

DIFRASCOPE: UN INSTRUMENTO COMPACTO PARA TOFD

PACS: 43-35.Yb

Fernández Cruza, Jorge¹; González Bueno, Ricardo²; Mateos Gil, Raúl³; Fritsch Yusta, Carlos¹

1) Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

28500 La Poveda, Madrid, Tel: 918 711 900

E-mail: jorge.fernandez.cruza@iai.csic.es; carlos@iai.csic.es

2) DASEL, S.L.,

Avda. Madrid, 84, 28500 Arganda del Rey, Madrid, Tel: 918 706 427

E-mail: rbeno.mail@gmail.com

3) Universidad de Alcalá de Henares,

Dpto. Electrónica, Escuela Politécnica, 28806 Alcalá de Henares, Madrid

E-mail: raul@depeca.uah.es

ABSTRACT

The ultrasonic technique of Time of Flight Diffraction (TOFD) has been accepted by the ASME 2235 Code Case for weld inspection as an alternative to X-rays or Gamma-rays, which involve ionizing radiation. Differently from other ultrasound techniques, TOFD allows accurate sizing of flaws.

This work describes the technique as well as an instrument for real-time TOFD of up to 32 channels, compact and of flexible application. Besides handling the triggering and signal acquisition, the system yields images through an Ethernet link for remote connectivity.

RESUMEN

La técnica ultrasónica de tiempo de vuelo de la difracción (TOFD) ha sido aceptada por la norma ASME 2235 para la inspección de soldaduras en sustitución de radiografías o gammagrafías, que usan radiación ionizante. A diferencia de otras técnicas ultrasónicas, la TOFD permite dimensionar con precisión los defectos.

Este trabajo describe la técnica y un instrumento con capacidad para TOFD en tiempo real de hasta 32 canales, compacto y de aplicación muy flexible. Además de realizar el disparo y la adquisición de señales, el sistema proporciona las imágenes a través de un enlace Ethernet que le dota de conectividad remota.

INTRODUCCIÓN

La técnica TOFD (*Time Of Flight Diffraction*¹) fue propuesta en 1975 para determinar el tamaño de defectos en metales por ultrasonidos [1]. La técnica se basa en medir los tiempos de vuelo de las *ondas de difracción* producidas por los bordes del defecto, de la *onda lateral* propagada directamente entre emisor y receptor y de la *onda reflejada* en el fondo. En el proceso físico se producen inversiones de fase y variaciones de amplitud que han sido descritas y analizadas en la literatura [2-3]. Las dificultades asociadas a la debilidad de las señales, a la interferencia con las ondas lateral y reflejada y a la interpretación de las imágenes produjeron dudas en cuanto a su utilidad práctica [4-5].

No obstante, es la única técnica ultrasónica conocida que permite –en principio– dimensionar los defectos con precisión al basarse en diferencias de tiempos de propagación y consideraciones geométricas. La superioridad de la técnica TOFD es patente en la monitorización del proceso de soldadura [6]. El impulso definitivo para su desarrollo se produce con el primer borrador de una norma europea para su aplicación [7].

La utilización de técnicas de procesamiento digital de señales resulta particularmente útil para la detección de defectos de fatiga [8]. La determinación precisa de la longitud del defecto es difícil a causa de la gran anchura del haz ultrasónico necesaria para cubrir todo el espesor. Para abordar este problema se sugiere, en una etapa relativamente temprana, la incorporación de técnicas de apertura sintética (SAFT) [9].

Estas dificultades retrasaron la implantación de la técnica, pero son numerosas las evidencias de su mayor fiabilidad en muchos casos. Se describen múltiples aplicaciones, sobre todo en los sectores de generación de energía, industria petroquímica y transporte; en la literatura especializada hay decenas de ejemplos. Esta evidencia concluye en 2005 con la emisión de una norma ASME para la inspección por TOFD de partes críticas de centrales nucleares y turbo-generadores (vasijas de presión y calderas) [10]. Por primera vez se reconoce oficialmente la superioridad de la técnica TOFD sobre la basada en radiografías, única aceptada hasta ese momento para tales estructuras.

