

SISTEMA DE FORMACIÓN DE IMÁGENES TOFD PARA ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

DARÍO SEGURA*
ALEJANDRO RODRÍGUEZ**

RESUMEN

En el presente trabajo se muestra cómo la simbiosis de dos disciplinas, ingeniería de software y técnicas ultrasónicas, hizo posible el desarrollo de un sistema de ensayos no destructivos para formación de imágenes TOFD, que además permite independizar la aplicación respecto de las herramientas para cómputo comerciales. Se ilustra la incorporación de tres algoritmos al sistema y se prueban mediante el examen a una probeta metálica que contiene un defecto visible. El núcleo del sistema es una tarjeta de ultrasonido controlada por medio de una aplicación para computador diseñada en .NET.

PALABRAS CLAVE: ultrasonido; exploración por amplitud; TOFD; .NET.

TOFD IMAGING SYSTEM IN NONDESTRUCTIVE TESTS

ABSTRACT

This paper shows how the symbiosis of two disciplines, software engineering and ultrasonic techniques, made possible the development of a nondestructive testing system for TOFD imaging, and it also allowed to make the application of commercial computation tools independent. It illustrates the addition of three algorithms to the system, and they are tested by examining a metal cylinder containing a visible defect. The core of the system is an ultrasound card controlled through a computer application designed in .NET.

KEY WORDS: ultrasound; A-scan; TOFD; .NET.

* Ingeniero Electrónico, Universidad Santo Tomás; Magíster (c) en Ciencias de la Información y las Comunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Profesor, Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia. dariosegura@usantotomas.edu.co

** Físico, Universidad Nacional de Colombia; Magíster y Doctor (c) en Ingeniería Telecomunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, España. Profesor, Facultad de Ingeniería Electrónica e integrante del Grupo de Investigación en Tecnologías Ultrasónicas, Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia. jairorodriguez@usantotomas.edu.co

SISTEMA DE FORMAÇÃO DE IMAGENS TOFD PARA ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

RESUMO

No presente trabalho mostra-se como a simbiose de duas disciplinas, engenharia de software e técnicas ultrassônicas, fez possível o desenvolvimento de um sistema de ensaios não destrutivos para formação de imagens TOFD, que ademais permite independizar a aplicação respeito das ferramentas para cômputo comerciais. Ilustra-se a incorporação de três algoritmos ao sistema, e provam-se mediante o exame a uma proveta metálica que contém um defeito visível. O núcleo do sistema é um cartão de ultrassom controlado por médio de uma aplicação para computador desenhada em .NET.

PALAVRAS-CÓDIGO: ultrassom; exploração por amplitude; TOFD; .NET.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos de las aplicaciones de los ensayos no destructivos consiste en localizar defectos como fracturas o discontinuidades que podrían acarrear peligros en la integridad estructural de componentes utilizados en industrias que involucren construcciones civiles, transporte aéreo, fluvial y terrestre, entre otros.

Usualmente un ensayo no destructivo consiste en la evaluación de la interacción de diversas formas de energía con esos defectos, lo cual se consigue aplicando pulsos de energía en forma de rayos X, ondas electromagnéticas o ultrasonido dentro del material que los podría contener. El procesamiento de la energía que esos defectos permiten pasar, reflejar o dispersar hace factible detectarlos. Debido a la frecuencia del orden de los megahercios con que las ondas mecánicas se propagan a través de una amplia variedad de materiales sólidos sin experimentar demasiada atenuación, se hace posible la utilización de técnicas ultrasónicas para examinar metales en busca de eventuales defectos (Rodríguez, Vitola y Sandoval, 2007).

El objetivo del presente artículo es describir de modo cualitativo el desarrollo de un sistema para ensayos no destructivos que no dependa de ningún lenguaje de cômputo comercial (Forero y Rodríguez, 2008; Rodríguez *et al.*, 2009; Rodríguez, Vitola y Sandoval, 2009) o de alguna aplicación asociada a una tarjeta para ultrasonido (Segura y Rodríguez, 2011). Se presentará el desarrollo de una interfaz

que permite controlar una tarjeta de ultrasonido la cual será utilizada para el diagnóstico de algoritmos de procesamiento de señales ultrasónicas. Más adelante, empleando la técnica de difracción de tiempo de vuelo (TOFD) (Gang y Chi, 2007; Wang, Zhou y Tian, 2008), se ilustrará la aplicación del sistema en una probeta con defecto controlado, mediante la generación de una imagen bidimensional del sector en el que se halla el defecto. Para finalizar, se utilizará un algoritmo que permite corregir un tipo de distorsión que surge con frecuencia en las imágenes TOFD.

