIN*

El análisis Round Robín se basa en un *array* de N transductores dispuestos sobre la estructura que se desea monitorizar, y mediante el cual se obtienen N^2 señales de adquisición. El procedimiento consiste en alternar la señal de excitación y la señal de adquisición entre los transductores disponibles, generándose la excitación siempre por un único canal. Es en definitiva la realización en serie de todos los ensayos simples (un canal emite, todos leen) posibles dentro del *array*.

Para nuestro caso, en el que se utilizan doce transductores, se obtienen un total de 144 señales diferentes. Es habitual que los sistemas utilicen canales específicos para la excitación y otros para la adquisición, pero el *hardware* que se está desarrollando bajo el proyecto PAMELA tiene la capacidad de adquirir, simultáneamente a la excitación, la señal medida en el piezoeléctrico de excitación nada más terminar la generación de la señal de inspección.

El análisis Round Robín comienza generando la señal de excitación en el primer transductor (Emisor, E), y utilizando el mismo transductor para adquirir las señales recibidas (Receptor, R) de la estructura (ensayo E1R1). Simultáneamente se adquieren las señales medidas en los once transductores restantes hasta completar los sucesivos ensayos hasta que se llega al ensayo E1R12. A continuación, el canal de excitación se traslada al canal adyacente y, de manera secuencial, al resto de canales, y se repite el procedimiento anterior hasta que finaliza el ensayo E12R12, completando un total de 144 ensayos diferentes. A la postre, se utilizan técnicas de procesado de señal para reconstruir una imagen bidimensional de la estructura, indicando en ella los defectos encontrados

La notación ExRy se utilizará en adelante para indicar la señal medida en el piezoeléctrico de recepción asociado al canal Y cuando excitamos el canal X.

4. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN SELECCIONADA

4.1. Plataforma de desarrollo.

A lo largo de este punto se van a describir los paquetes y utilidades *software* que se han utilizado para el desarrollo de la aplicación objeto de este proyecto.

Labview es una herramienta de programación gráfica desarrollada por National Instruments. Las primeras versiones aparecieron en los años 80 y desde entonces ha ido evolucionando y ofreciendo cada vez más facilidades a los programadores de aplicaciones de adquisición de datos y automatización de sistemas industriales y de medida. En la actualidad, ya se está comercializando la versión 10 aunque la aplicación objeto de este proyecto ha sido realizada con la versión 9.1.

Los programas realizados con *Labview* se denominan *VI* (“*Virtual Instrument*”). En un *VI* se distinguen 3 partes elementales:

- El panel frontal: es la ventana en la que se sitúan los distintos elementos con los que el usuario de la aplicación va a interactuar, botones, palancas, visualizadores, gráficos etc. El programador deberá gestionar el trabajo con todos estos elementos. En función de su uso cabe distinguir entre indicadores y controles, los primeros se utilizarán para visualizar datos y exportar datos tras la ejecución, mientras los segundos serán los encargados de introducir información a la aplicación que se esté desarrollando. La figura 21 muestra un ejemplo de panel frontal.

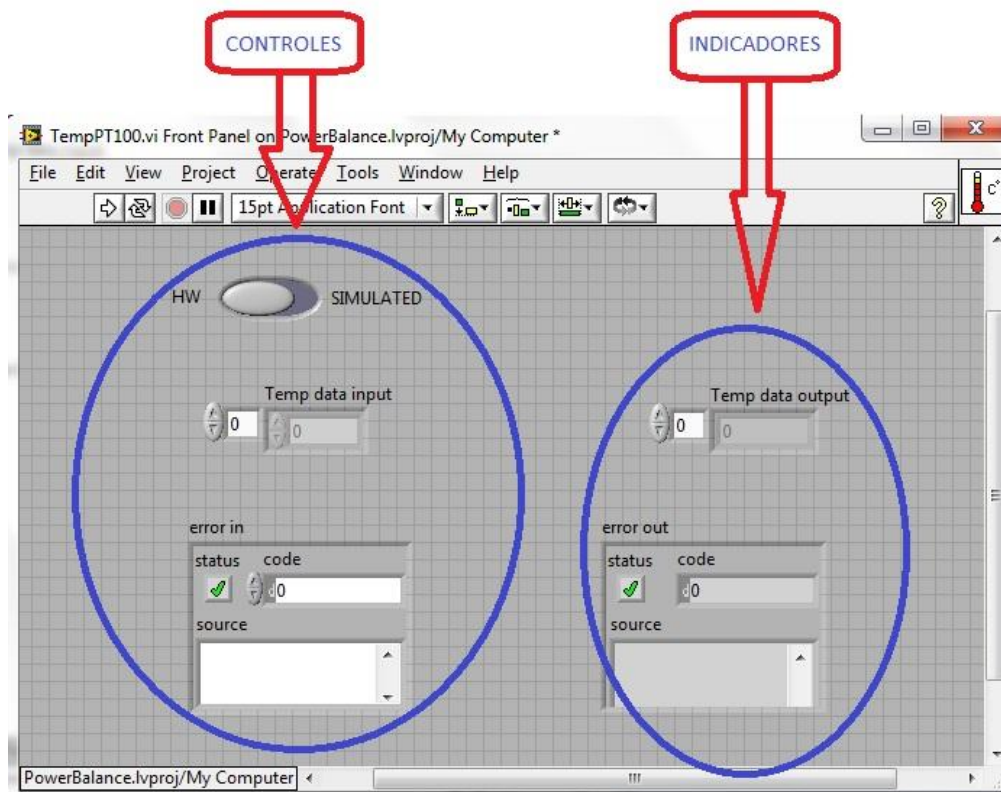


Figura 12 Panel frontal del módulo PT100.vi, donde se indican los diferentes elementos que aparecen en el mismo.

- El diagrama de bloques: es el código fuente de una aplicación desarrollada en *Labview*. En este diagrama se pueden encontrar estructuras gráficas para el control del programa, iconos correspondientes a otros *VI* que pueden ser invocados, denominados *subVI*, y elementos que se corresponden con los

controles e indicadores del panel frontal, entre otros. Las relaciones entre los objetos de un diagrama de bloques se realizan mediante interconexiones gráficas a modo de cableado.

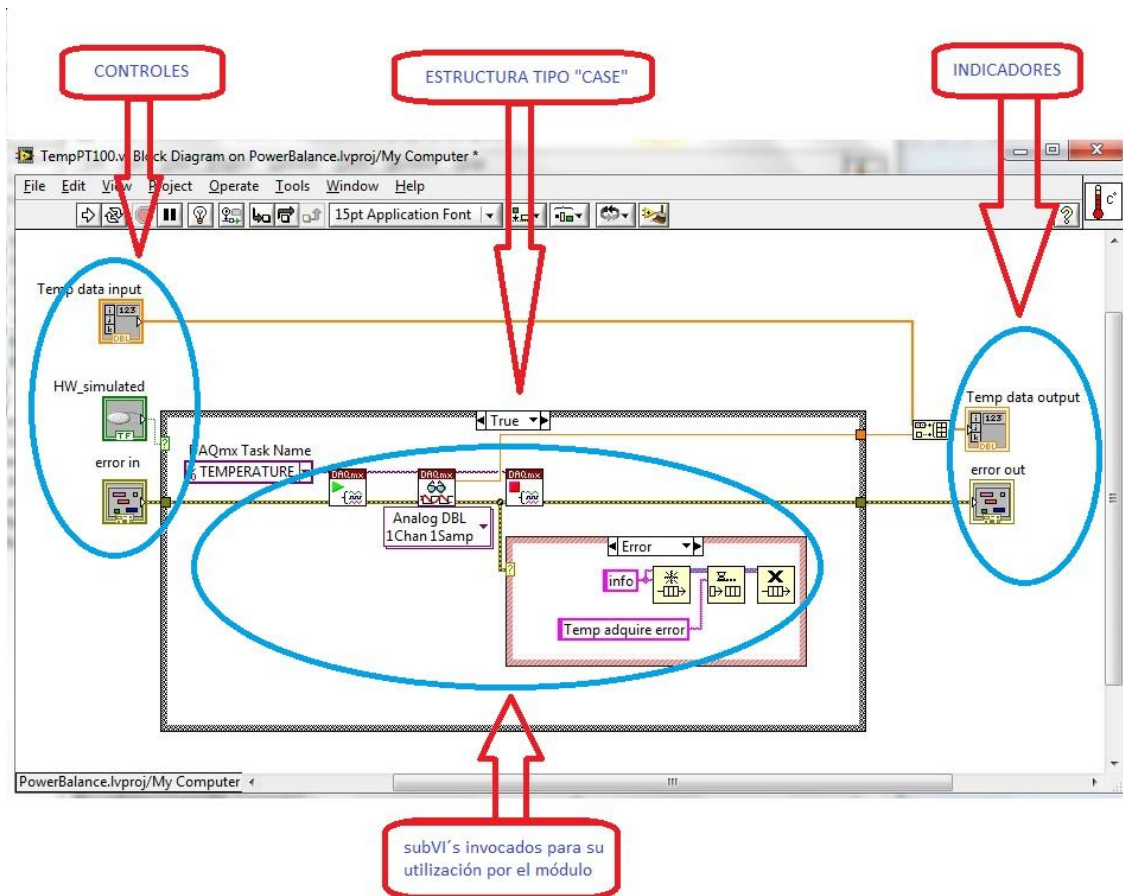


Figura 13. Diagrama de bloques del módulo TempPT100.vi en el cual se indican los diferentes elementos que lo forman. Dichos elementos intercambian información mediante líneas de datos a modo de cableado.

- El icono de conexión: es un elemento muy importante ya que sirve para que un VI pueda ser invocado desde otro VI a modo de función o subprograma. En el icono habrá que definir de forma gráfica cuales van a ser los terminales de entrada y salida del mismo. Esta última acción es equivalente a lo que en lenguajes de programación en modo texto se conoce como definición de las variables de entrada y salida de una función. *Labview* por defecto otorga a todos los VI un icono con un aspecto gráfico común, este aspecto puede ser variado a gusto del programador para que pueda guardar alguna relación con su funcionalidad de tal modo que haga más intuitivo su uso.

En el conector se asignan las entradas y salidas del módulo, pudiendo elegir entre distintos patrones, asociando dichas líneas de comunicación con los controles e indicadores del panel frontal que sean necesarios.

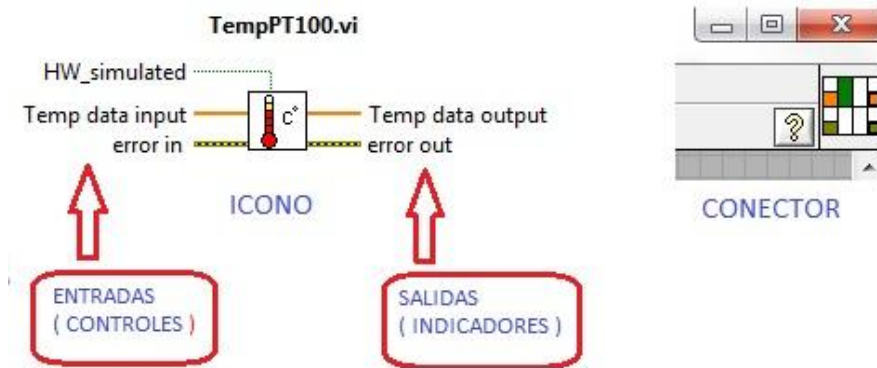


Figura 14. Icono y conector del módulo TempPT100.vi, donde se muestra la relación entre las entradas y salidas del mismo con los terminales de su conector.

El entorno de desarrollo de programas en *Labview* ofrece múltiples herramientas que facilitan la creación y depuración de VIs así como su utilización de forma jerárquica en el desarrollo de complejas aplicaciones dotadas de un interfaz gráfico muy potente y variado.

Debido a las características de *Labview* y la facilidad de uso de la programación gráfica es adecuado para aplicaciones que requieren:

Gráficos. Debido a que el programador de *Labview* nativamente construye una interfase de usuario, puede incorporar gráficos y sistemas de control fácilmente.

Mediciones (adquisición de datos, visión y movimiento de alta velocidad). National Instruments tiene una fuerte historia en E/S de alta velocidad, incluyendo adquisición de visión, para que pueda incorporar mediciones como vibración y visión de máquina a sus sistemas de control estándar.

Capacidades de Procesamiento. En algunas aplicaciones, requiere de algoritmos de control especializados, procesamiento de señales avanzadas, o acceso a datos. Utilizando *Labview*, usted puede incorporar códigos de control a la medida construidos utilizando herramientas de NI o de terceros, implementar procesamiento de señales como los JTFA, o acceso de datos locales o remotos.

Plataformas. Con *Labview*, usted puede crear códigos que ejecuten gran variedad de plataformas incluyendo una PC, un controlador incluido, un chip FPGA, o un PDA manual.

Comunicación. *Labview* hace fácil la transferencia de datos a la empresa con herramientas como conectividad de base de datos e interfaces de operador vía web.

Con el entorno gráfico de desarrollo de *Labview* se puede programar el procesador de tiempo real, la FPGA reconfigurable y las E/S de los sistemas integrados RIO para las aplicaciones de control embebido, monitorización, procesamiento y registro utilizando el mismo proyecto de *Labview*.

4.2. HARDWARE DE DESARROLLO

El equipo empleado para el desarrollo de la aplicación de detección de daños es un NI *myRIO1900*, de la familia RIO (arquitectura E/S reconfigurable), que es un dispositivo portátil y reconfigurable, principalmente de uso estudiantil y que te permite diseñar sistemas de control, robótica y mecatrónicos.



Figura 15. Equipo NI *myRIO1900*, de la familia RIO (arquitectura E/S reconfigurable) de *National Instruments*, que es un dispositivo portátil y reconfigurable, que ha sido empleado para el desarrollo de la aplicación de detección de daños

El procesador de que dispone es el tipo Xilinx Z-7010 con velocidad de 667 MHz y dos núcleos. De memoria dispone de 256 MB no volátil, una memoria DDR3 de 512 MB, la frecuencia del reloj es de 533 MHz, y el ancho del bus de datos es de 16 bits. El tipo de FPGA es la de la Xilinx Z-7010 y permite además conexión mediante Wifi o puerto USB serie. Respecto a la velocidad de las entradas analógicas tienen una resolución de 12 bits y un una velocidad de muestreo de 500 kS/s.

De forma genérica el *hardware* del dispositivo dispone de un procesador para el Real Time, una FPGA necesaria para el proyecto, y múltiples entradas/salidas analógicas y digitales como se observa en la figura 16.

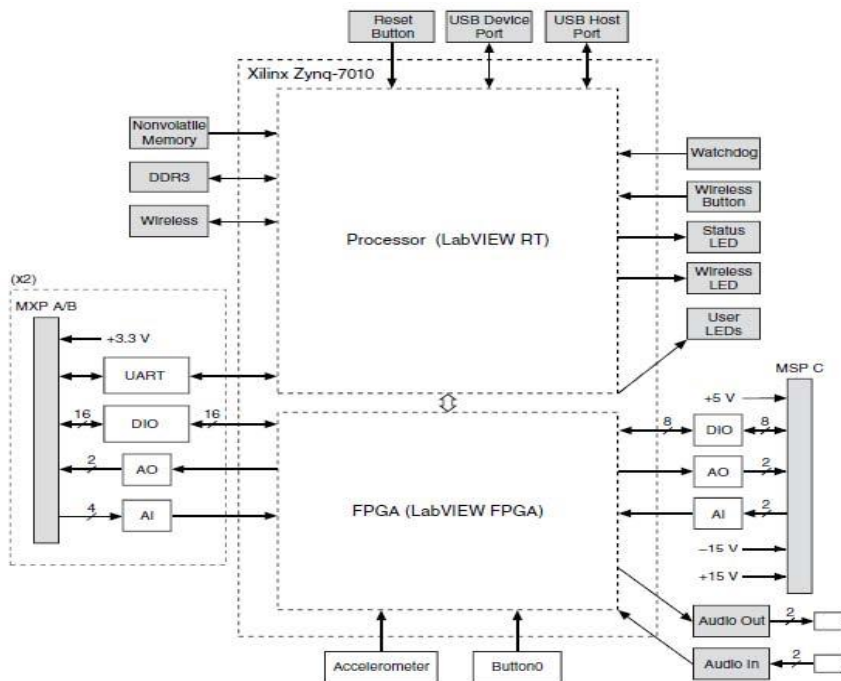


Figura 16. Diagrama de bloques de la arquitectura del dispositivo *NI myRIO1900*, de la familia RIO (arquitectura E/S reconfigurable) de *National Instrument*.