En los últimos 5 años se han producido considerables avances para la aplicación de la técnica TOFD. Así, se han investigado métodos de procesamiento digital para la clasificación de los defectos [11-12], que requieren el entrenamiento de los clasificadores, lo que dificulta su rápida implantación en las muy diversas aplicaciones. En contraste, la técnica SAFT ya mencionada proporciona una gran generalidad de aplicación. Aprovecha una de las “debilidades” del TOFD, la gran anchura del haz, para producir imágenes enfocadas en toda su extensión. Esta posibilidad fue claramente reconocida en los trabajos precursores de la técnica y, más recientemente, verificada experimentalmente [13].

Un sistema avanzado para TOFD debe incluir un conjunto de funciones de procesamiento de señal que consideren la extrema debilidad de las señales de difracción y su gran ancho de banda. Además, debe existir un procesador que gestione la obtención de las imágenes y funciones auxiliares que faciliten su aplicación, frecuentemente en zonas de difícil acceso. En este sentido, un objetivo importante es la reducción del tamaño, peso y volumen del equipo sin pérdida de prestaciones.

El estado del arte de la tecnología microelectrónica posibilita la integración del procesador junto a las funciones de generación y tratamiento digital de la señal ultrasónica en un único dispositivo (FPGA, por ejemplo). Esta alternativa, conocida como *System on a Chip* (SoC) proporciona, reducciones de tamaño y coste de fabricación, una mayor fiabilidad y posibilidades de actualización (FPGA reconfigurables). La opción más atractiva es el diseño y realización de un SoC orientado al procesamiento de señal ultrasónica para TOFD, incluyendo

¹ En ocasiones, el término TOFD se traduce como “difracción del tiempo de vuelo”, lo cual no tiene sentido. Estimamos que, lo correcto, es hablar de “tiempo de vuelo de la difracción”, como se utiliza en este documento.

funciones de conexión remota y memoria, integradas con técnicas de procesamiento digital que mejoren la calidad de las imágenes.

Este trabajo presenta el planteamiento de la tecnología DifraScope, diseñada con este propósito.

PRINCIPIOS DE LA TÉCNICA TOFD

A diferencia de las técnicas convencionales de pulso-eco en las que las señales recibidas se deben a reflexiones en discontinuidades en la impedancia acústica del medio, la técnica TOFD registra señales de difracción, esto es, producidas por los bordes del defecto. Esta característica diferencial presenta ventajas e inconvenientes. Entre las primeras, destaca su capacidad para dimensionar con precisión el tamaño de defectos en el interior de los materiales, particularmente soldaduras.

La Figura 1 muestra esquemáticamente las diferencias de operación con un sistema convencional, incluyendo pulso-eco con phased array, en A) y la técnica TOFD en B).

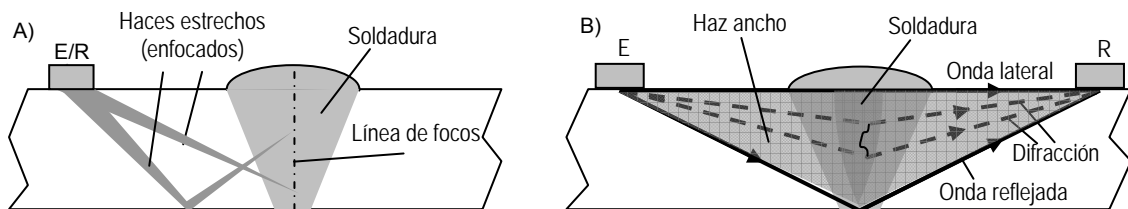


Fig. 1.- Comparación de las técnicas pulso-eco (A) y TOFD (B)

La primera diferencia es que, con la técnica pulso-eco, se opera con un único transductor (monoelemento o array) como emisor y receptor mientras que, en TOFD, se utiliza un transductor emisor (habitualmente de ondas longitudinales) y un receptor, situados como indica la figura 1B, a ambos lados de la región a inspeccionar.