Fundamentos

Un equipo estándar de ultrasonido para llevar a cabo ensayos no destructivos consta de una fuente de energía, uno o varios transductores (también llamados palpadores) que transformen dicha energía eléctrica en mecánica y viceversa, un sistema que reciba esa energía eléctrica organizándola en forma de señales, una sección que efectúe el procesamiento de estas y la metodología de exhibición de los resultados (Bentley, 1993).

Sin tener en cuenta el método de imagen empleado, todos los enfoques obtienen información de los defectos por medio de señales A-scan (variación de la amplitud en función del tiempo). En la técnica de pulso-eco, una señal A-scan es una forma de onda eléctrica recibida por un transductor que inicialmente fue estimulado por la fuente de energía. El A-scan contiene información acerca de



la cantidad de energía reflejada por un defecto, lo cual se produce cuando el frente de onda del campo acústico incidente encuentra en su trayectoria de propagación un cambio de la impedancia acústica, resultante de eventuales inhomogeneidades o defectos dentro del material bajo inspección.

2. DIFRACCIÓN DE TIEMPO DE VUELO

Otra técnica de imagen conocida como D-scan (imagen del corte transversal de un espécimen, perpendicular a la dirección de exploración de este), formada con base en un conjunto de A-scan, tiene su fundamento en la difracción que experimenta un campo acústico al interactuar con los bordes de un defecto sobre el cual incide (Birring y Nidathavolu, 2005; Goujon y Kenzie, 2005;

Martínez-Oña, Viggianiello y Bleuze, 2006; Riahi y Abolhasany, 2006).

En la figura 1 se ilustra la disposición experimental de los transductores para obtener una señal A-scan que recibe un transductor receptor R después que el campo acústico emitido por un transductor transmisor T se propaga a través de un material. Se observan además el amplio campo acústico emitido por el transmisor y cuatro trayectorias que lo conforman: la primera que se propaga paralela a la superficie de la probeta, la segunda debida a la difracción producida sobre el campo acústico por el borde superior del defecto, la tercera debida a la interacción entre el campo acústico y el borde inferior del defecto, y la cuarta, denominada eco de fondo, producida por la reflexión del campo acústico después de incidir en una región con desajuste de impedancia debido a la interfase acero-aire (ver figura 2).

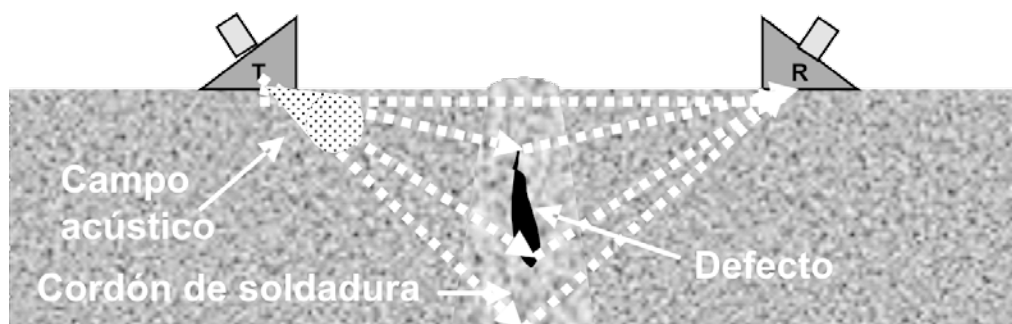


Figura 1. Principio básico para la configuración de la técnica TOFD. Se muestra la sección transversal de una probeta compuesta por dos láminas de acero soldadas y un defecto embebido en el cordón de soldadura

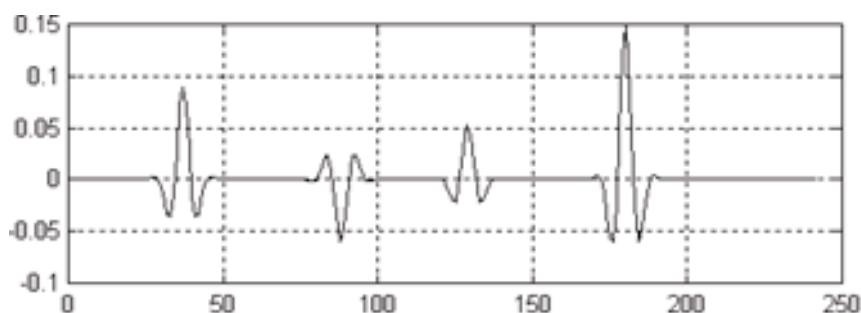


Figura 2. Forma de onda A-scan producida cuando un campo acústico interactúa con un defecto localizado dentro de una probeta