Con los módulos especializados de *Labview* se puede programar el procesador de tiempo real (módulo *Labview Real-Time*) y la FPGA (módulo *Labview FPGA*). *Labview* tiene también un amplio conjunto de drivers para conectar entre si el *software* y las aplicaciones lo cual hace que la integración de todos los componentes del *hardware* del sistema embebido (las E/S analógicas y digitales, la FPGA, el procesador, los periféricos y la memoria) sea un proceso fluido.

El procesador embebido de tiempo real dentro de los sistemas está programado con *Labview* Real-Time Module, que incluye bloques de función incorporados para el control, procesamiento, análisis, registro de datos y comunicaciones en coma flotante.

La FPGA reconfigurable dentro de los sistemas de *hardware* RIO se puede programar rápidamente con *Labview* FPGA Module para realizar la personalización, el control de alta velocidad, la temporización de las E/S y el procesamiento de señales.

Uno de los mayores retos en el diseño embebido es el esfuerzo necesario para crear, depurar y validar las pilas de *software* a nivel de driver para integrar todos los componentes de *hardware* del sistema embebido. Tradicionalmente, este proceso de integración se le deja al usuario, lo que complica y alarga el proceso de diseño del sistema embebido. Los drivers de conexión de programas y aplicaciones (middleware) de NI van más allá de los driver básicos que los ordenadores tradicionales de una sola tarjeta y otros proveedores de sistemas embebidos ofrecen para incrementar la productividad y el rendimiento y acortar el tiempo de lanzamiento del producto al mercado. Con cada dispositivo que soporta RIO se incluye el *software* del driver y el *software* adicional de los servicios configuración. Las herramientas incorporadas de drivers “*middleware*” contienen las siguientes funcionalidades:

- Funciones incorporadas de interfaz entre las E/S analógicas, digitales, de movimiento y de comunicación y la FPGA.
- Funciones de transferencia para la comunicación de datos entre el procesador y la FPGA.
- Métodos de interfaz entre la FPGA y el procesador con la memoria.
- Funciones de interfaz entre el procesador y los periféricos (RS232, Ethernet).
- Drivers multi-hilo para obtener alto rendimiento.

Por todas las razones indicadas anteriormente se ha escogido el *hardware* NI *myRIO-1900* y el entorno *Labview* para el desarrollo del presente proyecto.

4.3. ALGORITMO SELECCIONADO

- DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

La publicación “*Correlation-based imaging technique for fatigue monitoring of riveted lap-joint structure*” describe una técnica de generación de imagen para controlar la propagación de grietas de fatiga en una unión de aluminio remachado, representativa

de un componente estructural aeronáutico llamada EXCITALET. Para este propósito, continua, se utiliza un *array* de transductores piezoeléctricos para generar ondas guiadas por la estructura y miden los reflejos inducidos por los daños que potencialmente se encuentren en la estructura. Según se describe, el método utiliza la correlación entre señales medidas y un banco de señales y las imágenes se obtienen utilizando la técnica *Round Robin*. Esto permite tener en cuenta la dinámica y dimensiones finitas del transductor y las características multimodales y dispersivas de la propagación de ondas guiadas y la interacción compleja con los posibles daños, siempre según los autores. Esta técnica de obtención de imágenes se aplica en la detección de grietas en estructuras después de que estas sean sometidas a ciclos de fatiga.

Los resultados de las imágenes obtenidas utilizando el modo A0 a 300 y 450 KHz se presentan para diferentes tamaños de daño. Se demuestra, en opinión de los investigadores, que se puede lograr la detección de grietas y la localización de las mismas, y que, el nivel de correlación indica la nivel de energía reflejada, y por lo tanto la gravedad de los daños.

El algoritmo muestra diferentes aspectos que lo hacen atractivo para aplicar al sistema que se pretende desarrollar para la inspección SHM: La utilización de sensores similares a los estudiados y utilizados en las investigaciones anteriores de la empresa, excitación con señales de características parejas, uso de la técnica de excitación *Round Robin* mediante *array* de transductores, generación de imágenes de fácil y rápida interpretación,...

Por todo ello se ha procedido a realizar un análisis exhaustivo del método descrito en el mismo y de la interpretación y adaptación necesarias para aplicarlo con un grado de mayor o menor modificación al problema y sistema sobre el que se trabaja actualmente.

La base del estudio es el uso de señales temporales elementales, llamadas funciones átomo, que están sujetas a operaciones tales como cambios de tiempo-frecuencia, con el fin de crear un diccionario de funciones que luego se correlacionan con la señal temporal medida.

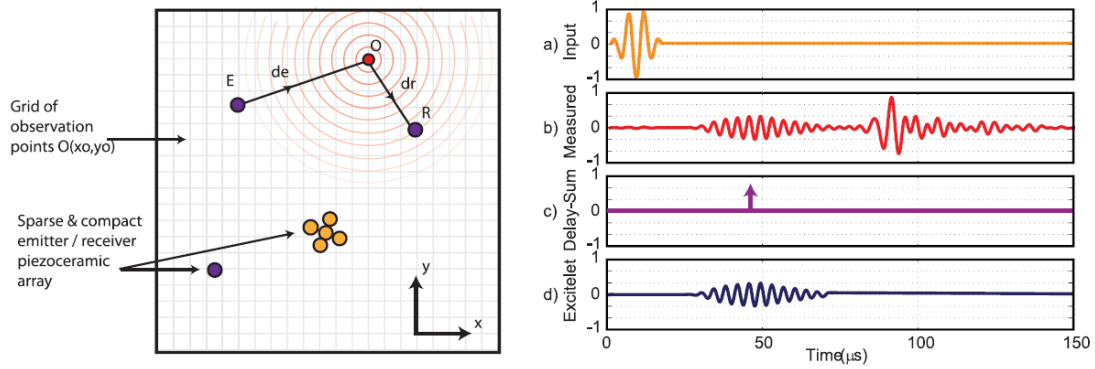


Figura 17. Representación de la geometría del problema definiendo la nomenclatura asociada al problema, donde E y R representan, respectivamente, piezoelectrico emisor y receptor, y O el punto de observación o inspección sobre la estructura. A la derecha se muestran las diferentes señales que intervienen en el algoritmo.

El método de formación de imágenes consiste en calcular para cada punto de observación $O(x_0, y_0)$ un índice de daño que representa la posible presencia de un daño. Esto se consigue al correlacionar la señal medida $S_{ER}(t)$ en el transductor receptor R cuando se excita el transductor emisor E con el $T_{ER}(O, t)$, señal teórica calculada la señal propagada y reflejada sobre un posible daño que se encontrara en el punto O. El factor de correlación $C_{ER}(O)$ entre ambas señales no se normaliza con el fin de obtener un valor proporcional a la energía reflejada inducida por el daño que permita cuantificar la severidad del mismo. De esta manera tenemos:

$$C_{ER}(O) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{ER}(t) T_{ER}(O, t) dt \quad (4.1)$$

La principal ventaja de la formulación descrita reside en su capacidad para incluir las señales teóricas complejas dependientes de la estructura y el transductor utilizado para la inspección. De hecho, estas señales debe ser evaluadas para cada punto de inspección y pueden ser pre-calculadas utilizando modelos numéricos predictivos de propagación, ya sea de elementos finitos (FE) o elemento espectral (SE), o determinado experimentalmente dichas señales mediante ensayos sobre una muestra de la estructura a inspeccionar. El índice de daño (DI) se obtiene sumando las contribuciones para el punto de inspección de cada par emisor-receptor de un método *Round Robin*:

$$D(O) = \sum_{E=1}^N \sum_{R \neq E} C_{ER}(O) \quad (4.2)$$

En el documento se proponen varias formulaciones para el cálculo del índice de daño basados en diferentes modelos de propagación analíticos que tienen en cuenta el carácter dispersivo y multimodal de la propagación de ondas de Lamb y la dinámica de los transductores.

El primer caso de generación de imagen para inspección que se propone es una variante de este enfoque, donde no se tienen en cuenta, a pesar de lo dicho anteriormente, ni el carácter dispersivo y multimodal de la propagación de ondas de Lamb ni la dinámica de los transductores. En este caso, la señal teórica asociada al punto de observación O, es una función delta de Dirac posicionada en el instante de tiempo asociado con tiempo de vuelo de la onda guiada generada para el par de transductores emisor y receptor y suponiendo que esta viajara reflejándose en el punto de inspección O:

$$T_{ER}(O, t) = \sqrt{d_e d_r} \delta \left(t - \frac{d_e}{c_g} + \frac{d_r}{c_g} + \Delta t_b \right) \quad (4.3)$$

donde $\sqrt{d_e d_r}$ representa la compensación por atenuación de la señal al propagarse a lo largo de las distancias de observación d_e y d_r definidos en la figura 17 suponiendo que el daños actúa como un reflector omnidireccional, Δt_b representa la mitad de la duración de la señal de excitación, y c_g representa la velocidad de grupo asociada con el modo y la frecuencia de trabajo. Insertando la ecuación (4.1) en (4.2). Obtenemos el índice de daño D0:

$$D_0(O) = \sum_{E=1}^N \sum_{R \neq E} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{ER}(t) T_{ER}(O, t) dt \quad (4.4)$$

$$= \sum_{E=1}^N \sum_{R \neq E} \sqrt{d_e d_r} S_{ER} \left(\frac{d_e}{c_g} + \frac{d_r}{c_g} + \Delta t_b \right) \quad (4.5)$$

Modificando levemente la ecuación (4.4) sustituyendo la señal medida por su representación analítica permite obtener imágenes con transiciones más suaves y, por tanto permite una localización más precisa de los daños. Queda entonces la siguiente ecuación denominada D1(0):

$$D_1(O) = \left| \sum_{E=1}^N \sum_{R \neq E} \int_{-\infty}^{+\infty} H(S_{ER}(t)) T_{ER}(O, t) dt \right| \quad (4.6)$$

donde $H(S_{ER}(t))$ representa la representación analítica de la señal temporal adquirida calculada utilizando la transformada de Hilbert. Clásicamente, el valor absoluto de la señal analítica se calcula antes de realizar la suma con el fin de añadir la amplitud de las señales y obtener un índice de daño positivo. Sin embargo, en la ecuación (4.6), el valor absoluto se toma después de sumar todas las señales analíticas, ya que permite el suavizado de las imágenes obtenidas evitando patrones de interferencia mientras define mejor la imagen para reflectores puntuales.

Se propone a continuación la compensación de la dispersión que sufren las señales, fenómeno descrito en el capítulo explicativo de la base teórica, al propagarse por la estructura. Para este propósito, se propone un método concreto por su sencillez y robustez, descrito en la publicación *"A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals"* incluido en la documentación. Este método hace uso de conocimiento a priori de las características de la dispersión de una onda guiada para comprimir las señales dispersas a su forma original.

$$D_2(O) = \left| \sum_{E=1}^N \sum_{R \neq E} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\overline{S_{ER}(t)}) T_{ER}(O, t) dt \right| \quad (4.7)$$

donde $\overline{S_{ER}(t)}$ representa la señal medida tras ser compensada su dispersión en frecuencia. Por otra parte, la compensación de la dispersión no puede ser pre calculada sino que debe ser realizada para cada señal de después de cada medida real, de tal manera que podría representar una carga computacional muy importante para un sistema de monitorización en tiempo real. Esta compensación de la dispersión no se analiza en profundidad ya que, como se explica en la siguiente sección, no corresponde aplicarla en nuestro caso.

También se propone en el documento analizado una variación de la señal teórica a aplicar en el algoritmo que tiene en cuenta las características mecánicas del transductor piezoeléctrico y, en este caso, no requiere más que de un cálculo inicial y no

requiere re calcular su valor para cada señal adquirida. Aun así, tampoco se usará este cálculo en nuestro proyecto ya que, como se explicará más adelante, no puede ser utilizado bajo las condiciones del sistema en el que se pretende embarcar.

- ANÁLISIS DEL ALGORITMO Y ADAPTACIÓN A LAS NECESIDADES DEL PROYECTO.

Tras lo visto en el apartado anterior, se puede resumir que, el tratamiento que se aplicará a los datos de adquisición con el fin de obtener una imagen que permita la identificación y caracterización de los daños presentes en una estructura delgada, consiste en el cálculo para una matriz de puntos determinada del siguiente índice de daño para cada uno de ellos:

$$D_2(O) = \sum_{E=1}^N \sum_{R \neq E} \sqrt{d_e d_r} H(S_{ER} \left(\frac{d_e}{c_g} + \frac{d_r}{c_g} + \Delta t_b \right)) \quad (4.7)$$

En primer lugar, aclarar que los autores de la técnica de imagen seleccionada, no hacen uso de la señal adquirida en el canal de excitación ya que, en su caso, el piezoeléctrico encargado de la excitación en cada ensayo simple no se utiliza para la adquisición de dato alguno. En nuestro caso, en principio, se utilizarán todas las señales incluyendo las medidas en el canal de excitación. En la figura 18 pueden verse la señal medida en el piezoeléctrico asociado al canal de excitación y la señal medida en otro piezoeléctrico de recepción.

Esta característica, aumenta la potencia del sistema para la detección de daños ya que no prescinde de la información contenida en las 12 señales medidas en los canales de excitación.

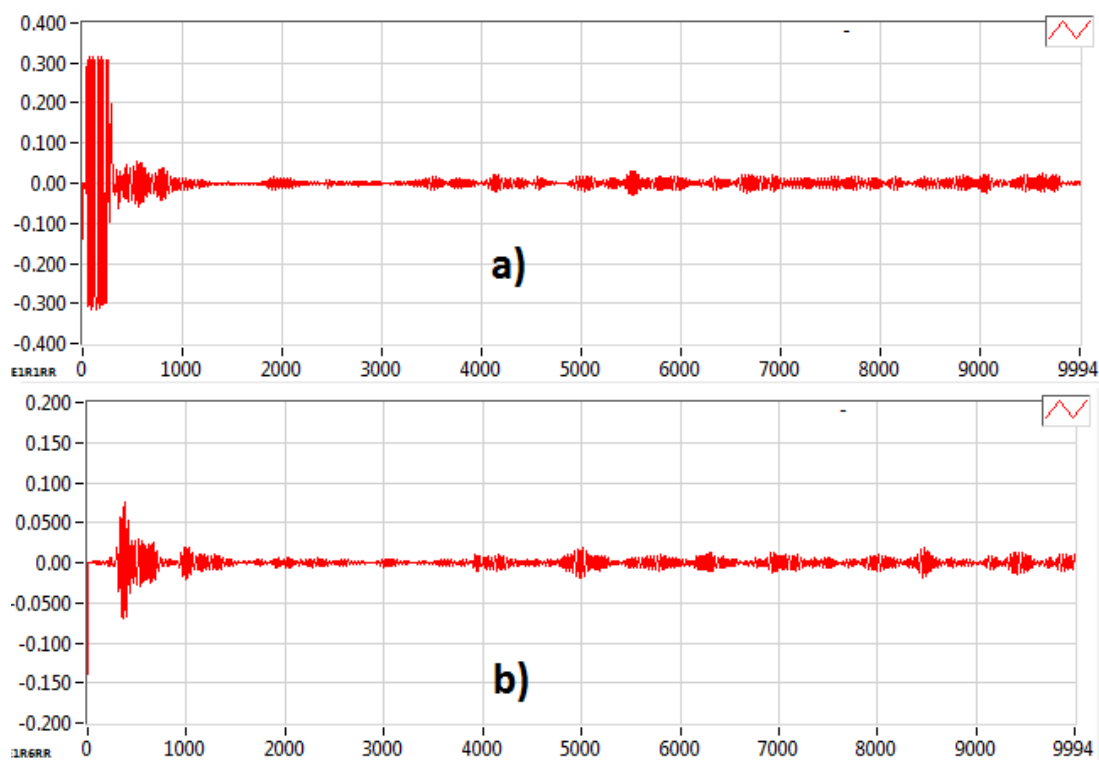


Figura 18. Comparativa entre a) señal medida en el canal de excitación. b) señal medida en un canal de recepción, dentro de un mismo ensayo.