Otra diferencia importante es la anchura del haz ultrasónico en uno y otro caso. En pulso-eco se pretende obtener un haz estrecho para mejorar la resolución lateral. En TOFD, el haz debe ser ancho para cubrir todo el espesor de interés. En el primer caso, si se opera con un monoelemento, la anchura del haz, la posición del foco y el ángulo de deflexión son fijos; con phased array, puede deflectarse electrónicamente el haz y controlar su anchura mediante técnicas de focalización (dinámica en recepción, que proporciona el haz más estrecho posible). En este último caso la dimensión de un defecto se puede estimar con cursores sobre las imágenes obtenidas. Asimismo, la tecnología phased array facilita la elección del modo de propagación (ondas longitudinales o transversales).

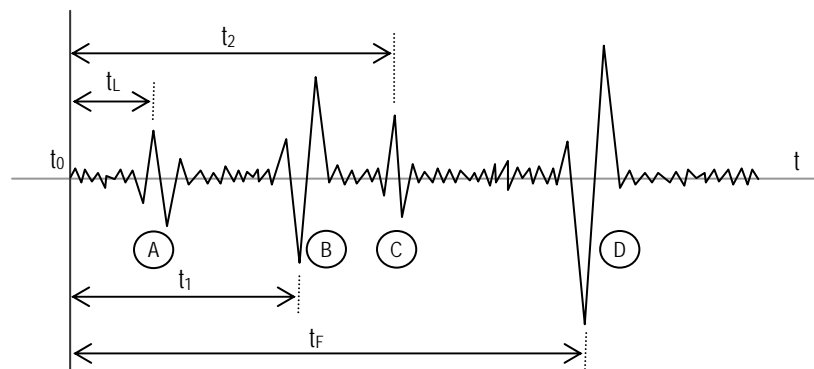


Fig. 2.- Diversas indicaciones en la señal recibida por TOFD: A: onda lateral, B, C: indicaciones de la difracción del defecto, D: Reflexión en el fondo de la pieza.

En TOFD, el elemento emisor genera un pulso ultrasónico de banda ancha, con un lóbulo principal inclinado y de cierta anchura. A partir de un tiempo t_0 de recorrido por las cuñas, al receptor llegan en orden (Fig. 2): A) la onda lateral que discurre bajo de la superficie de la pieza con un recorrido directo E-R; B) y C), señales de la difracción en los bordes de un posible defecto interno y, D) señal de reflexión en el fondo de la pieza. En cada una de estas indicaciones, se produce una inversión de fase, que debe tenerse en cuenta para evaluar los tiempos de vuelo desde el origen común (emisión del pulso). Cuando sólo existen indicaciones de la onda lateral A) y reflexión en el fondo D), la pieza está libre de defectos.

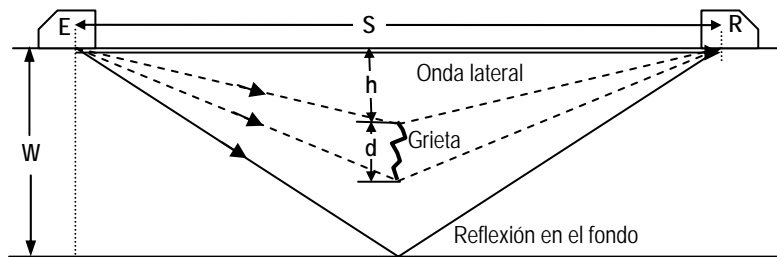


Fig. 3.- Geometría para el cálculo de la dimensión y posición de una grieta.