De la figura 2 se puede inferir que, si la probeta en estudio no contiene ningún defecto, entonces el segundo y tercer pulso (esto es, la difracción producida sobre el campo acústico por los bordes de la discontinuidad) no deberán aparecer en la onda A-scan y, en consecuencia, solo deben llegar al receptor el pulso lateral y el eco de fondo. Adicionalmente la figura 2 muestra el cambio de fase con el que llegan al receptor los cuatro pulsos descritos, lo cual permite medir el tiempo de vuelo de cada uno, y con ello determinar el tamaño y ubicación de los defectos.

2.1 Formación de una imagen D-scan

La forma de onda de un A-scan presenta información acerca de un corte delgado de una sección transversal perteneciente a la porción que se examina en una cierta probeta.

En la figura 3 se resalta la información asociada a cada A-scan: si la probeta contiene una discontinuidad, al receptor llegan cuatro pulsos (ver el primer A-scan de la figura 2); por el contrario, si al desplazar la pareja de transductores hacia otra región de la probeta ocurre que el campo acústico no incide en algún defecto, al receptor llegan dos pulsos, el lateral y el eco de fondo (ver el segundo y enésimo A-scan en la figura 2).

2.2 Algoritmo para la formación de imágenes D-scan

Un barrido A-scan entregado por el receptor y almacenado después de haber sido digitalizado, se transforma en un arreglo de elementos $[a_{11}, a_{21}, \dots, a_{i1}]$, y cada vez que la pareja de transductores se desplaza una determinada distancia se agrupan como una matriz de la forma:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11}, a_{12}, a_{13}, \dots, a_{1j} \\ a_{21}, a_{22}, a_{23}, \dots, a_{2j} \\ a_{31}, a_{32}, a_{33}, \dots, a_{3j} \\ a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, \dots, a_{ij} \end{bmatrix}$$

En ella el subíndice j representa el desplazamiento espacial de la pareja de transductores, y el subíndice i , la duración de los barridos A-scan. Ahora bien, la manera de representar en forma gráfica esta información consiste en posicionar cada uno de esos barridos en orientación vertical, y luego su amplitud representarla por la intensidad de un tono gris, de tal manera que los valles de la forma de onda serán codificados por un tono de menor intensidad, y las crestas, por uno con mayor intensidad (Charlesworth y Temple, 2001). Al unir consecutivamente el conjunto de A-scan en el

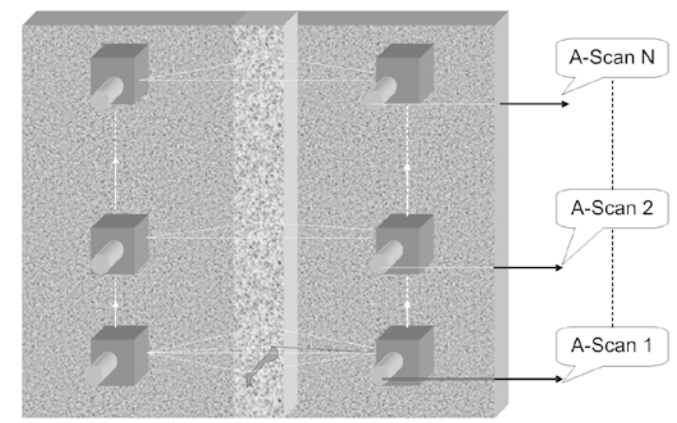


Figura 3. Vista superior de la probeta que ilustra diversas posiciones de los transductores, y las señales A-scan asociadas al desplazarlos en el sentido indicado por las flechas claras