Las señales proporcionadas por la empresa han sido adquiridas mediante un *hardware* dedicado a tal efecto conectado a un *array* de transductores unidimensional y formado por 12 elementos piezoeléctricos. De esta forma el caso estudiado corresponde a un panel de aluminio de 1 mm de espesor y sobre el cual se ha instalado un dispositivo consistente en una tarjeta PCB sobre la que se monta un conector que permite controlar los 12 piezoeléctricos. En la figura 19, se muestra una imagen del panel de prueba utilizado.

En la figura 20 se muestra una imagen en detalle del *array* de piezoeléctricos utilizado. El transductor asociado al canal 1 será el punto escogido como origen de coordenadas para los cálculos posteriores.



Figura 19. Panel "3" de aluminio Al T3 2024, típicamente aeronáutico, de medidas 1mm x 480mm x 580mm, con un *array* de transductores piezoeléctricos adherido, sobre el que se han realizado diferentes ensayos de los que se dispone varios archivos de datos de adquisición.

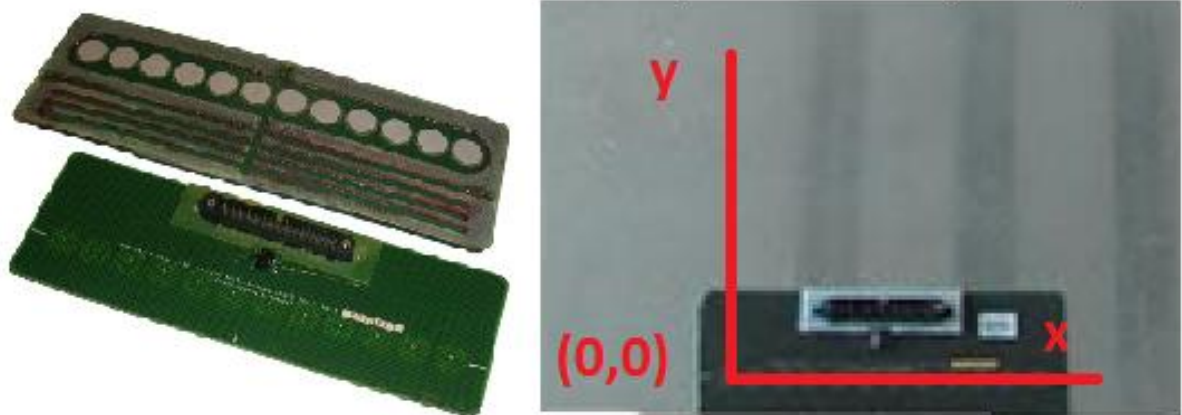


Figura 20. *Array* de piezoeléctricos integrados sobre una PCB y situación del origen de coordenadas para los cálculos posteriores sobre el piezoeléctrico asociado al canal 1.

La distancia entre los puntos centrales de transductores consecutivos es de 9 mm. Teniendo en cuenta esta distancia y el origen de coordenadas se calcularán las distancias d_e y d_r generando una matriz de valores de distancias correspondientes a cada uno de los posibles 144 caminos que recorre la señal para un ensayo Round Robín.

A su vez el cálculo de la corrección de la distancia Δt_b debida a la longitud de la señal de excitación es trivial como se muestra a continuación:

$$\Delta t_b = \frac{1}{2} * n^{\circ} \text{ ciclos} * \frac{1}{f_{exc}} \quad (4.8)$$

No es necesario calcular el espacio recorrido por la señal para este tiempo en este punto del problema ya que este valor se introduce en las ecuaciones temporales y conlleva la corrección de la distancia en el resultado final.

Resulta de vital importancia el cálculo preciso de la velocidad de propagación de grupo c_g de la señal para obtener resultados fiables. Para el caso de estructuras metálicas de materiales o aleaciones comúnmente estudiados y utilizados en la industria actual, como es nuestro caso, se dispone de herramientas para el cálculo teórico de precisión demostrada. Para la obtención de la velocidad teórica, se ha utilizado el *software Vallen Dispersión*, que desarrolla las ecuaciones explicadas en el capítulo sobre teoría de ondas de Lamb, generando las curvas de dispersión de la velocidad para diferentes materiales a partir de sus características intrínsecas.

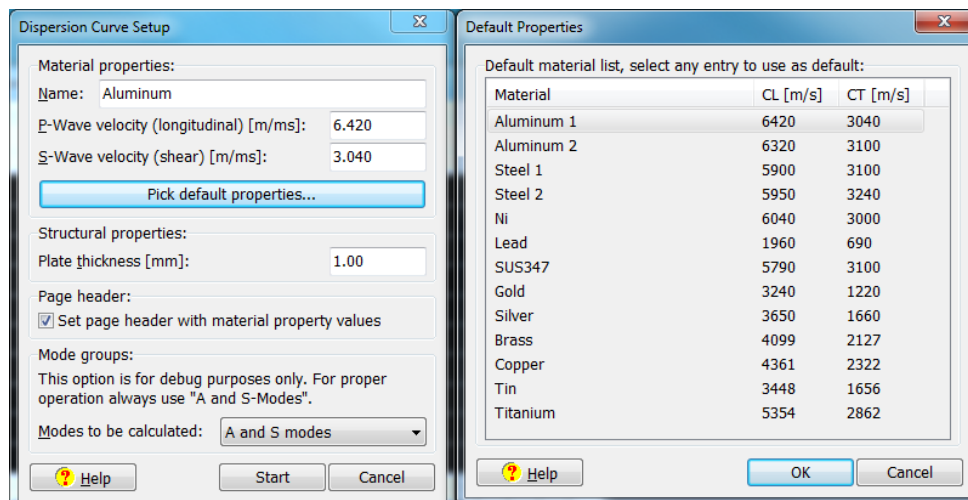


Figura 21. Pantallas de configuración del programa *Vallen Dispersión* para el cálculo teórico de las velocidades de propagación para material aluminio Al T3 2024 de 1 mm de espesor

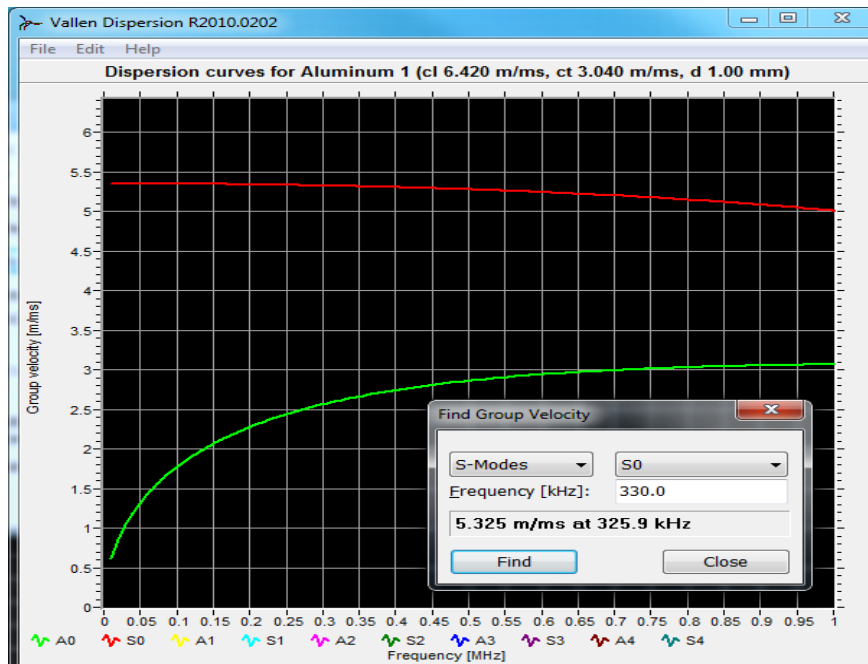


Figura 22. Resultado del programa de cálculo teórico de las velocidades de propagación para material aluminio Al T3 2024 de 1 mm de espesor. Se representan los modos simétrico S0 y anti simétrico A0, únicos presentes en las frecuencias de trabajo utilizadas.

En las figuras 21 y 22 se muestran capturas del programa donde se puede ver como, tras seleccionar las características del panel, se generan las comentadas curvas que permiten la obtención de la velocidad buscada. En el presente proyecto, la frecuencia de trabajo será de 330 KHz al ser esta una de las frecuencias de resonancia del piezoeléctrico, que además permite trabajar en una franja de frecuencias en las que el modo simétrico tiene una amplitud predominante sobre el modo anti simétrico, como se puede comprobar en la figura 23.

Esto permite obtener señales lo menos complejas posibles, ya que el trabajo sobre señales con varios modos de propagación presentes resulta de especial dificultad a la hora de extraer la información útil que contienen, ya que, como se ha visto anteriormente, dichos modos poseen velocidades de propagación diferentes y el trabajo de separar la respuesta de los diferentes modos a partir de una señal temporal invalidaría el uso de estos cálculos para una aplicación real ya que es un proceso incierto en cuanto a su resolución.

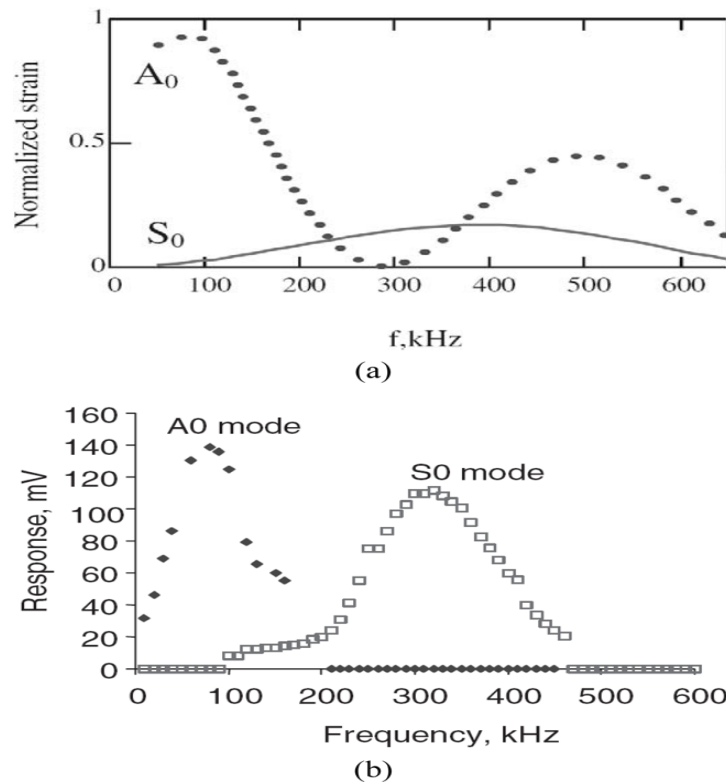


Figura 23. Resultados obtenidos por Dr. Giurgiutiu para un panel de 1mm de espesor de aluminio. Arriba el modelo teórico y abajo los resultados experimentales.

Es por esto que, al trabajar en la zona óptima para las características de nuestros piezoeléctricos, supondremos en todo momento que trabajamos con el modo simétrico, quedando el modo anti simétrico como un ruido más asociado a la propagación. Más adelante se demostrará que esta hipótesis es acertada.

Por otra parte, la utilización de señales en las que encontramos diferentes modos de propagación, hace que las funciones de compensación de dispersión y la corrección por características mecánicas del piezoeléctrico no sean aplicables, ya que estas están desarrolladas para señales en las que está presente un único modo.

La compensación de la dispersión de la velocidad de propagación, se basa en la transformación de la señal temporal al dominio de la frecuencia, donde se utiliza precisamente su curva de dispersión de velocidad para comprimir la señal a su perfil o forma inicial.

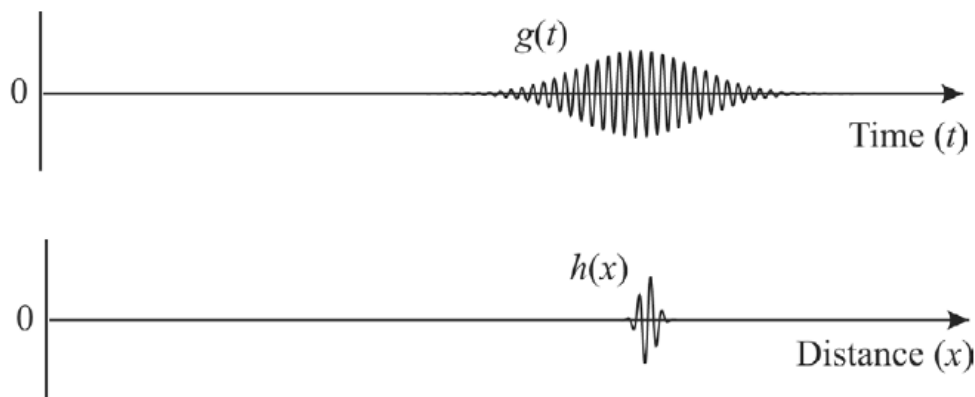


Figura 24. El resultado teórico de compensar una señal temporal distorsionada por la dispersión de la velocidad en frecuencia obteniendo una señal compensada en el dominio del espacio, a través del proceso descrito en la documentación

En la figura 24 se observa el resultado teórico de compensar una señal temporal obteniendo una señal compensada en el dominio del espacio, a través del proceso descrito en la documentación. Al poseer las señales utilizadas en este estudio diferentes modos con diferentes curvas de dispersión cada uno, es imposible aplicar las correcciones por este método. En el caso de las características mecánicas del transductor, los parámetros necesarios para el cálculo también dependen del modo que se desee analizar, por lo que se descarta también su uso en el presente trabajo.

En este punto, puede surgir la duda sobre la conveniencia de utilizar nuestro sistema, ya que se generan estas señales con varios modos presentes aparentemente más complejas y con tratamientos posteriores más restringidos. La respuesta es que, en el momento actual, no existen métodos prácticos de generar modos simétricos o anti simétricos aislados. Se pueden conseguir este tipo de señales mediante la excitación simultánea de 2 transductores en las dos caras de un mismo punto de la estructura. Estas condiciones, sencillas en laboratorio, hacen inviable su aplicación en la industria real aeroespacial, ya que requiere de acceso a ambas caras de las estructuras, hecho difícil de conseguir y que implica un gasto inasumible en tiempo y coste.

Después de este inciso, una vez explicado la idoneidad de tratar las señales desde el punto de vista del modo de propagación S_0 , se detallan una serie de aspectos a tener en cuenta a la hora de aplicar el método descrito a las características de las señales de adquisición que se van a procesar.

En el código a desarrollado se ha incluido el cálculo y resta de la media de la señal sobre ella misma. Esto es debido a que ciertos piezoeléctricos utilizados y su unión a la estructura mediante resinas epoxi genera una componente casi continua que

puede llegar a invalidar los resultados. En anteriores estudios se ha resuelto que esta operación previa al filtrado en el rango de la señal de excitación proporciona mejores resultados. En el caso bajo estudio las señales no presentan una gran distorsión en este sentido, pero se ha mantenido por seguridad a la hora de ejecutar el programa con distintos archivos de datos de adquisición en un futuro.

Las señales que se analizan poseen diferentes componentes de ruido de alta frecuencia, así como, de componentes que se generan en la estructura a frecuencias diferentes de la frecuencia de excitación, debidas al conjunto piezoeléctrico-adhesivo-estructura, al comportamiento capacitivo del transductor asociado al canal de excitación, que como se observa en la figura 25, posee una componente de baja frecuencia asociada a dicho comportamiento o cualquier otra fuente que pueda afectar físicamente al piezoeléctrico generando una variación de la señal eléctrica medida.