DIMENSIONAMIENTO DE DEFECTOS

El tiempo de vuelo a las indicaciones de difracción permite determinar las dimensiones y ubicación de un posible defecto. La Figura 3 muestra la geometría utilizada, donde S es la distancia entre emisor y receptor, W el espesor de la pieza, h la distancia de la superficie al borde más próximo de la grieta y d su extensión vertical, en un medio con velocidad de propagación de ondas longitudinales c . Por simple geometría, se tiene:

$$t_L = \frac{S}{c} \quad (1)$$

$$t_1 = \frac{\sqrt{4h^2 + S^2}}{c} \quad (2)$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{4(h+d)^2 + S^2}}{c} \quad (3)$$

$$h = \frac{c\sqrt{t_1^2 - t_L^2}}{2} \quad (4)$$

$$d = \frac{c\sqrt{t_2^2 - t_L^2}}{2} \quad (5)$$

ecuaciones que proporcionan la dimensión d y la posición h de la grieta a partir de medidas de tiempos de vuelo, que se obtienen con precisión. En la práctica, es preciso compensar el tiempo del ultrasonido t_0 en el interior de las cuñas como se indica en [14].

PROBLEMAS ASOCIADOS

El precio a pagar es la debilidad de los ecos de difracción, prácticamente causados por reflectores puntuales (bordes de grietas) o difusos (cuando no presentan bordes definidos). El eco de fondo puede ser significativamente mayor. Además, para cubrir un cierto espesor la anchura del haz debe ser grande, que se obtiene con transductores pequeños, lo que limita aún más la relación señal/ruido.

En ocasiones, se opera con múltiples pares de transductores E-R montados en tándem para cubrir mayores espesores. Por otra parte es frecuente que las inspecciones tengan que realizarse en lugares de difícil acceso, en ocasiones movidos de forma remota por mecanismos manipuladores.

La instrumentación para TOFD debe tener en cuenta estas circunstancias. En particular debe ser multicanal (4-8 canales), disponer de un gran rango dinámico (~100 dB) y muy bajo fondo de ruido. Este trabajo plantea un sistema multi-canal TOFD con estas características y, además, con capacidad para realizar procesamiento digital de señales en tiempo real para mejorar la relación señal/ruido, con un elevado nivel de integración (sistema compacto) y posibilidad de operación remota a través de un enlace Ethernet (DifraScope).

LA TECNOLOGIA DIFRASCOPE

La tecnología DifraScope desarrolla las ideas anteriores mediante arquitecturas innovadoras desarrolladas por nuestro grupo en los últimos 10 años [15-20]. Permite configurar hasta 4 módulos analógicos con 8 canales cada uno. Una placa base del sistema, de reducido tamaño (100 x 160 mm), contiene un módulo analógico (8 canales) y el procesamiento digital en una FPGA reconfigurable Virtex 4, fuentes de alimentación y conectores.