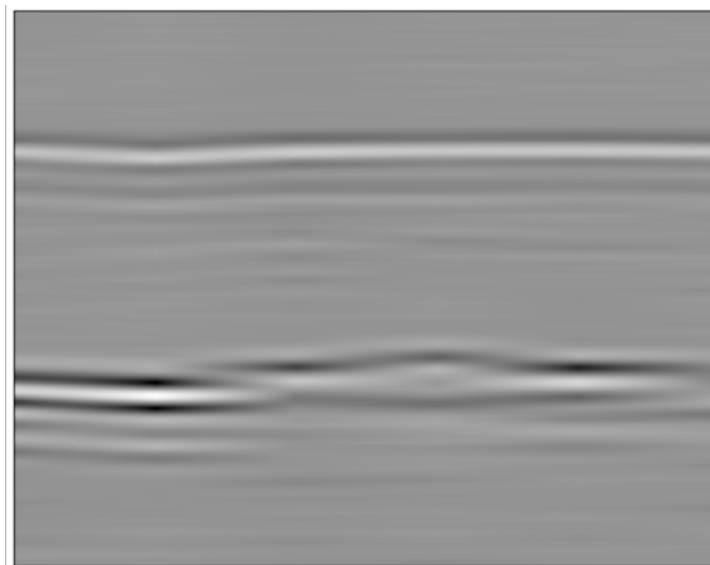


Figura 4. Imagen D-scan lograda por la agrupación de un conjunto de A-scan.

mismo orden en que están almacenadas, se obtiene una imagen como la mostrada en la figura 4 (Bosuat, Walaszeck y Flavenot, 2006; Moles y Labbé, 2008). Obsérvese que solo aparecen la línea superior e inferior, correspondientes a los pulsos laterales y ecos de fondo respectivamente.

De la figura 4 se puede colegir que la probeta examinada no contiene defectos en su interior, ya que en la imagen TOFD (difracción de tiempo de vuelo), también denominada D-scan, no hay evidencia de pulsos difractados.

2.3 Distorsión de las señales A-scan

Una dificultad inherente a los ensayos con la técnica TOFD está asociada al desplazamiento manual de los palpadores, y además a la necesidad de incorporar una sustancia que actúe como acoplador acústico entre la superficie de la probeta y el transductor, lo que se traduce en un indeseable desalineamiento de las señales A-scan debido a un

inevitable zigzag de los transductores, así como a la variación en el espesor del acoplador (Martín, González y Giacchetta, 2007).

2.4 Algoritmos para eliminar la distorsión

A continuación se describirán la técnica usada para incrementar la relación señal-ruido y el método que permite alinear las muestras.

El primero de los dos problemas hace uso de un algoritmo que implica los siguientes pasos:

1. Determinar la máxima amplitud de cada A-scan, $\max(A_{ij})$, y almacenar los índices asociados a cada uno.
2. Extraer la media del arreglo construido a partir del paso anterior.
3. Calcular el error relativo de cada elemento del arreglo, y con base en ello construir uno nuevo que los contenga.

4. Calcular un umbral que determine una ventana de tiempo.
5. Estimar qué A-scan poseen un desfase en el tiempo dentro de esa ventana y cuáles no.
6. Construir una matriz formada con los A-scan contenidos dentro de la ventana.

Para conseguir el alineamiento de los A-scan, se recurre a otro algoritmo que guarda una estrecha relación con el anterior:

1. Calcular la desviación de cada A-scan con base en la diferencia entre cada índice del arreglo $\max(A_{ij})$ y la media obtenida en el paso 2.
2. Se construye una nueva matriz formada siguiendo los seis pasos anteriores, pero desplazando en el tiempo cada uno de sus elementos una cantidad dada por la desviación calculada.
3. A la matriz resultante se le aplica el algoritmo descrito en la sección 2.2.

3. MODELO PROPUESTO

Durante la etapa inicial de investigación para la formación de imágenes D-scan, se siguió el procedimiento esbozado en la figura 5.

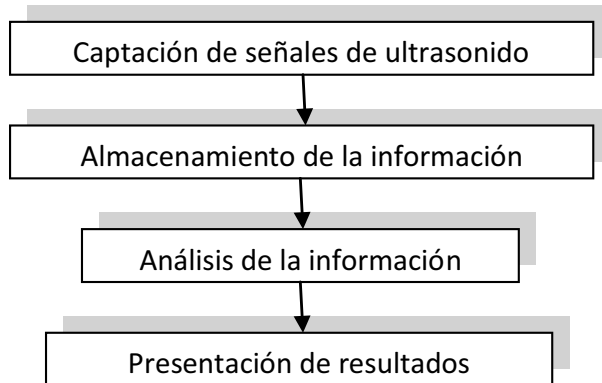


Figura 5. Esquema propuesto para el proceso de adquisición, procesamiento y presentación de una señal D-scan

Los dispositivos que forman el sistema son: a) los transductores de ultrasonido encargados de transformar energía eléctrica en mecánica y viceversa, b) una tarjeta de ultrasonido encargada de captar la señal eléctrica procedente de uno de los palpadores para luego trasladarla a un computador, y c) un computador destinado para las tareas de almacenar, procesar y visualizar la información.