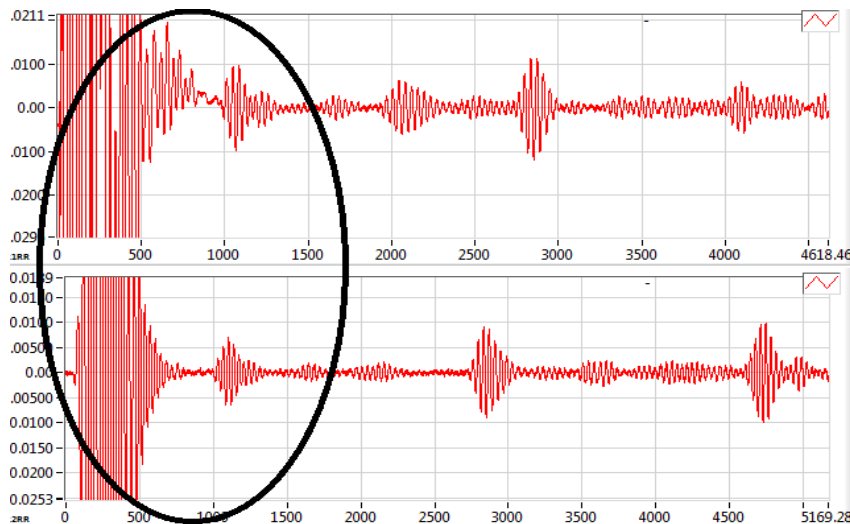


Figura 25. Comportamiento capacitivo del piezoeléctrico de excitación al acumular y descargar parte de la energía recibida. Piezo de excitación (arriba) y señal en un piezo receptor (abajo) voltios/muestras

Se ha configurado un filtrado con un ancho de banda no demasiado restrictivo que no altere la información útil de la señal y consiga limpiar la señal del ruido no deseado. En este caso, se ha utilizado un filtro paso banda Butterworth de segundo orden con frecuencias de corte inferior y superior 200KHz y 400KHz respectivamente. En la figura 26, se muestra una comparativa entre la señal de adquisición y la señal tras el acondicionamiento realizado, mostrando el detalle de una sección de las mismas para mejor observación de las mejoras inducidas.

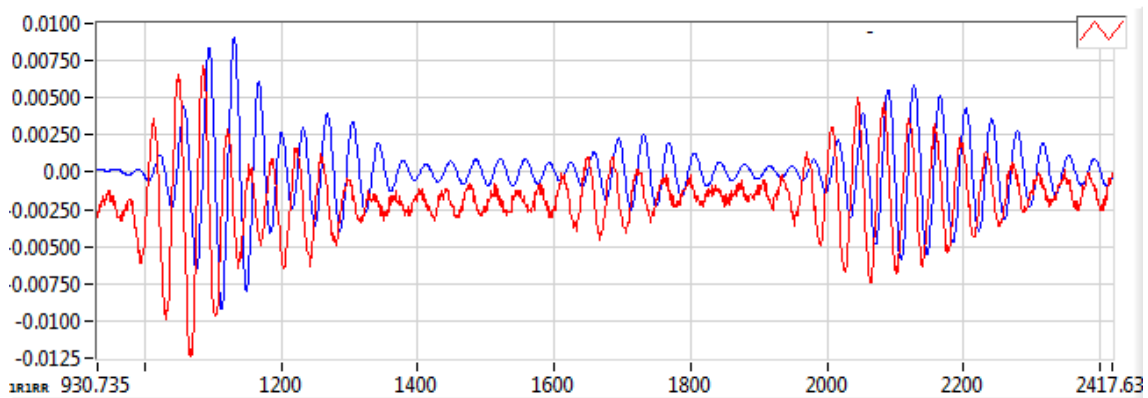


Figura 26. Comparativa entre la señal de adquisición (roja) y la señal tras el acondicionamiento realizado (azul), mostrando el detalle de una sección de las mismas para mejor observación de las mejoras inducidas. Voltios/muestras

Para este estudio, se han tenido en cuenta las reflexiones de la señal que se propaga a lo largo de la estructura. A su vez, no se analizan las reflexiones múltiples como por ejemplo de la señal que se propaga rebotando sobre varios de los extremos del panel, por lo cual nuestro rango de interés sobre la señal se limita a las primeras N muestras siendo N el número de muestras equivalente al tiempo que tarda la señal en propagarse hasta la posible fuente de reflexión más alejada del *array* y volver. En nuestro caso $N=5000$ muestras será suficiente para poder analizar el panel completo ya que:

$$\text{Distancia máxima analizable} = \frac{1}{2} * V_{\text{prop}} * N * T_s = 1 \text{ m} \quad (4.9)$$

Por último se va a explicar el efecto de la señal de excitación presente en cada una de las señales asociadas al canal de excitación y su propagación a través de cada uno de los piezoeléctricos receptores. Como se acaba de explicar, el método de detección de daños descrito se basa en el análisis de las reflexiones a lo largo de la estructura. En cambio, en principio la señal generada en el piezoeléctrico de excitación propaga su perturbación de forma directa a todos y cada uno de los piezoeléctricos restantes (ver simulación de la figura 27) estando como es lógico presentes dichas perturbaciones en las señales de adquisición como puede observarse en la figura 28.

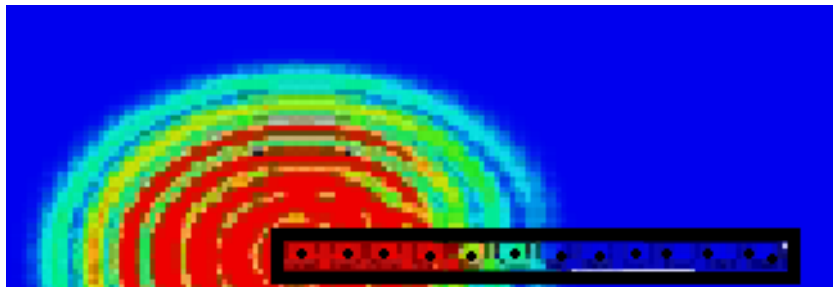


Figura 27. Detalle de la simulación de la propagación de la perturbación generada mediante la excitación de un piezoeléctrico.

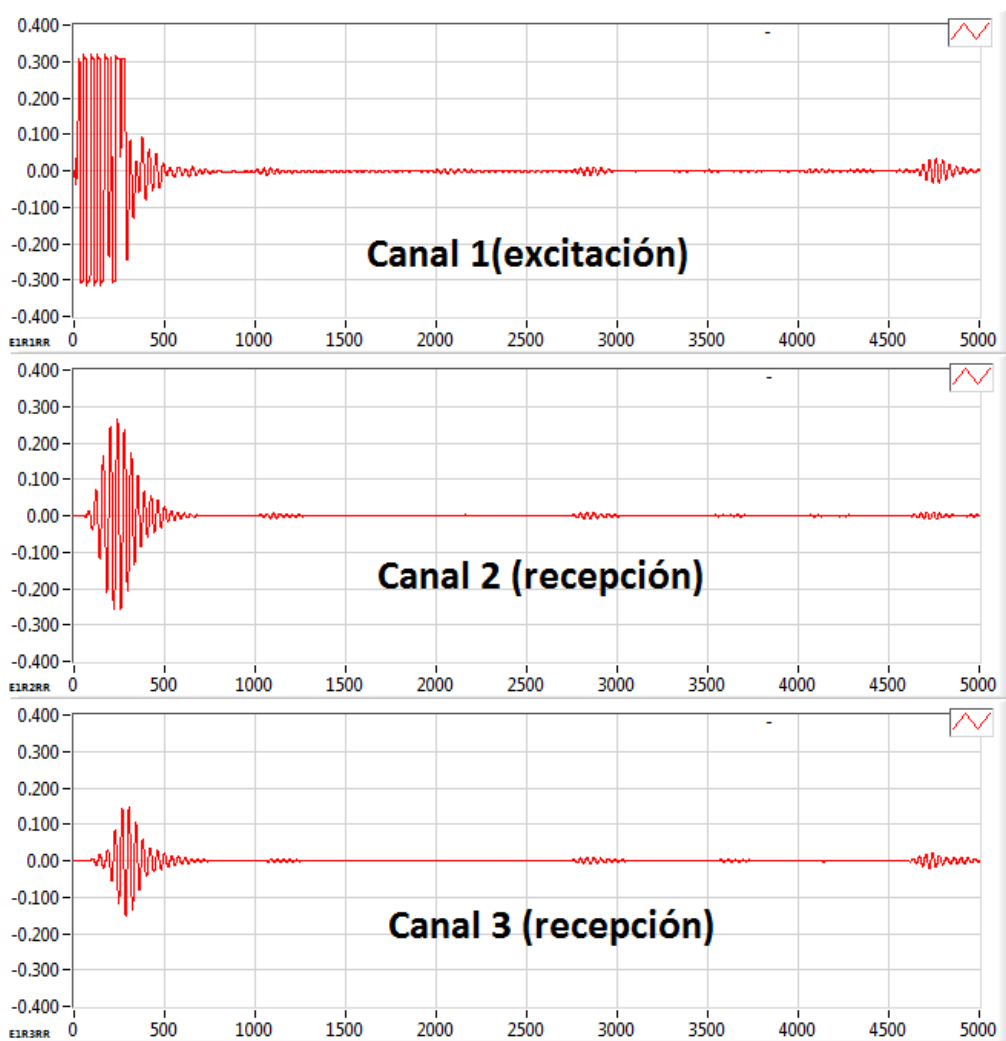


Figura 28. Secuencia de señales obtenidas en la lectura de los canales 1,2 y 3 para un ensayo en el que la excitación se aplica sobre el canal 1 y donde se puede observar la señal directa que parte del canal 1 y se va propagando apareciendo en el primer termino de todas las señales.

Este fenómeno debe tener un efecto sobre las señales generadas enmascarando posibles reflexiones cercanas al *array* de transductores que derive en una zona ciega cuyo tamaño dependerá de las características de la señal de excitación y de la distancia máxima entre piezos, principalmente. En nuestro caso esta distancia será de unos 10 cm ya que la distancia máxima entre piezos para un *array* de 12 elementos con distancia de 0.9 cm entre estos es 9.9 cm. En el capítulo reservado al análisis de los resultados se comprobará esta hipótesis.

5. Desarrollo del algoritmo de detección.

Tras el análisis pormenorizado del algoritmo seleccionado se ha procedido el desarrollo de una aplicación *software* optimizada del proceso, como punto de partida para la integración del algoritmo en la tarjeta de desarrollo seleccionada. A partir de este primer desarrollo obtenido se fijarán las necesidades y requisitos para el diseño de la solución final a integrar en el sistema, adaptando la aplicación al lenguaje de programación y capacidades de la lógica programable integrada en el *hardware*.

5.1. CÓDIGO DE PRUEBA PARA EJECUCIÓN EN PC.

Se procede en esta sección a describir el código desarrollado para la prueba y ejecución del algoritmo de detección de daño seleccionado. En primer lugar como se propuso de inicio se ha realizado un proyecto en la plataforma *Labview* desarrollado y ejecutado en un PC, con el objetivo de probar el correcto funcionamiento del algoritmo, adaptado al trabajo con las señales de adquisición y configuración proporcionadas por la empresa. Posteriormente, se procederá a migrar el código final a la plataforma *myRIO*.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de la aplicación, se ha procedido a optimizar el código con el objetivo de obtener el mejor desarrollo posible en cuanto a velocidad de ejecución, requisitos de memoria y por último pero no menos importante la claridad del mismo que permita una fácil revisión y depuración de errores y la introducción de mejoras o ampliaciones futuras.

La programación del algoritmo se ha organizado mediante la creación del proyecto de *Labview*, *Damage_indexing*. En la figura 29 se muestra el proyecto desarrollado y los diferentes archivos que lo conforman.

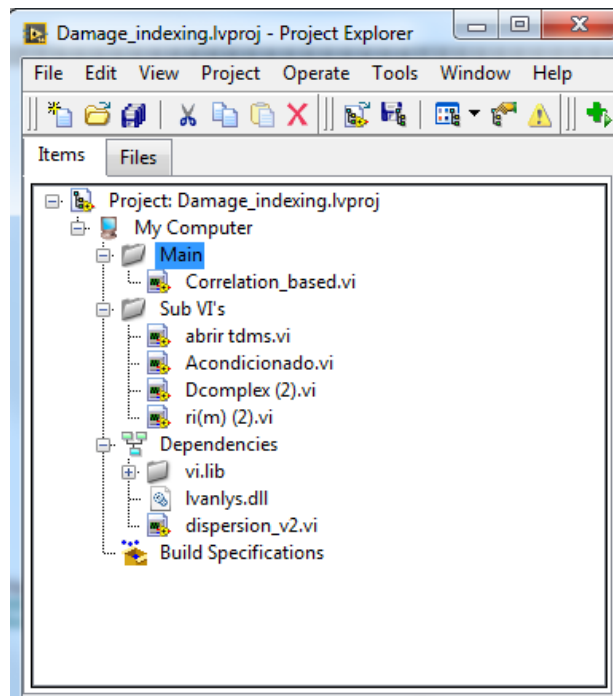


Figura 29. Proyecto de *Labview* *Damage_indexing* creado para la prueba y ejecución del algoritmo de detección de daño seleccionado.

El programa (VI) principal es “*Correlation_based.vi*” y proporciona la interfaz de usuario que permite configurar la ejecución del algoritmo así como la visualización de los resultados. Es el encargado de llamar a las diferentes funciones que forman los pasos de ejecución del algoritmo. En la figura 30, puede verse el panel frontal del mismo con las diferentes secciones diferenciadas por funcionalidades. Los controles numerados por bloques como 1 y 2 permiten la configuración de la aplicación y la introducción de datos necesaria para la correcta ejecución del algoritmo.

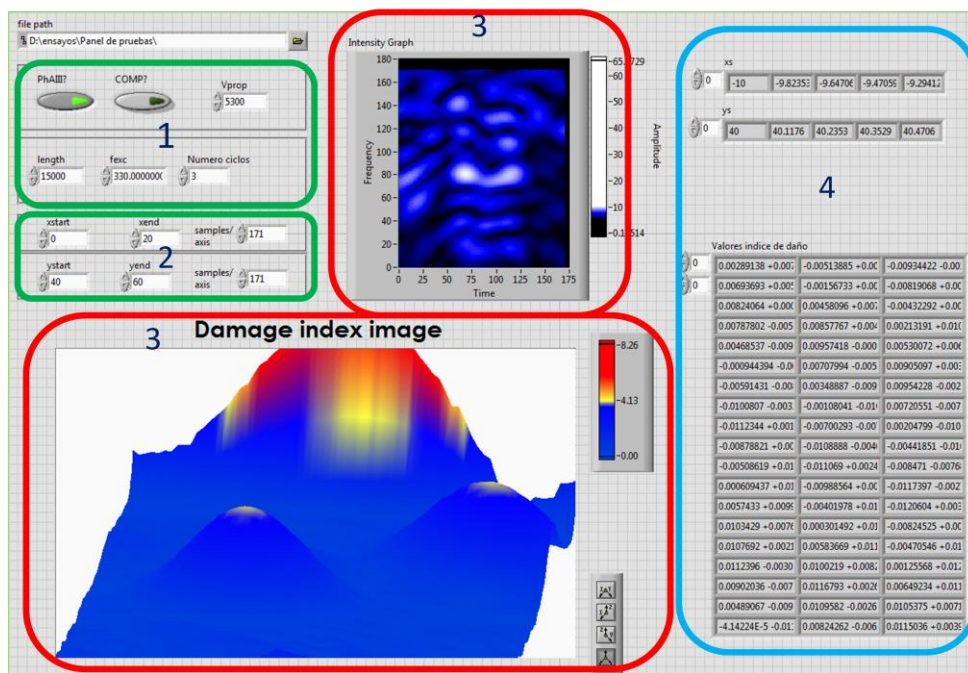


Figura 30. Panel frontal del programa desarrollado con las diferentes secciones diferenciadas por funcionalidades. Los controles numerados por bloques como 1 y 2 permiten la configuración de la aplicación y la introducción de datos necesaria para la correcta ejecución del algoritmo. Los bloques 3 y 4 corresponden con la visualización de resultados y presentación de datos de interés

El bloque 1 encuadra los controles que habilitan la selección del tipo de *array* de transductores utilizado, el material sobre el que se realiza la inspección y la velocidad de propagación que se debe utilizar para el cálculo. Se deben proporcionar también los valores de la frecuencia y número de ciclos de la señal de excitación para realizar la corrección de la distancia recorrida por la perturbación. Además, permite fijar el número de muestras de cada señal de adquisición a utilizar en el proceso de manera que se puede optimizar la duración del mismo y la utilización de recursos del sistema. Las

señales utilizadas están formadas por 25.000 muestras de las cuales, para este algoritmo, en ningún caso son necesarias más de las primeras 10.000. En la figura 31, se observa una captura del resultado del análisis temporal y de uso de memoria para los casos en que se han utilizado 25.000 muestras (1) y 10.000 muestras (2). Se puede concluir que el tiempo de ejecución es prácticamente proporcional al número de muestras utilizadas.

	VI Time	Sub VIs Time	Total Time	Avg Bytes
1 Correlation_based.vi	46.8	1092.0	1138.8	86765.22k
2 Correlation_based.vi	15.6	468.0	483.6	52465.57k

Figura 31. Captura del resultado del análisis temporal y de uso de memoria para los casos en que se han utilizado 25.000 muestras (1) y 10.000 muestras (2).