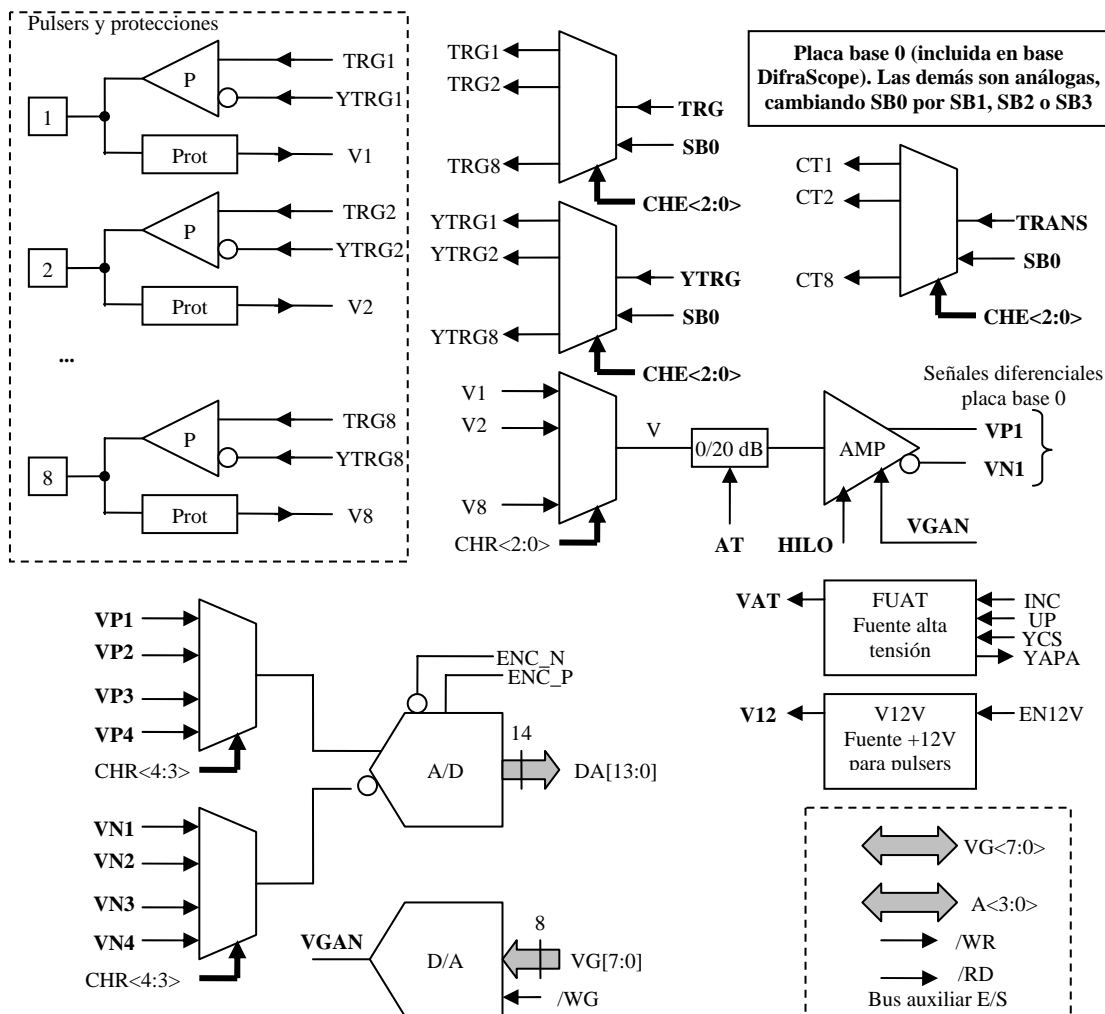


Fig. 4.- Arquitectura analógica de la tecnología DifraScope.

La Figura 4 muestra la configuración de la parte analógica incluida en la placa base del sistema. Dispone de 8 pulsers rápidos (pulsos de hasta 400 V, flancos de 5 ns) y protecciones

activas [20]. Los pulsers se activan con dos señales complementarias (TRG e YTRG) que permiten realizar disparos en ráfagas y se de-multiplexan a los 8 canales.

Las señales recibidas V1 a V8 se multiplexan, pasan por un atenuador programable (0/20 dB) y son amplificadas (AMP) con un rango de ganancia 0 a 60 dB, entregando una señal diferencial inmune al ruido. Las señales diferenciales procedentes de las diferentes bases analógicas se multiplexan para entrar a un único convertor A/D, de 100 MS/s y 14 bits.

De este modo, el pre-procesamiento analógico se reduce estrictamente al mínimo necesario. El ancho de banda de los amplificadores, limitado a 30 MHz, elimina la necesidad de filtrado anti-aliasing, realizado en la FPGA. Cada 8 canales comparten el mismo amplificador y todos ellos el único convertor A/D, lo que facilita la ecualización y cancelación de *offsets*.