En el procedimiento inicialmente propuesto se emplean tres aplicaciones distintas: la del fabricante, encargada de controlar la tarjeta con el objetivo de adquirir la información entregada por los palpadores, una hoja de cálculo para almacenar la información recogida, y la herramienta MATLAB para el procesamiento, análisis y visualización de la información.

3.1 Descripción del modelo inicial

El modelo de la aplicación propuesta comienza con la organización de los componentes asociados a la adquisición, procesamiento y presentación de una señal de ultrasonido (Boer, Bonsague y Von Buuren, 2007). Véase la figura 6.

El proceso de adquisición de información es el encargado de obtener las señales ultrasónicas y entregarlas al computador. La función de almacenar información permite guardar en disco las señales captadas (puede ser en un archivo con formato para MATLAB o una base de datos) y recuperarlas para un análisis en diferido; esta función lleva a cabo la segunda etapa del proceso. La función de procesar información confiere al sistema la posibilidad de realizar el tratamiento digital de las señales captadas, entregando un resultado que conforma la tercera etapa del proceso. Por último, la función gráfica habilita al sistema para realizar gráficas en un plano cartesiano de manera eficiente, además de formar imágenes bidimensionales, lo que constituye la última etapa del proceso.

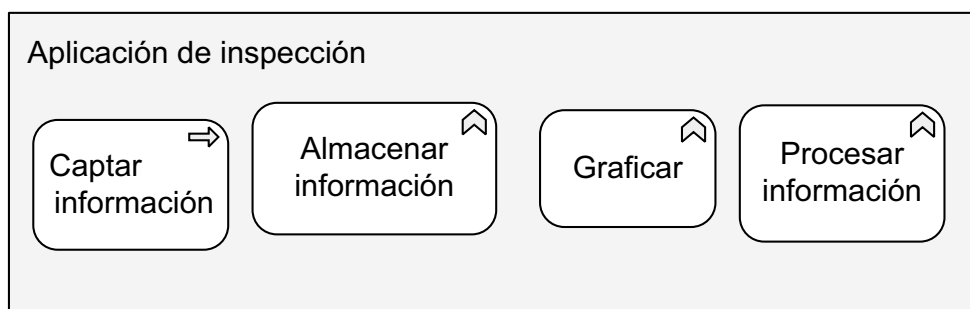


Figura 6. Modelo de componentes propuesto para agilizar el proceso de generación de imágenes TOFD

3.2 Descripción de los componentes

Enseguida se describe la realización del modelo propuesto, teniendo en cuenta que su implementación fue llevada a cabo sobre la plataforma .NET, empleando el lenguaje de programación C#.

3.2.1 Adquisición de información

El proceso de adquisición de información es hecho por dos componentes: el primero que es físico, la tarjeta citada, que permite llevar a cabo inspección no invasiva por medio de ultrasonido, y el segundo, un componente de software entregado por el fabricante para controlarla, que usa las API (application programming interfaces). Como las citadas API son para uso en plataforma Win32, el componente diseñado efectúa el enlace entre estas y la plataforma .NET a través de una biblioteca de vínculo dinámico (DLL) que hace posible el control de la tarjeta OPCARD.

3.2.2 Almacenar información

La función de almacenamiento es realizada por un componente de software y un objeto, que inicialmente es un archivo de formato compatible con MATLAB.

El archivo almacena la información numérica de la señal (resultado de la conversión análoga digital efectuada por la tarjeta), en formato de texto plano de columna finalizada con espacio y fila terminada con el carácter de cambio de línea. Cada columna representa una muestra de la señal de ultrasonido digitalizada, y el conjunto de estas forma un registro. A su vez cada registro, o línea del archivo, representa una toma específica de información, que no es más que la señal digitalizada de un A-scan, y que por definición es el archivo completo con varios registros que posee la información de un D-scan.