El bloque 2 contiene las variables que definen la matriz de puntos sobre los que se realizará el análisis por parte del algoritmo. Se deben indicar los valores inicial y final de las coordenadas x e y así como el número de puntos intermedios, o lo que es lo mismo, la definición que queremos tenga nuestra imagen resultante. El origen de coordenadas está situado en el punto sobre el que se sitúa el piezoeléctrico asociado al canal 1 del transductor instalado, siempre teniendo en cuenta que se está utilizando un *array* unidimensional de 12 piezoeléctricos posicionado sobre el eje X de referencia.

Las graficas, que en la figura 30 corresponden a los bloques numerados con el 3, muestran la imagen resultante en dos formatos diferentes, 2D y 3D. Se analizará en el momento de la migración a la tarjeta de desarrollo la conveniencia de la utilización de una u otra en función de los recursos consumidos y de la utilidad en cuanto a interpretación de resultados que proporcionan.

En el diagrama de bloques correspondiente al programa principal del sistema, mostrado en la figura 32., se pueden identificar los cuatro pasos principales del desarrollo del algoritmo:

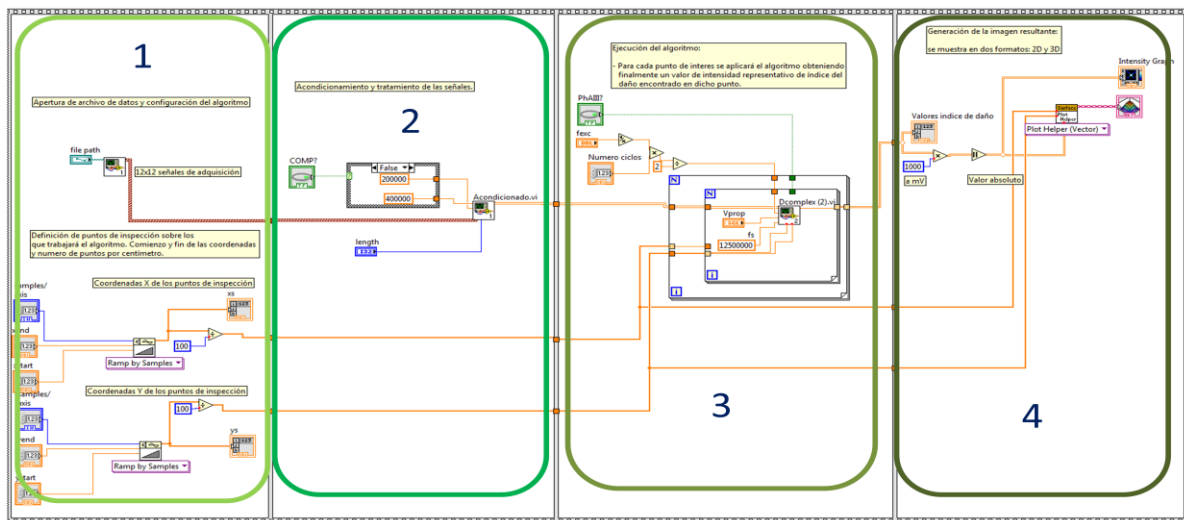


Figura 32. Diagrama de bloques correspondiente al programa principal del sistema donde, se pueden identificar los cuatro pasos principales del desarrollo del algoritmo. 1 Apertura archivo de datos y configuración del algoritmo. 2. Acondicionado y tratamiento datos. 3. Ejecución del algoritmo. 4. Representación de resultados.

1. Apertura los archivos de datos y configuración del algoritmo.

Los datos de adquisición proporcionados por la empresa AERNNOVA se presentan en formato TDMS (Technical Data Management Solution) de NI. La principal característica para entender el formato interno de la estructura de archivos TDMS es su organización jerárquica. El formato de archivo TDMS se estructura con tres niveles de jerarquía: archivo, grupo y canal. El nivel de archivo puede contener un número ilimitado de grupos y cada grupo puede contener un número ilimitado de canales. Debido a esta agrupación de canales, se puede elegir la forma de organizar los datos que más convenga a nuestros intereses. Por ejemplo, se podría tener un grupo para sus datos en bruto y otro grupo para los datos analizados dentro de un único archivo.

En este caso, los datos están agrupados por cada uno de los ensayos simples que forman el ensayo Round Robín. Cada grupo corresponde a la emisión de la excitación por un único canal, donde los canales corresponden a la lectura de cada uno de los 12 canales del *array* de piezoeléctricos. Por lo tanto, nuestro archivo está formado por 12 grupos con 12 canales cada uno, lo que resulta en un total de 144 señales de adquisición.

Por otra parte, se generan las coordenadas X e Y de los puntos sobre los que se realizará la inspección por parte del algoritmo a partir de los controles definidos en la descripción de la interfaz de usuario.

2. Acondicionado y tratamiento datos.

En esta segunda fase dan comienzo las acciones para el desarrollo del algoritmo propiamente dicho. La figura 33, muestra el diagrama de bloques del módulo Acondicionamiento.vi. Inicialmente, se configura el pre-filtro para eliminar ruidos de las señales sin aplicar un ancho de banda demasiado restrictivo ya que, debido a la dispersión de las ondas, se podría eliminar información útil se aplicara. Se elimina la posible componente continua mediante la substracción de la media y se aplica el recorte de muestras antes mencionado. Se puede observar en el código que las señales pertenecientes al canal de excitación no son tenidas en cuenta, por el motivo que se explicó en el capítulo anterior.

Una vez aplicadas todas estas acciones, se calcula las señales analíticas correspondientes a las señales temporales de adquisición. A la salida de este módulo disponemos de las representaciones analíticas de las señales definidas usando la transformada de Hilbert de las mismas. En correspondencia con la notación del algoritmo:

Transformada de Hilbert de la señal temporal:

$$\widehat{S_{ER}}(t)$$

Señal analítica:

$$H(S_{ER}(t)) = S_{ER}(t) + j\widehat{S_{ER}}(t) \quad (5.1)$$

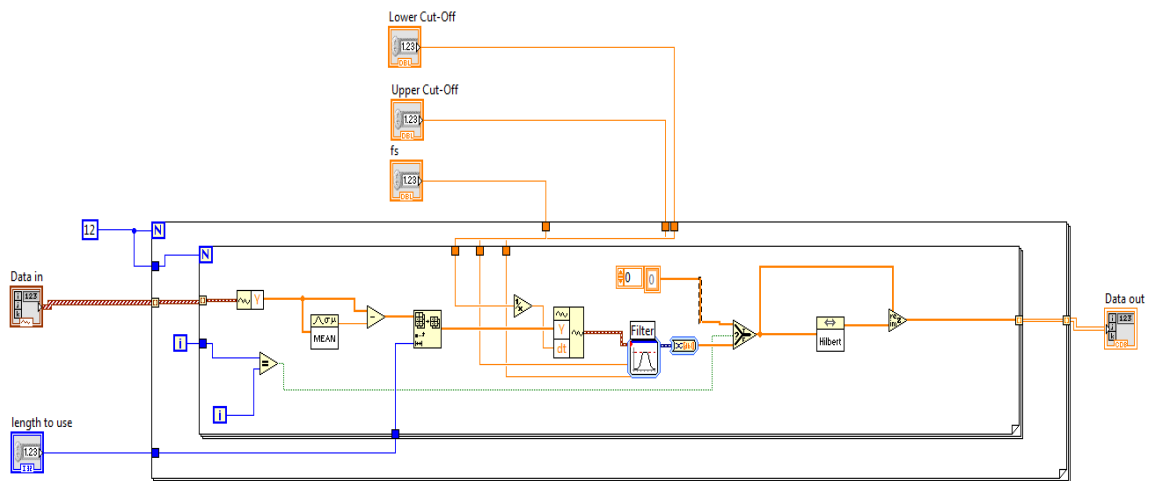


Figura 33. Diagrama de bloques del módulo Acondicionamiento.vi.

3. Ejecución del algoritmo.

En la fase 3 se ejecuta el algoritmo a partir de las representaciones analíticas de las señales de adquisición. Para cada par de coordenadas de los puntos de inspección generados, se calcula el índice de daño complejo asociado dicho punto, obteniendo una matriz de valores de dicho índice que se corresponde a la matriz de puntos de inspección. En la figura 34 se muestra el diagrama de bloques del módulo Dcomplex.vi que se encarga del cálculo del índice de daño complejo asociado a las coordenadas que recibe como entrada.

En correspondencia con la notación del algoritmo, en este bloque se calcula la señal teórica que incluye la corrección por atenuación y la corrección debida al tamaño del tren de ondas que forma la perturbación.

$$T_{ER}(O, t) = \sqrt{d_e d_r} \delta \left(t - \frac{d_e}{c_g} + \frac{d_r}{c_g} + \Delta t_b \right) \quad (5.2)$$

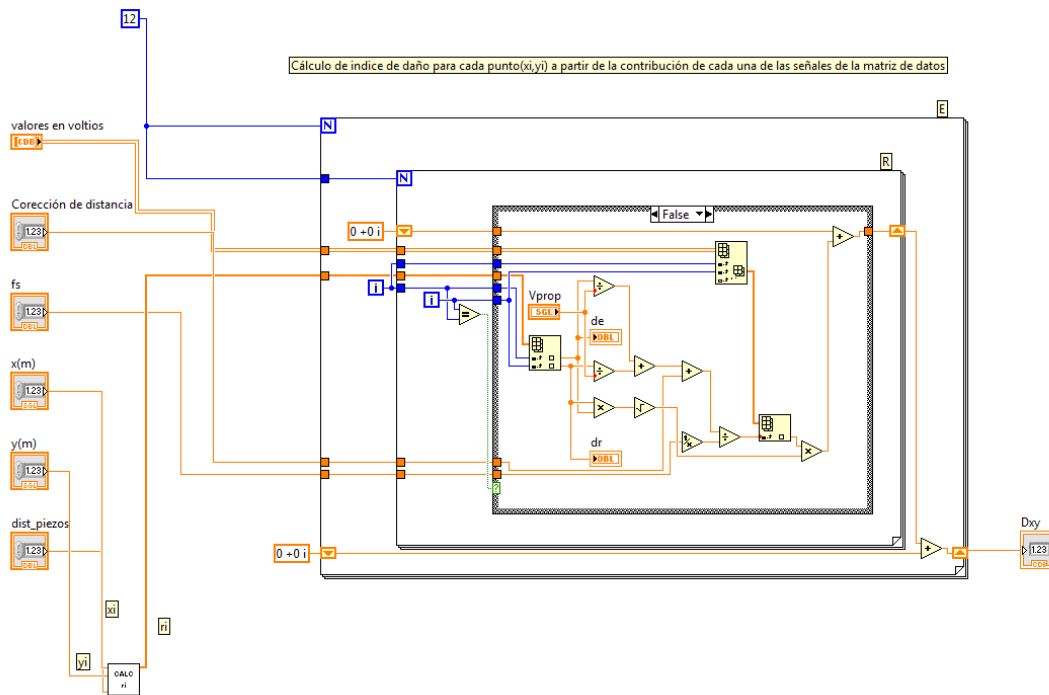


Figura 34. El diagrama de bloques del módulo Dcomplex.vi que se encarga del cálculo del índice de daño complejo asociado a las coordenadas que recibe como entrada.

Y a continuación el índice complejo calculado para el punto bajo inspección:

$$\sum_{E=1}^N \sum_{R \neq E} \int_{-\infty}^{+\infty} H(S_{ER}(t)) T_{ER}(O, t) dt \quad (5.3)$$

Como resultado de este bloque se obtiene la matriz de valores del índice de daño complejo que se corresponde con la matriz definida de puntos de inspección.

4. Representación de resultados.

En el último paso se procede a representar los resultados en forma de imagen, de manera que se pueda interpretar de manera fácil y rápida. Tras calcular el módulo y escalar los valores obtenidos para una mejor visualización, se generan dos imágenes diferentes.

La primera, se trata de una imagen en dos dimensiones, que requiere una menor carga computacional y de memoria que la otra representación pero resulta más simple y no permite la interacción con la imagen.

La segunda se genera mediante el objeto *3D Graph:Surface* que proporciona el *software* de *Labview* y que permite generar la imagen como una superficie continua, lo cual, como se verá más adelante en el análisis de resultados, repercute muy positivamente en la interpretación y presentación de los resultados de la inspección

- RESULTADOS DEL CÓDIGO DE PRUEBA.

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras la ejecución del código de prueba desarrollado y ejecutado en PC y que demuestran el buen funcionamiento de la solución adoptada. Se pretende, en este apartado, validar la solución adoptada sin entrar en un análisis más profundo, que corresponde al siguiente capítulo, de manera que quede justificada la migración del algoritmo a la tarjeta de desarrollo.

Los datos de adquisición de los que se disponen pertenecen al panel de aluminio Al 2024 T3, de uso típicamente aeronáutico de dimensiones 580mm x 480mm x 1mm con un *array* de piezoeléctricos instalado de la forma que se muestra en la figura 35. Al panel de ensayo se le han practicado dos taladros de 5mm de diámetro con la intención de simular dos daños producidos por impacto.

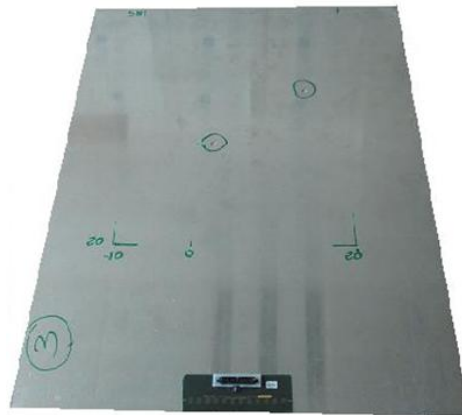


Figura 35. Panel de aluminio Al 2024 T3, de uso típicamente aeronáutico de dimensiones 580mm x 480mm x 1mm con un *array* de piezoeléctricos instalado, sobre el que se han realizado los ensayos cuyos datos de adquisición se han usado para la comprobación del algoritmo.

El piezoeléctrico asociado al canal 1 está posicionado en el punto (200,5). Dado que este es el origen de coordenadas al que se referencian todos los cálculos la posición de los taladros se dan respecto a este y son (10,320) y (150,430).

La aplicación se ha configurado para realizar una inspección del panel completo con tres puntos de inspección por centímetro para cada una de las dimensiones del mismo.

El archivo de datos utilizado corresponde con un ensayo Round Robín con señal de excitación de 5 ciclos, frecuencia de 330KHz y enventanado *Hanning*. La frecuencia de muestreo está fijada en 12,5 MHz y se ha establecido el umbral de detección de daño en un 1% de la amplitud máxima presente en los valores de índice de daño calculados y que corresponderán al índice calculado para el borde frontal del panel.

En la figura 36 se pueden comparar el panel real objeto de la inspección y la imagen generada por la aplicación.

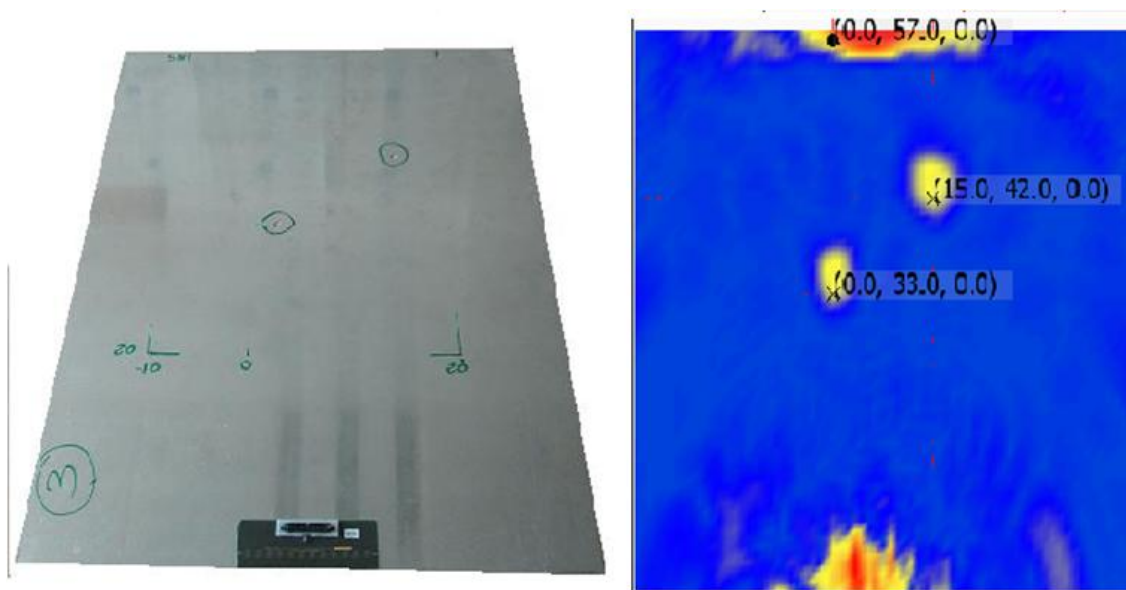


Figura 36. Comparativa entre el panel real objeto de la inspección en el que se han señalado los daños simulados mediante taladros y la imagen generada por la aplicación

El resultado es satisfactorio y permite, por un lado, validar el correcto funcionamiento del algoritmo y, por otro, confirmar que el valor teórico estimado para la velocidad de propagación del modo S0 se encuentra dentro de un rango de variación aceptable a partir de los resultados de posicionamiento obtenidos. Aunque, en el capítulo siguiente, se realizará un análisis pormenorizado de todos los resultados, cabe

resaltar que la imagen generada muestra los dos taladros, el borde frontal del panel y la zona ciega alrededor del *array* de transductores predicha en el capítulo anterior.