Como elementos adicionales, la placa base del sistema incluye un convertor D/A que modifica dinámicamente la ganancia de los amplificadores (común a los 32 canales) para la función de compensación atenuación-tiempo (CAT), una fuente de alta tensión programable (0-400 V), otras fuentes de alimentación y un bus auxiliar E/S de propósito general.

Un aspecto interesante del diseño es que desacopla el canal emisor (CHE) y el receptor (CHR), pudiendo emparejarse arbitrariamente. Esta flexibilidad facilita la labor de los operadores, que pueden asignar los canales *después* de realizar las conexiones. Además, permite la inspección con distintas configuraciones E/R sin modificar las conexiones ni el soporte de los transductores. Para operar en pulso-eco, basta que el número asignado al canal emisor coincida con el del receptor.

Esta característica también facilita la cancelación de la diafonía (*cross-talk*), esencial para ciertas aplicaciones en transmisión con amplificaciones superiores a los 60 dB. En estos casos, el eco devuelto al emisor puede ser muy superior a la señal registrada por el receptor, lo que puede originar diafonía por inducción entre líneas próximas. Los controles CT1 a CT8 bloquean esta posibilidad cuando se opera en transmisión (CHE \neq CHR).

ARQUITECTURA DIGITAL

La Fig. 5 muestra la cadena de procesamiento digital de señal implementado en una FPGA Virtex-4 FX-12. El convertor A/D proporciona los datos digitales en formato LVDS, que son convertidos a paralelo en el bloque S-P. El bloque ECHOST permite iniciar la adquisición y el procesamiento en el momento en el que la señal de entrada supera un umbral programable.

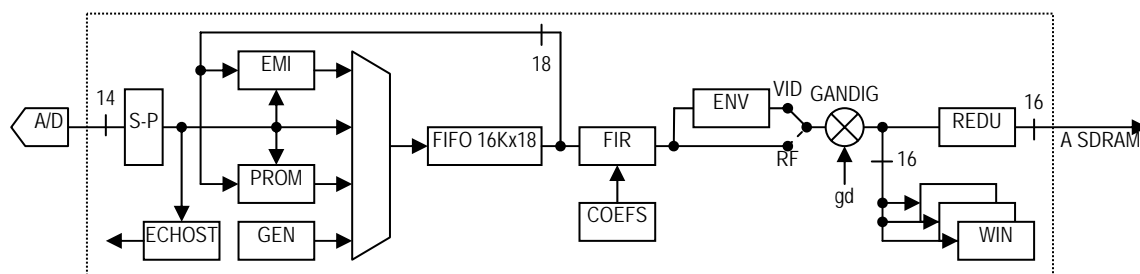


Fig. 5. Cadena de procesamiento digital de señal en la FPGA.

Las muestras obtenidas se almacenan en un FIFO de 16Kx18, se procesan con un filtrado EMI [17] o se someten a promediado PRM. El filtrado EMI cancela el ruido impulsivo sobre una serie de adquisiciones consecutivas (típicamente 2 a 4), mediante un filtro de estadísticos. El promediado puede extenderse de 2 a 256 trazas adquiridas.

Para realizar los procesamientos multi-traza (EMI o PRM), el contenido del FIFO se realimenta a los bloques correspondientes. De este modo, el FIFO contiene la versión más reciente de la traza resultante hasta completar este procesamiento. El otro bloque (GEN) es un generador de señal arbitraria controlado por software o un diente de sierra, realizado en hardware, que permite la verificación y calibrado del sistema.

Tras estas operaciones de pre-procesamiento, las señales pasan por un filtro FIR de hasta 256 coeficientes programables de 18 bits. Con esta capacidad pueden sintetizarse filtros paso-banda muy precisos, con una excelente respuesta en el dominio de la frecuencia y sin distorsión de las señales.