Como un ejemplo para ilustrar los anteriores párrafos, con base en los datos consignados en la tabla 1, se puede observar que se distingue una matriz D-scan constituida por 3 barridos A-scan, y cada barrido A-scan constituido por 15 datos digitalizados a una frecuencia de muestreo de 100 millones de muestras cada segundo, con una duración neta de cada uno de los registros de 150 ns. Es pertinente aclarar que los datos del ejemplo citado no son reales, porque aunque la frecuencia de muestreo empleada es la de 100 MHz, la duración de cada adquisición de un A-scan es usualmente mayor de $1.0 \mu\text{s}$, lo que genera más de 100 muestras por cada A-scan.

Tabla 1. Datos de ejemplo almacenados en un archivo

128	128	128	128	50	100	240	128	100	0	135	150	128	128	128
128	128	128	128	40	80	192	128	80	20	135	120	128	128	128
128	128	128	128	80	100	170	128	100	70	135	124	128	128	128

3.2.3 Función graficadora

Esta función está integrada por dos componentes de software: la clase de gráficos cartesianos y la de gráficos en dos dimensiones.

La primera se encarga de visualizar la información que le es entregada en una cuadrícula y ajustar el rango visualizado a los valores óptimos para los datos mostrados, y también permite la visualización tanto de un solo A-scan como de varios a la vez, seleccionando para cada uno de ellos un color diferente. La segunda clase de gráficos está en capacidad de tomar la información de uno o más A-scan y visualizarla como una imagen 2D, transformando las amplitudes de las señales de A-scan en escala de grises, y de unirlos en una sola imagen, tal como se explicó en la sección 2 (ver figura 7a).

3.2.4 Unidad de procesamiento de la información

La función destinada para la tarea de procesar información está compuesta por una clase que contiene los algoritmos necesarios para el procesamiento de las señales.

En la figura 7b se aprecia el resultado de la aplicación de los algoritmos sobre los datos del ejemplo de la tabla 1. La imagen es generada por el componente de gráficos 2D cuando se le entregan los datos a la salida de la unidad de procesamiento.

4. MODELO FINAL

El modelo definitivo consta de dos capas: una de comportamiento, que surge de las necesidades que demanda el proceso de adquisición de señales, y la segunda, una capa de componentes que guía la implementación del sistema (ver figura 8).

Este modelo, que se estima es general, podría en consecuencia ser aplicable en muchas otras áreas donde se precise de la adquisición y del procesamiento digital de señales.

5. RESULTADOS

El modelo del sistema descrito en las secciones 3.1 y 3.2 fue usado para el desarrollo de una aplicación sobre plataforma .NET y lenguaje C#, empleando la tarjeta OPCARD-01/100 y palpadores angulares con frecuencia central de 10 MHz, 6 mm de diámetro y zapatas de 70°. A fin de examinar las posibilidades del sistema, se le aplicó al escrutinio de una probeta de acero con un defecto discontinuo de forma cilíndrica (ver figuras 9, 10 y 11).

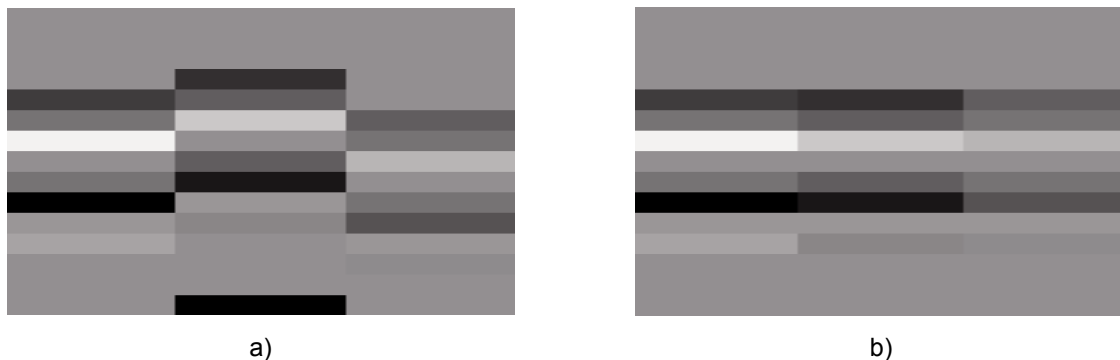


Figura 7 a) Imagen generada por el componente gráfico 2D, con base en los datos de la tabla 1.
b) Imagen entregada por el componente gráfico 2D después de aplicados los algoritmos desarrollados