5.2. Código final de la aplicación para trabajar sobre el dispositivo *myRIO*.

A continuación se describe el código desarrollado para la aplicación final objeto de este proyecto. En el siguiente diagrama de bloques se puede ver la organización del mismo en el sistema y qué bloques se ejecutarán en qué módulos del propio sistema.

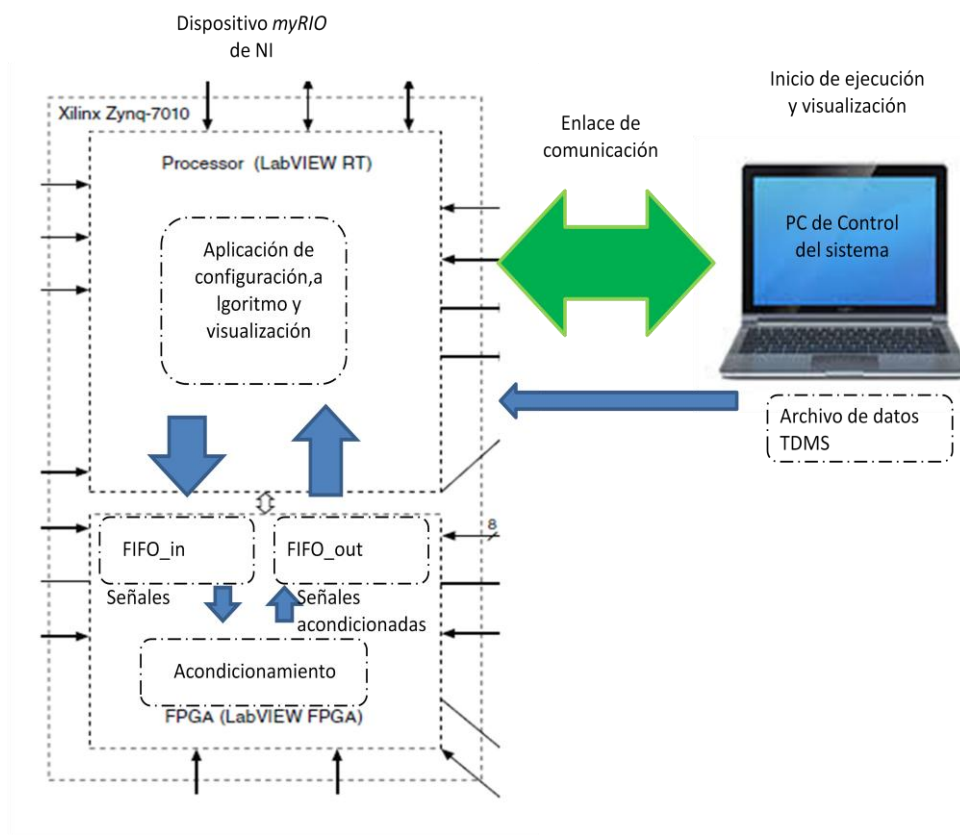


Figura 37. Diagrama de bloques del proyecto.

La interfaz de usuario se encuentra instalada y se ejecuta en el PC de control, el mismo en el que se ha desarrollado todo el trabajo. Se encarga de indicar al dispositivo *myRIO* los datos de configuración de la aplicación y el momento de inicio de la ejecución de la misma. A su vez, permite al usuario seleccionar el archivo de datos de adquisición sobre el que realizar la inspección en busca de daños. A través de la

conexión, que puede ser por conexión inalámbrica WI-FI, Ethernet o USB, se envían los datos y la configuración y comienza la ejecución del código en la tarjeta.

El módulo instalado en el procesador de la tarjeta se encarga de comunicarse con la FPGA donde se modelado la parte del código que se desea ejecutar como lógica programable y devuelve los datos resultantes al procesador que se encarga de generar el resultado, una matriz de valores de intensidad. Esta matriz es recibida en el PC de control que lo visualiza como una imagen, finalizando la ejecución.

En la figura 38, se presenta el proyecto de *Labview* que integra todos los módulos de la aplicación, donde se observan los VI que se ejecutarán en las distintas localizaciones *hardware* posibles, PC, Procesador interno y FPGA.

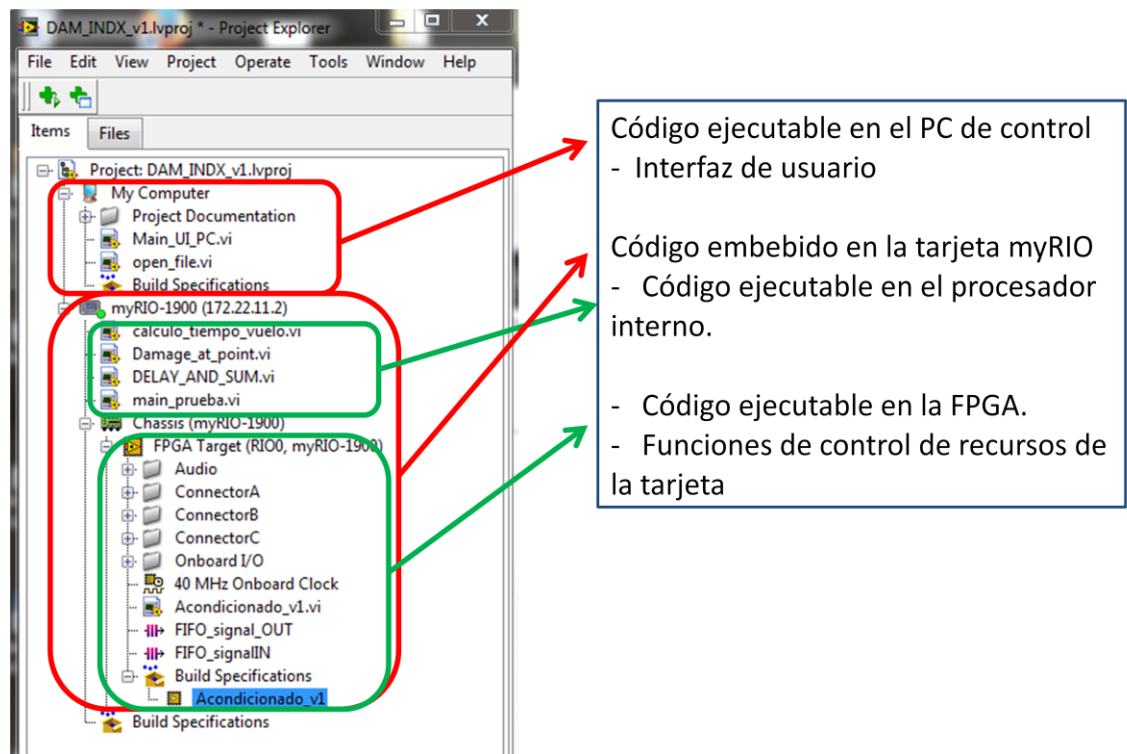


Figura 38. Proyecto de *Labview* que integra todos los módulos de la aplicación, donde se observan los VI que se ejecutarán en las distintas localizaciones *hardware* posibles, PC, Procesador interno y FPGA

Se diferencian fácilmente las diferentes partes del proyecto en función de la entidad que los ejecuta:

MyComputer, donde se encuentran la interfaz de usuario y el código de apertura de datos.

myRIO-1900, con su IP asociada. Los Vi que aparecen a continuación se encuentran en el procesador interno de la tarjeta. Separada se encuentra la FPGA con todos sus periféricos asociados así como el código y archivo tipo BIT generado para ser descargado en la misma. *Labview* permite el uso de todos los periféricos asociados a las entradas y salidas de la FPGA sin necesidad de diseñar controladores para los mismos ni estrategias de gestión lo que facilita y agiliza el desarrollo. Se han creado a su vez dos memorias FIFO que se utilizaran para intercambiar y almacenar las señales de entrada y salida del módulo FPGA con el procesador interno. También aparece el reloj del sistema que será usado como *master clock* en la aplicación.

Se describen a continuación las distintas partes diferenciadas del código sin entrar de nuevo en detalles de las funcionalidades y soluciones descritas en el apartado anterior.

1. Interfaz de usuario:

Al ser el objetivo de este trabajo, por un lado, comprobar la validez de un método de detección para el proyecto PAMELA, y por otro, estudiar la capacidad de la tarjeta *myRIO* para el desarrollo de sistemas SHM, se ha optado por la sencillez en las funcionalidades de la aplicación y su interfaz de usuario. En la figura 39, puede verse el panel frontal de control y su diagrama de bloques asociado.

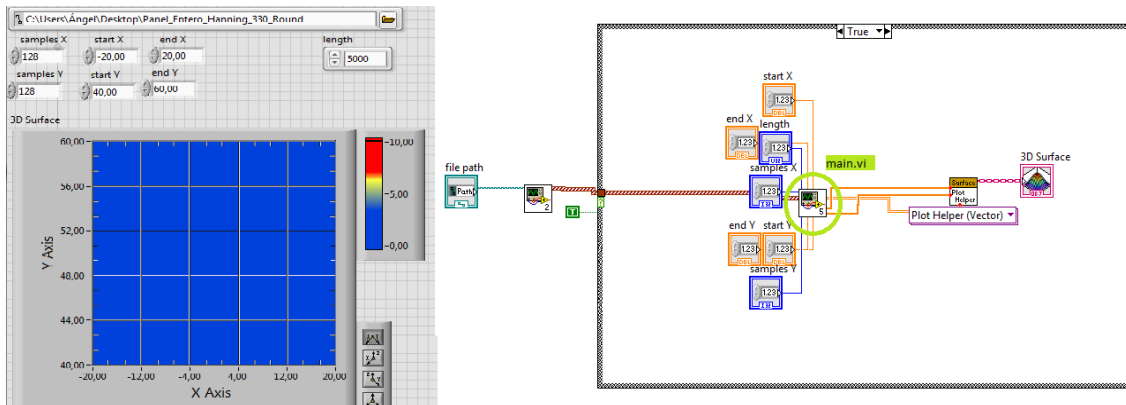


Figura 39. Panel frontal y diagrama de bloques de la interfaz del usuario.

Se han eliminado los controles e indicadores que formaban parte de la versión de prueba y tenían funcionalidades innecesarias para la aplicación final. Además, se ha decidido optar por la representación en gráfico 3D ya que proporciona una imagen que puede manipularse para ver sus diferentes perfiles bidimensionales además de la imagen 3D que permite una percepción de los daños detectados con más matices.

En el diagrama de bloques puede verse como los controladores e indicadores se conectan directamente al módulo main.vi. Este módulo es el principal dentro del *software* embebible que se ejecuta en el dispositivo. *Labview* se encarga de realizar la conexión y la comunicación, no siendo necesario, aunque si posible, modificar ni configurar ningún aspecto de las mismas para el correcto funcionamiento de la aplicación.

2. código embebible.

Como ya se ha comentado anteriormente, dentro del código embebible que constituye el *software* ejecutable en la tarjeta se diferencian el *software* que se ejecuta en el procesador interno de la misma y el código sintetizable que se implementará en la FPGA y del que hará uso el anterior a través de las conexiones intrínsecas que proporciona *Labview* y que permiten al desarrollador enlazar funcionalidades que trabajan en uno y otra.

El módulo main.vi es el principal de esta parte del código. Recibe la información desde el PC para configurar y ejecutar el algoritmo. En la figura 40 se muestra el diagrama de bloques del mismo.

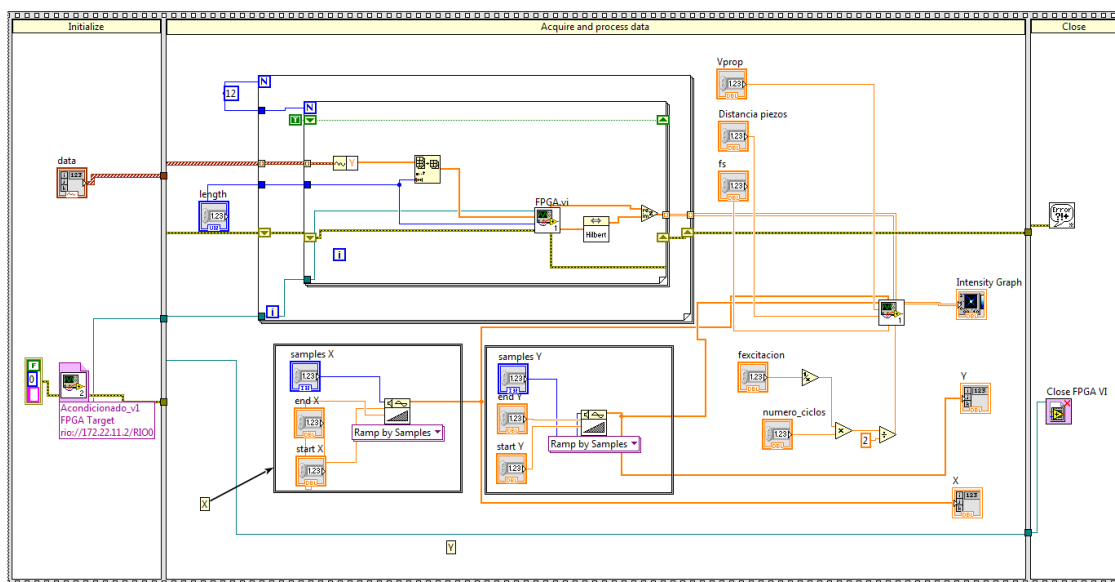


Figura 40. Diagrama de bloques del módulo principal de la aplicación, main.vi

El código que se muestra es equivalente al realizado en el código de prueba, estando la principal diferencia en el código desarrollado para la FPGA. El módulo acondicionado.vi se ejecutará en la FPGA, y para conectarlo con el programa principal

se utilizan las funciones que proporciona el entorno y que hacen muy sencilla la gestión de la ejecución y el intercambio de datos. Se hace uso de las dos memorias FIFO implementadas en la FPGA para enviar y recibir los datos y de un elemento de control de ejecución para indicar a la FPGA que inicie la ejecución.

La FPGA se encargará de calcular y restar la media, aplicar el filtro establecido y calcular la transformada de Hilbert para obtener la señal analítica de la señal temporal. EL diseño se ha desarrollado con el *software Labview* FPGA que incluye funciones propias de la misma así como módulos equivalentes a primitivas que permiten incluir funciones prediseñadas a nuestro diseño. Es el caso de los bloques de cálculo de media de una señal o diferentes tipos de filtros. El filtro paso banda utilizado se debe implementar como un filtro paso alto seguido de un filtro paso bajo de manera que se puedan utilizar funciones proporcionadas por *Labview*. En el caso del bloque para el cálculo de la transformada de Hilbert de la señal, no existe una función propia que proporcione *Labview* FPGA por lo que se ha procedido a implementar una propia.

En primer lugar se ha diseñado sobre código *Labview* corriente para comprobar el correcto funcionamiento de la misma comparando su resultado con el que proporciona el bloque *Fast Hilbert Transform* de *Labview*. Para ello se ha hecho uso de la definición del mismo en el que se describe el cálculo de la siguiente manera.