Aunque los registros TOFD se realizan en radiofrecuencia, existe un detector de envolvente ENV para aplicaciones clásicas de pulso-eco o transmisión. Este bloque evalúa el valor absoluto de la señal analítica, obtenida mediante una transformada de Hilbert, una técnica más precisa que la utilizada habitualmente en los sistemas convencionales (típicamente un rectificador seguido de un filtro paso-bajo)

Un multiplicador/divisor permite modificar el factor de amplificación, lo que permite extender el rango hasta los 100 dB y, aun así, dejar un margen de 256 niveles de gris para las imágenes TOFD. El bloque REDU permite comprimir las trazas por un factor programable de 1 a 128 sin pérdidas de amplitud y posición relativas de las indicaciones, mientras que los bloques WIN realizan las puertas programables de detección de picos [17].

CONTROL DEL SISTEMA Y CONEXIÓN REMOTA

El sistema DifraScope se controla mediante un procesador RISC embebido en la FPGA (un Power-PC, de 32 bits). Al bus del procesador se conectan (Fig. 6):

- a) Un motor de programación, que almacena todos los parámetros para los 32 canales (ganancia, tiempos, coeficientes filtros, etc.) y los carga automáticamente en los registros operativos en cada inicio de un *ciclo de adquisición y procesamiento (CAP)*.
- b) Un controlador multipuerto de memoria, con la caché del procesador y acceso a una memoria SDRAM de 64 MB. Recibe los datos procesados y los transfiere a la SDRAM para su envío, formateado en tramas para el enlace Ethernet.
- c) Un controlador de acceso directo a memoria (DMA), con los descriptores necesarios para construir las tramas TCP/IP a alta velocidad.
- d) Un controlador MAC que se conecta al de la capa física y éste al enlace Ethernet.

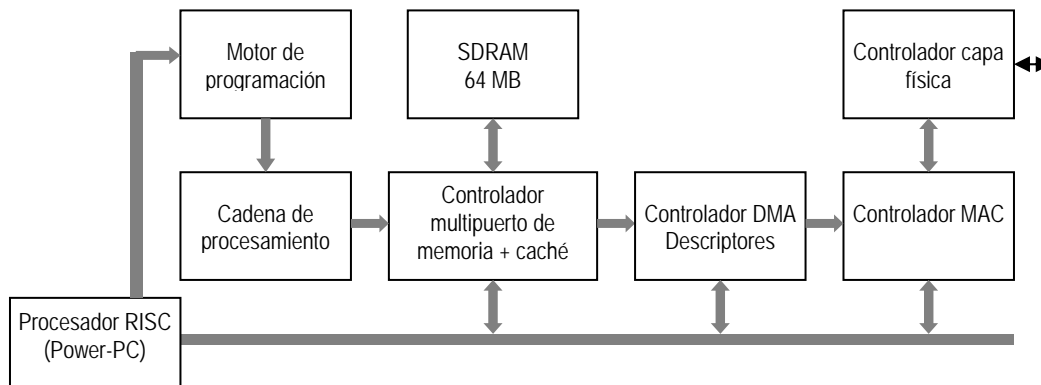


Fig. 6.- Diagrama de bloques del controlador basado en un Power PC.

Esta arquitectura desacopla completamente el proceso de adquisición y procesamiento de señal con las comunicaciones y operación del procesador local. Éste sólo interviene, para

interpretar comandos recibidos por la Ethernet, construir las tramas TCP/IP a partir de datos en memoria SDRAM y gestionar el almacenamiento de parámetros en el motor de programación.

En particular, el procesador no se ocupa ni del disparo de los CAPs ni de la carga de los registros operativos, consiguiéndose temporizaciones precisas y una mayor velocidad de operación. La finalización de un CAP se notifica mediante una interrupción. El procesador también puede realizar otras operaciones auxiliares, como la comunicación con dispositivos externos a través del bus genérico de E/S.