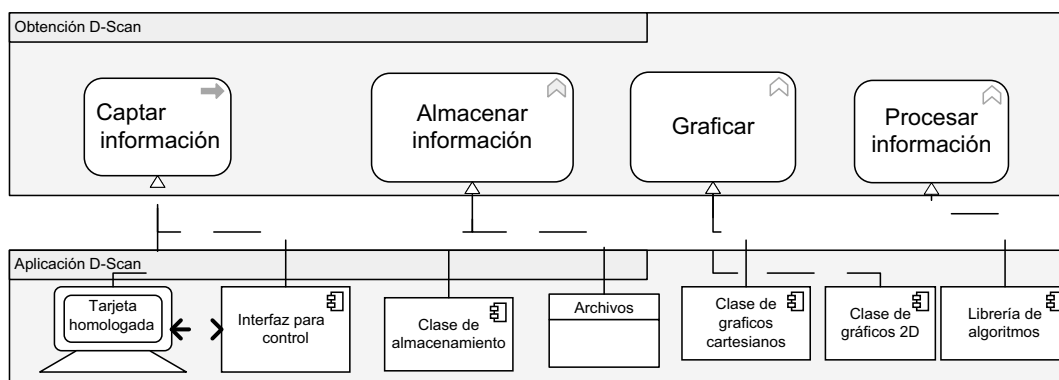


Figura 8. Realización del proceso de adquisición de información



Figura 9. Imagen de la probeta utilizada en los experimentos hechos para el presente trabajo. Obsérvese el orificio localizado en la superficie frontal

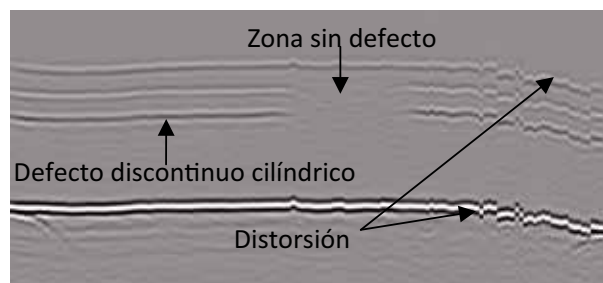


Figura 10. Imagen ultrasónica D-scan entregada por la aplicación y lograda a partir de un conjunto de barridos A-scan obtenidos al explorar la probeta de prueba mostrada en la figura 9

Una vez se lleva a cabo el ensayo, se pone de manifiesto el problema relacionado con la distorsión de las señales, cuya causa se describe en la sección 2.3.

La figura 10 ilustra la anomalía introducida por el movimiento no uniforme de los transductores y la variación en el espesor de la capa del líquido, de modo que cuando la aplicación ejecuta el algoritmo de alineamiento, la imagen presenta una marcada disminución de la distorsión anómala, mientras que la morfología del defecto que se sabe es cilíndrica, aunque no continua, se destaca con nitidez en la silueta, como muestra la figura 11.

Un típico ensayo en el que se examine una probeta como la utilizada demanda unos cinco mi-

nutos entre el inicio de la exploración y la obtención de la imagen alineada, sin necesidad de aplicaciones adicionales, con las cuales la duración se extendía alrededor de 50 minutos (Segura y Rodríguez, 2011).

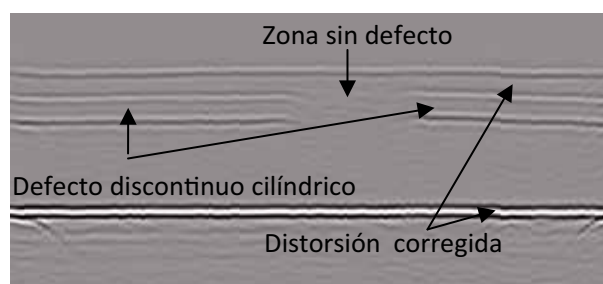


Figura 11. Imagen D-scan corregida después de aplicado el algoritmo de alineamiento

6. CONCLUSIONES

El modelo de software propuesto se valida por medio de su aplicación en el área de los ensayos no destructivos utilizando ultrasonido. Se comprobó que es posible la implementación de un sistema con funciones propias para ensayos no destructivos, que permita la formación de imágenes y procesamiento de los resultados sin el uso de herramientas computacionales tales como MATLAB o similares.

El comportamiento del sistema, sintetizado en tan solo una aplicación, permite la exploración de probetas metálicas utilizando la técnica de difracción de tiempo de vuelo (TOFD). Se incorporaron tres algoritmos al sistema, cuya tarea consiste en realzar la relación señal a ruido de señales ultrasónicas, la formación de una imagen bidimensional que contiene información de secciones transversales de uniones soldadas y la eliminación de ruido asociado al método de inspección. Para probar la eficacia de los citados algoritmos, se utilizó una probeta de acero a la que se le practicó con taladro un orificio cilíndrico no continuo.