La transformada de Hilbert de una función se define como:

$$H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (5.4)$$

Usando la identidad de Fourier, se puede identificar la transformada de Fourier de la transformada de Hilbert de la señal $x(t)$ como:

$$H(f) = -j \operatorname{sgn}(f) X(f), \quad (5.5)$$

donde $X(f)$ es la transformada de Fourier de $x(t)$.

A partir de esta afirmación se puede calcular la transformada de Hilbert rápida discreta (FHT) a través de los siguientes pasos:

1. Obtenemos la FFT de la señal de entrada discreta $X(n) : Y=F(X)$
2. Fijamos las componentes continua y de Nyquist a 0. Es decir:

$Y_0=0; Y_{nyq}=0;$

3. Multiplicamos los armónicos positivos por $-j$:

4 Multiplicamos los armónicos negativos por j . de manera que obtenemos:

$$H_k = -j \operatorname{sgn}(k) Y_k \quad (5.6)$$

5. Calculamos la FFT inversa, obteniendo la transformada de Hilbert de la señal.

Del paso 2 se deduce que la transformada trabajará mejor con las señales que previamente han sido filtradas eliminando las componentes continua y de Nyquist. En la figura 41 se muestra el código diseñado para esta función y una comparativa entre la señal resultante de utilizar el módulo proporcionado por *Labview* y el módulo que se ha diseñado a tal efecto, mostrando resultados prácticamente idénticos, en la figura 42.

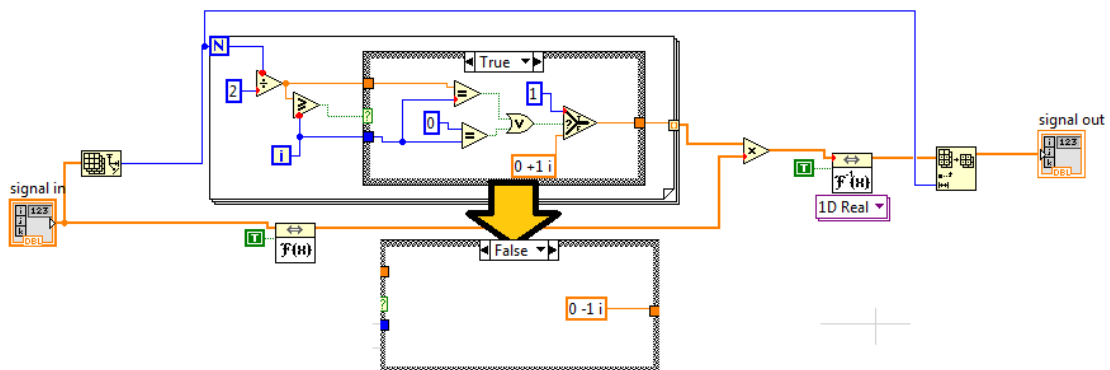


Figura 41. Código diseñado para el cálculo de la transformada rápida de Hilbert.

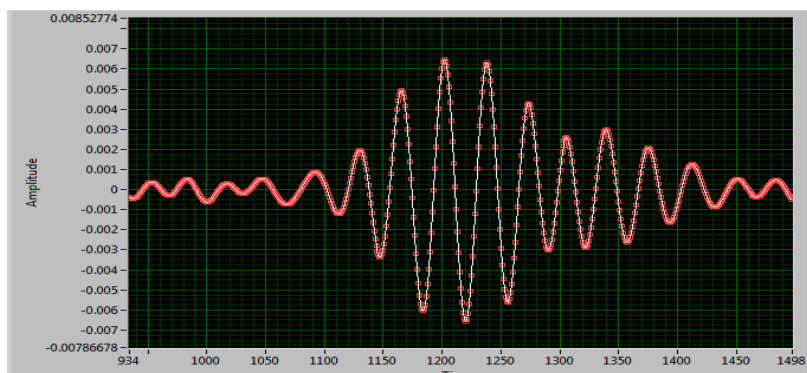


Figura 42 Comparativa entre la señal resultante de utilizar el módulo proporcionado por *Labview* para el cálculo de la transformada rápida de Hilbert y el módulo que se ha diseñado a tal efecto por el autor.

A priori, el modelo que se desea implementar en la FPGA, parece que dará un resultado demasiado extenso al sintetizarlo y que rondará los límites de capacidad de la FPGA. Al compilarlo, se obtiene el resultado mostrado en la figura 43, que confirma este supuesto y que no permite integrar el diseño.

The screenshot shows the 'Status' window of an FPGA synthesis tool. It displays a 'Compilation error' message. Below this, there are two sections for 'Reports'. The first section, 'Estimated device utilization (synthesis)', contains a table with the following data:

Device Utilization	Used	Total	Percent
Slice Registers	13199	35200	37,5
Slice LUTs	20093	17600	114,2
Block RAMs	58	60	96,7

The second section, 'Final device utilization (map)', contains another table with the following data:

Device Utilization	Used	Total	Percent
DSP48s	46	80	57,5
Block RAMs	66	60	110,0

Figura 43 Captura de pantalla del resultado del sintetizado del bloque acondicionamiento.vi

Por ello se ha decidido trasladar la transformada de Hilbert al procesador dejando las funciones de acondicionado propiamente dicho para ejecutarse en la FPGA, quedando el código final reducido al mostrado en la figura 44.

Se demuestra aquí la utilidad de este tipo de entornos de diseño, ya que no es necesario ocuparse de la gestión y el control de flujo de datos ya que configurando los diferentes bloques de los que se dispone, *Labview* se encarga de realizar estas funciones. En la figura 45 se muestran las pantallas de configuración de los filtros diseñados a modo de ejemplo.

Se han incluido en el diseño varios indicadores a través de los LEDs de que dispone el dispositivo con una doble función. Primero, la de mostrar que la ejecución se está realizando correctamente y, segundo, mostrar la sencillez del uso de los periféricos de los que se dispone.

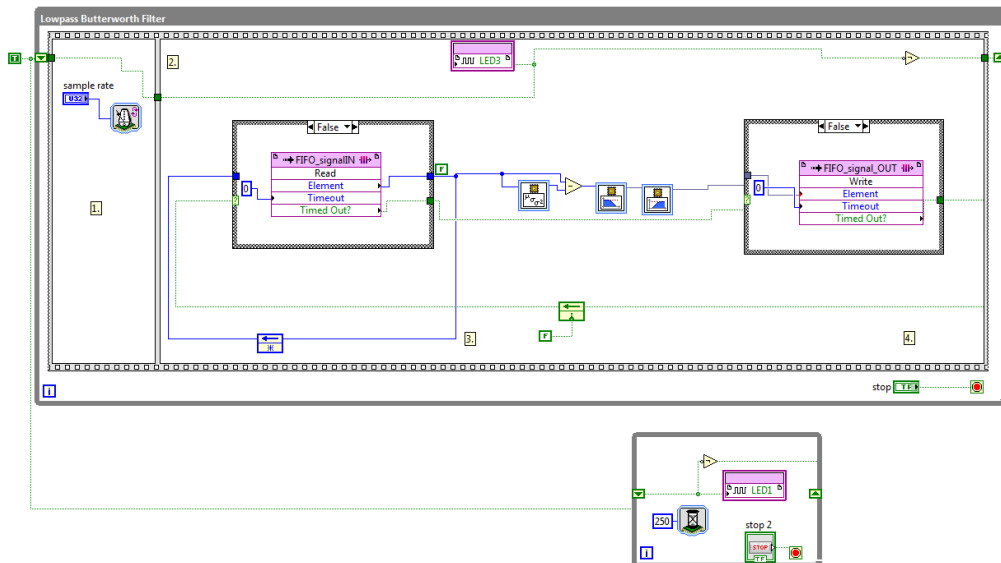


Figura 44. Diagrama de bloques del módulo acondicionamiento.vi en código sintetizable para la FPGA.

Tras compilar el código FPGA, lo cual se realiza a través del compilador interno del entorno, se obtienen los siguiente resultados de ocupación y temporización representados en la figura 46.

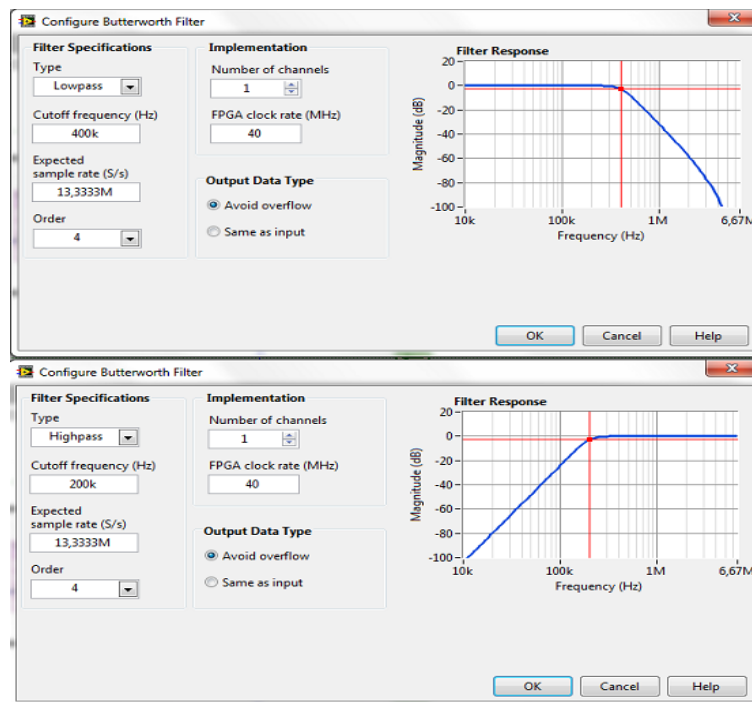


Figura 45. Captura de las pantallas de configuración de los filtros diseñados para la FPGA.

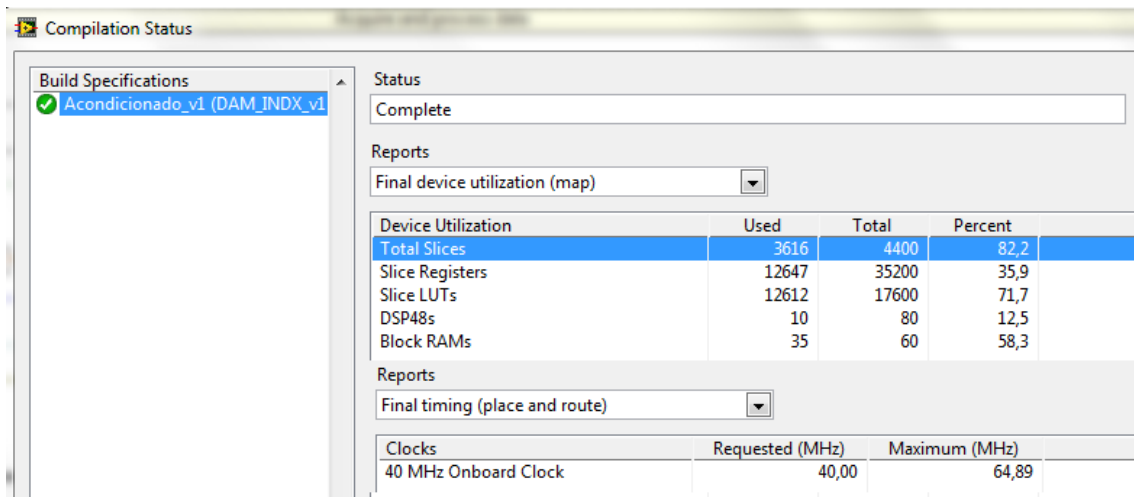


Figura 46 Resultados de la temporización y ocupación de la FPGA.

En el capítulo siguiente se muestran los resultados obtenidos tras la ejecución de la aplicación desarrollada en el dispositivo así como un análisis en profundidad de los mismos.

6. Análisis de resultados, conclusiones y trabajos futuros

6.1. Resultados.

Las imágenes generadas por el *software* de prueba, de las que se vio una muestra en el capítulo anterior, cumplen con creces el objetivo de este proyecto de obtener imágenes que permitan detectar daños en las estructuras inspeccionadas. La primera imagen generada a partir de ensayos en el panel "3" (ver figura 47), muestra una representación precisa del estado de la estructura. Se puede constatar la precisión del posicionamiento de los daños así como del borde frontal del panel.

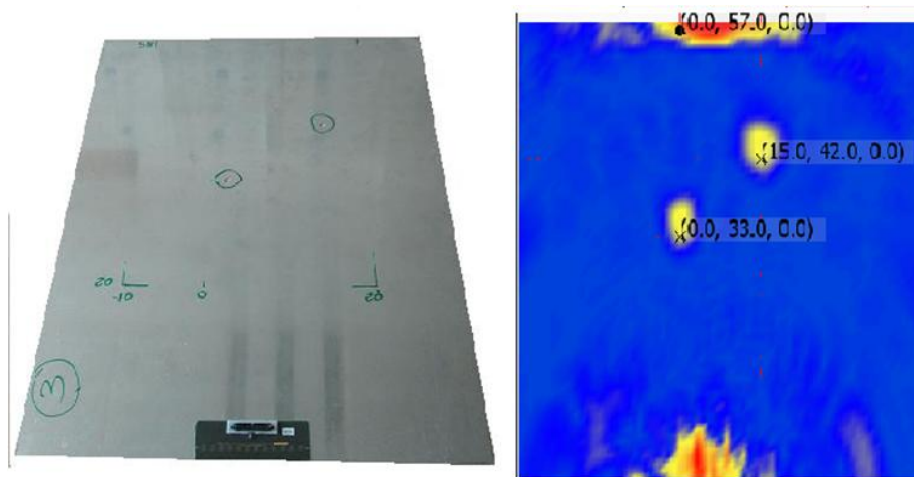


Figura 47. Comparativa entre el panel real objeto de la inspección en el que se han señalado los daños simulados mediante taladros y la imagen generada por la aplicación

Se ha ejecutado la aplicación para los diferentes archivos de datos de adquisición disponibles y en los que se varía el número de ciclos de la señal de excitación. Se ha configurado la aplicación para generar una imagen centrada en los daños y en la que aparezca el borde frontal del panel. El resultado obtenido en dichas ejecuciones se muestra en la figura 48.

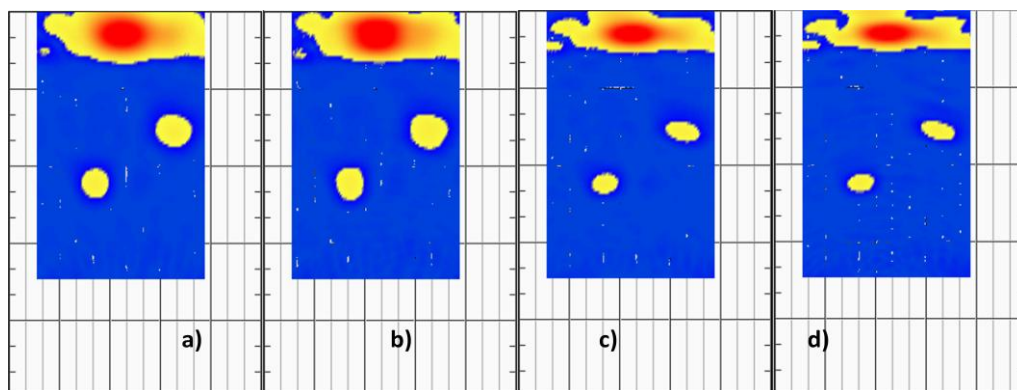


Figura 48. La aplicación para los diferentes archivos de datos de adquisición disponibles y en los que se varía el número de ciclos de la señal de excitación a) 11 ciclos b) 7 ciclos c) 5 ciclos y d) 3 ciclos. Se ha configurado la aplicación para generar una imagen centrada en los daños y en la que aparezca el borde frontal del panel.

Como se puede observar, el aumento del número de ciclos de la señal de excitación, conlleva una distorsión de los perfiles de las reflexiones. La representación de los taladros no es proporcional a su tamaño real, lo que podría provocar con daños más cercanos entre sí la pérdida de precisión. Además el borde frontal muestra un perfil

más recto y acorde con la realidad con un número menor de ciclos, con lo que se ha elegido la señal de 5 ciclos como la más adecuada para utilizar con el *software* desarrollado.

Si observamos la imagen en 3 dimensiones, que se muestra en la figura 49, se puede deducir la utilidad de este tipo de representación a la hora de interpretar imágenes a partir de estructuras con geometrías más complejas o cuando se quiera caracterizar los daños con detalle, ya que permite un análisis más preciso de la amplitud y perfil de los mismos. Además da la posibilidad al usuario de girar la imagen para cambiar a un Angulo de observación desde el que resulte más óptimo analizar la imagen, por ejemplo.

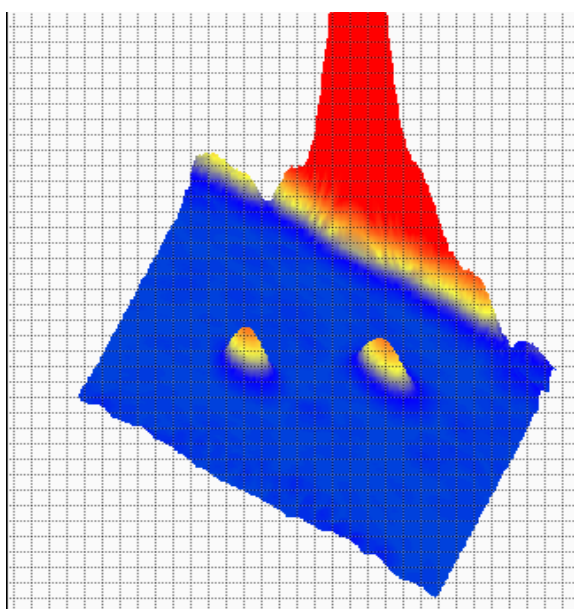


Figura 49. Imagen en 3 dimensiones resultante de ejecutar el algoritmo.

También se han realizado una serie de ejecuciones en las que se prescindía del acondicionamiento de la señal proporcionado por la eliminación de la media y el posterior filtrado. En la figura 50 puede verse una comparativa entre los resultados obtenidos tras la ejecución con y sin acondicionamiento. Se justifica claramente el uso de esta pre procesado, ya que, como se puede observar, en la imagen generada sin el mismo los daños apenas son visibles y ha sido necesario bajar el nivel de detección de la señal hasta casi el mínimo posible. Esto puede dificultar la generalización del método para diferentes tipos y tamaño de estructura y la identificación de daños en señales más

ruidosas. En la imagen generada aplicando pre procesamiento la identificación de los daños es total y puede obtenerse información sobre la intensidad del daño

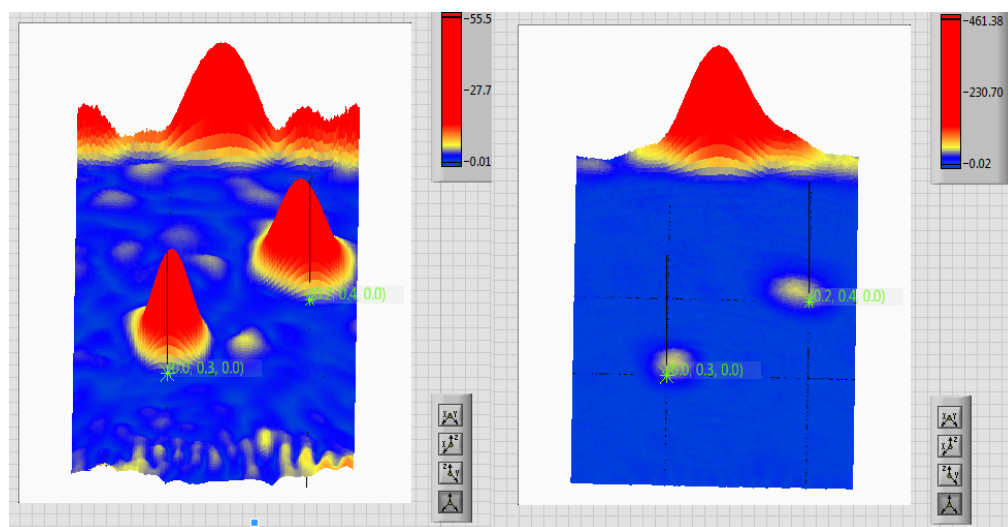


Figura 50. Comparativa entre el proceso normal (izquierda) y la ejecución sin acondicionamiento (derecha).

Se muestran a continuación los resultados obtenidos por la aplicación final desarrollada sobre el dispositivo *myRIO*. Como era de esperar el resultado es prácticamente idéntico. En la figura 51 se muestra la imagen generada.

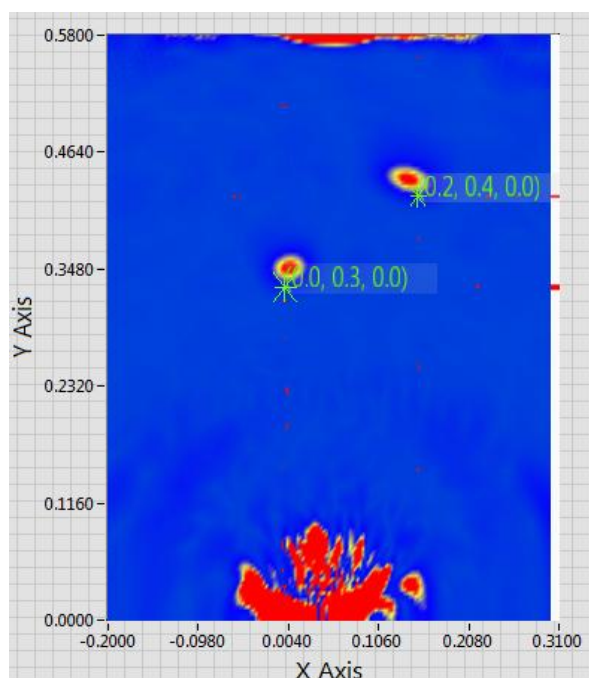


Figura 51. Imagen resultante obtenida por la aplicación final desarrollada sobre el dispositivo *myRIO*.

En la imagen se identifican claramente los taladros y el panel frontal concordando las posiciones sobre la imagen con las posiciones reales respecto al *array* de transductores. También se observa la zona ciega alrededor del *array*. El perfil del taladro más cercano es más cercano al real de forma circular perfecta que el del más alejado. La razón para esta diferencia reside probablemente en que el patrón de emisión para este tipo de *array* unidimensional muestra un lóbulo principal normal al mismo. Esto implica que cuanto más nos alejemos de la normal peor definición obtendremos de nuestra imagen. Este hecho justifica además el que la imagen del borde frontal muestre un nivel de intensidad mucho mayor en las zonas enfrentadas al *array* y vaya disminuyendo según nos alejamos horizontalmente.

Con la intención de demostrar el correcto funcionamiento de la aplicación de una forma más fiable, se ha solicitado un nuevo archivo de datos asociado a un ensayo realizado sobre un panel de iguales características pero que presente un mayor número de daños, los cuales se hayan practicado realizando impactos y no taladros. Se ha obtenido un nuevo archivo generado a partir de un ensayo sobre el panel "4" que se muestra en la figura 52, con las mismas características que los utilizados anteriormente, y para una señal de excitación de 5 ciclos.

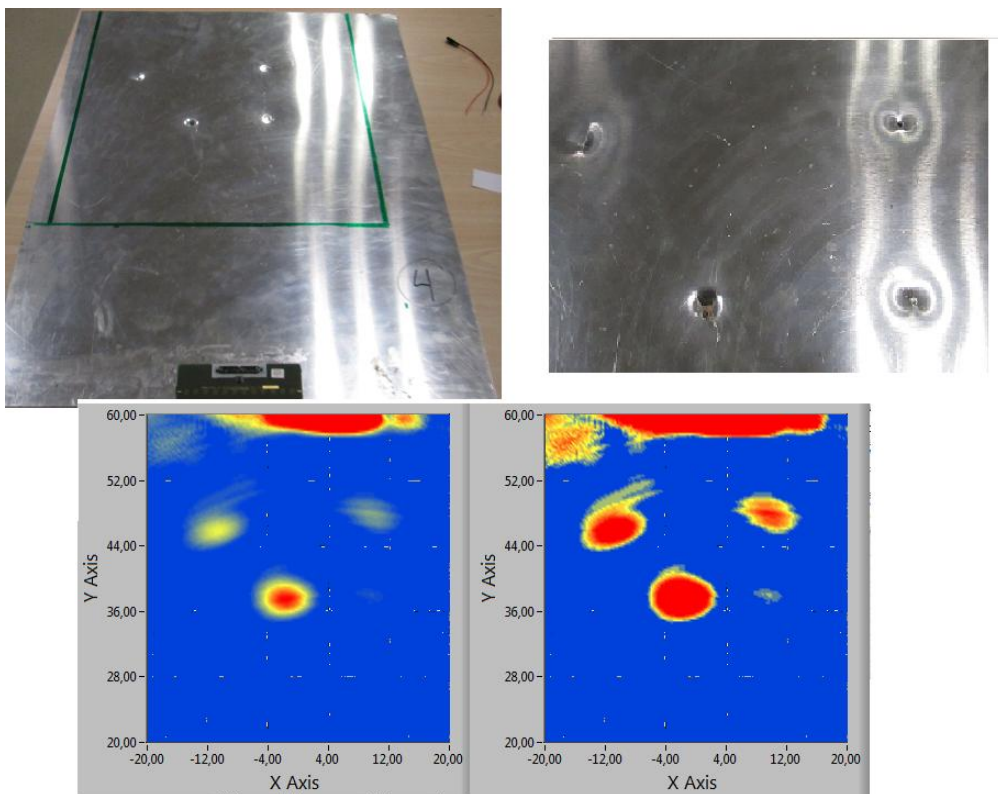


Figura 52. Panel "4", con idénticas características que el panel utilizado anteriormente, con una serie de daños diferentes y dos imágenes generadas por la aplicación, donde se ha variado el umbral de detección.

En la figura 52, pueden ver 4 impactos sobre el panel. Cada uno de ellos se ha realizado con un impacto de diferentes energías, generando dos de ellos daños pasantes, y otras dos deformaciones de distinta intensidad. Se observa como la imagen representa los diferentes daños proporcionalmente a su intensidad, lo cual permite cierto nivel de caracterización de los mismos. Además, demuestra la capacidad del sistema para detectar daños menos obvios que los daños pasantes. Por último, resaltar que los perfiles de estos daños no son regulares como los taladros analizados en el primer caso, y no generan, a priori, reflexiones tan claras como estos, lo cual no impide una correcta representación y posicionamiento de los mismos.

En cuanto, al tiempo de ejecución, es como era de esperar mayor que el de la ejecución en el PC, aproximadamente el doble, pero sigue siendo un tiempo aceptable para la inspección de la estructura en tiempo real.

6.2. Conclusiones.

Analizando los resultados obtenidos a partir de la aplicación desarrollada sobre la tarjeta myRIO, se demuestra el potencial de un sistema SHM basado en un *array* de transductores piezoeléctricos y fundamentado en las ondas de Lamb para la inspección de estructuras delgadas. Se ha obtenido una imagen precisa de los daños presentes en el panel, de fácil interpretación y con un tiempo de ejecución que permiten la inspección en tiempo real.

El sistema permite caracterizar los daños, al menos en cuanto a la intensidad de los mismos, aspecto de especial interés para la industria, ya que ciertos daños resultan críticos mientras que otros permiten a la estructura seguir operando e identificar unos de otros puede resultar en un ahorro de tiempo y coste de mantenimiento de las estructuras.

Los resultados obtenidos durante este proyecto permiten ser optimistas sobre la consecución a medio plazo de un sistema SHM basado en un *hardware* de adquisición y una tarjeta con un procesador embebido y una FPGA, todo ello en un único dispositivo.

La FPGA proporciona al sistema la capacidad de adquirir y pre procesar las señales a altas velocidades, mientras que el procesador permite un procesamiento de datos complejo, lo cual reduce la carga de trabajo del PC de control, aumenta la velocidad del

sistema y reduce a su vez el tráfico de datos entre los diferentes dispositivos que puedan estar gestionados por el PC de control.

Una serie de dispositivos de estas características asociados a diferentes partes de una estructura puede permitir la obtención en tiempo real de una imagen tridimensional de gran calidad sobre el estado de la estructura. Además, la tecnología inalámbrica permite la inspección de estructuras complejas y de difícil acceso sin necesidad de desmontar pieza a pieza, por ejemplo, la aeronave en el caso de la industria aeronáutica.

Por último, el dispositivo *myRIO* y todo el entorno *Labview* que lo sustenta demuestra ser una herramienta de gran potencia y utilidad para el aprendizaje de este tipo de dispositivos basados en FPGA, así como, permite desarrollar prototipos con un bajo coste y tiempo de desarrollo reducidos.

6.3. Trabajos futuros.

Al ser, el trabajo mostrado en el presente proyecto, un pequeño paso dentro de un proyecto de gran envergadura y ambición, los posibles trabajos futuros resultan innumerables.

Si se piensa en los pasos inmediatamente posteriores a dar, se propone el estudio de técnicas de *Beamforming* que permiten direccionar el patrón de la señal y, por tanto obtener inspecciones más precisas y sobre estructuras de geometrías más complejas. Así mismo, estudiar configuraciones de *array* bidimensionales que pueden proporcionar mejores resultados sin aumentar la carga de post-procesado de las señales.

Particularmente interesante puede resultar el estudio y adaptación del sistema a estructuras de material compuesto como resinas reforzadas con fibra de carbono CFPR y estructuras de fibra de vidrio por su utilización cada vez mayor en la industria, más concretamente en la industria aeronáutica por sus características de resistencia y reducción de peso.

Por último, a partir de un dispositivo de desarrollo como *myRIO*, se recomienda diseñar un *hardware* propio a partir de las conclusiones que se vayan obteniendo sobre las necesidades del futuro dispositivo. También se recomienda el uso de herramientas de

más bajo nivel para el modelado del código que se integre en la FPGA ya que el entorno *Labview*, aunque permite realizar desarrollos a ingenieros que no tengan los conocimientos y soltura en la programación en lenguajes como VHDL, no será suficiente para obtener un diseño de la lógica que aproveche al máximo los recursos disponibles, como un desarrollador experimentado en este tipo de dispositivos podrá obtener.

BIBLIOGRAFÍA

1 BIBLIOGRAFÍA

A continuación se presenta la bibliografía utilizada en el desarrollo de este proyecto.

- 1- *Labview* User Manual. Ed. April 2003. National Instruments.
- 2- **Wilcox P D 2003** *A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals* IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.
- 3- **Cokonaj, V., Aranguren, G. y Casado, L.,** *Arquitectura Electrónica De Múltiples Canales Para Monitorización Avanzada De Integridad Estructural Mediante El Empleo De Ondas Ultrasónicas*, España, 15 de junio de 2011, 2011, ISSN: PCT/ES2011/070428.
- 4- **Cokonaj, V., Aranguren, G. y Casado, L.,** *Sistema Integrado Para Monitorización De Estructuras Mediante La Técnica De Ultrasonidos*, España, 19 de Febrero de 2010, 2010,ISSN: ES201000242.

-
- 5- **Casado Martínez, L.** *Nuevas Aportaciones a las Tecnologías Electrónicas para la Monitorización de la Integridad Estructural en Aeronáutica.* TD ETSI-UPV, Bilbao, Julio 2011.
 - 6- **Michaels, T. E. y Michaels, J. E.,** *Integrated Monitoring and Inspection with Attached Ultrasonic Transducers,* Proceedings of SPIE, Health Monitoring and Smart .
 - 7- **Giurgiutiu, V.,** *Self-Processing Integrated Damage Assessment Sensor for Structural Health Monitoring,* Febrero 2007.
 - 8- **Giurgiutiu, V.,** *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors,* Academic Press, Press, Burlington, MA, 2007b, ISBN: 0-12-088760-6.
 - 9- **Giurgiutiu, V.,** *Structural Health Monitoring System Utilizing Guided Lamb Waves Embedded Ultrasonic Structural Radar,* Febrero 2006, 2006, ISSN: US6996480.
 - 10- **Giurgiutiu, V.,** *Tuned Lamb Wave Excitation and Detection with Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring ,* Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, vol. 16, no. 4.
 - 11- **Giurgiutiu, V.,** *Embedded NDE with Piezoelectric Wafer Active Sensors in Aerospace Application,* Journal of Materials. 2003a.
 - 12- **Raghavan A and Cesnik C E S** 2005 *Finite-dimensional piezoelectric transducer modeling for guided wave based structural health monitoring.* Smart Materials and Structures.14 (2005).