La componente esencial del sistema está constituida por una tarjeta de ultrasonido, que se consiguió controlar mediante una aplicación desarrollada en .NET, usando para ello una herramienta de uso libre denominada Visual Studio Express 2010, hecho que libera el tener que sufragar costos de licencias que demande el desarrollo de la aplicación y su eventual utilización comercial.

REFERENCIAS

- Bentley, John. *Sistemas de medición*. México: CECSA, 1993. 493 p.
- Birring, Anmol S. and Nidathavolu, Bharat K. (2005). "Ultrasonic testing of welds by time of flight diffraction: Codes, guidelines and standards". *Materials Evaluation*, vol. 63, No. 9, pp. 910-914.
- Boer, Frank; Bonsague, Marcello and Van Buuren, René (2007). "Concepts for architectural description". *Tele-matica Instituut / Archimate Consortium*.
- Bossuat, B.; Walaszeck, H. and Flavenot, J. F. 2006. "Non destructive evaluation by time of flight diffraction method mechanical applications", *ECNDT*, Berlin (25-29 September), Poster 212.
- Charlesworth, J. P. and Temple, J. A. G. *Engineering applications of ultrasonic time-of-flight diffraction*. 2nd ed. Baldock, UK: Research Studies Press, 2001. 254 p.
- Forero, Edwin y Rodríguez, Alejandro (2008). *Procesamiento digital de señales TOFD*. Memorias del XIII Simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial (STSIVA), Bucaramanga (10-12 septiembre), tomo I, pp. 93-97.
- Gang, T. and Chi, D. Z. (2007). "Novel approach to enhancement of ultrasonic TOFD B-scan, image for measurement of weld crack". *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12, No. 1 (January), pp. 87-93.
- Goujon N. S. and Kenzie B. W. *Recommendations for applying TOFD: Field of application, strengths, weaknesses*. Document 2-31-D-2005-02-1 TOFDPROOF project n° G6RD-CT-2001-00626. The TOFDPROOF Consortium, 2005. pp. 44-58.
- Martín C. J.; González R. y Giacchetta R. (2007). *Ultra-scope TOFD: Un sistema compacto para la captura y procesamiento de imágenes TOFD*. IV Conferencia Panamericana de Ensayos no Destructivos, Buenos Aires (22-26 de octubre).
- Martínez-Oña, Rafael; Viggianiello, Sylvain and Bleuze, Alexandre (2006). *On qualification of TOFD technique for austenitic stainless steel welds inspection*. *ECNDT*, Berlin (25-29 September). 7 p.
- Moles, Michael and Labbé, Simon (2008). *A complete solution for weld inspections: Phased arrays and diffraction sizing*. 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai (25-28 October). 6 p.
- Riahi, M. and Abolhasany, M. (2006). "Substitution of the time-of-flight diffraction technique for nondestructive testing of welds and thick layers of steel: A comparative investigation". *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 42, No. 12, pp. 794-801.
- Rodríguez, Jairo; Vitola, Jaime y Sandoval, Susana (2007). "Fundamentos teórico-prácticos de ultrasonido". *Tecnura*, año 10, No. 20 (julio), pp. 4-18.
- Rodríguez, Jairo; Vitola, Jaime y Sandoval, Susana (2009). "Diseño y construcción de un sistema de ultrasonido para la detección de discontinuidades en soldadura". *Revista Colombiana de Física*, vol. 41, No. 1 (enero), pp. 159-161.



Rodríguez, Jairo; Vitola, Jaime; Sandoval, Susana y Forero, Edwin (2009). "Diseño y construcción de un sistema para examen no destructivo de fallas y defectos en metales utilizando señales ultrasónicas". *Revista EIA*, No. 12 (diciembre), pp. 9-21.

Segura, Darío y Rodríguez, Alejandro (2011). *Interfase para el control de tarjeta de ultrasonido*. Libro de Resúmenes

del XXIV Congreso Nacional de Física, Bogotá (3-7 octubre). 74 p.

Wang, Zicheng; Zhou, Youpeng and Tian, Jianxin (2008). *TOFD-scan imaging based on synthetic aperture focusing technique*. 17th World Conference on Nondestructive Testing (17th WCNDT), Shanghai (25-28 October), vol. 3, pp. 2396-2402.