En general, un CAP involucra el disparo, la captura y el procesamiento de señal en múltiples canales. El motor de programación realiza su gestión mediante listas ligadas. La carga de un juego completo de parámetros (incluidos los coeficientes de los filtros) se efectúa en menos de 1 μ s, dejando al sistema en condiciones para un nuevo disparo y adquisición. De este modo, se pueden alcanzar tasas superiores a los 20.000 CAP/s.

El controlador DMA con descriptores facilita la construcción de las tramas TCP/IP a alta velocidad, para evacuar los datos registrados en la SDRAM a un computador central. La transmisión de datos por el enlace Ethernet puede realizarse concurrentemente con la adquisición y procesamiento de nuevas señales. De este modo, la gestión del sistema es prácticamente transparente y los únicos límites a la velocidad son los tiempos de tránsito del ultrasonido y los retardos programados por el operador (por ejemplo, frecuencia de disparo).

La memoria SDRAM, además de proporcionar soporte a los programas del procesador, almacena los datos procesados mientras se espera a su envío por el enlace Ethernet. Actualmente, las comunicaciones son 100 BT (100 Mb/s), velocidad que es suficiente para la mayor parte de las aplicaciones. Por ejemplo, soportaría tasas de 10^4 disparos por segundo, con trazas de 1 KB en una conexión punto a punto sin necesidad de utilizar el reductor de datos (compresión hardware = 1:1).

CONCLUSIONES

La utilización eficiente de la técnica de inspección TOFD requiere instrumentos diseñados específicamente para esta aplicación, algunos de cuyos requisitos son diferentes de los de las técnicas convencionales (pulso-eco o transmisión). En este trabajo se ha descrito la tecnología DifrScope, desarrollada por un equipo multidisciplinar con este objetivo. Su arquitectura presenta un elevado grado de integración y permite la operación con un gran rango dinámico, bajo ruido y alta velocidad. Su realización física es muy compacta, integrando 8 canales en una pequeña tarjeta de formato Europa. Además, permite su utilización en aplicaciones mono o multi-canal convencionales de pulso-eco y transmisión.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado conjuntamente por el proyecto PET-2008_0166 del Plan Nacional de I+D, del Ministerio de Ciencia e Innovación y la empresa DASEL, S.L., Madrid, que también ha participado en su realización.

REFERENCIAS

1. M. G. Silk, B. H. Lidington: "Defect Sizing Using an Ultrasonic Time-Delay Approach", *Brit. J. Non-Destructive Testing*, Vol. 17, no. 2, pp. 33-36. Mar. 1975.
2. J. A. Ogilvy and J. A. G. Temple: "Diffraction of elastic waves by cracks: application to time-of-flight inspection", *Ultrasonics*, 21, 6, pp. 259-269, 1983.
3. F. A. Ravenscroft, K. Newton and C. B. Scruby: "Diffraction of ultrasound by cracks: comparison of experiment with theory", *Ultrasonics*, 29, 1, pp. 29-37, 1991.

4. A. Hecht: "Time of Flight Diffraction Technique (TOFD): An Ultrasonic Testing Method for all applications?", *ndt.net*, 2, 9, 1997.
5. B. Browne: "Time of Flight Diffraction. Its limitations, actual and perceived", *ndt.net*, 2, 9, 1997
6. S. Lawson: "Ultrasonic testing and image processing for in-progress weld inspection", *ndt.net*, 1,4, 1996.
7. ENV 583-6: The European TOFD standard draft. Non-destructive testing - Ultrasonic examination part 6: Time of Flight diffraction technique as a method for defect detection and sizing. 1996.
8. P. Kreier, G. Brekow: "Critical Argument regarding the European TOFD Draft standard", *ndt.net*, 3, 4, 1998.
9. M.G. Silk: "The rapid analysis of TOFD data incorporating the provisions of standards", *ndt.net*, 2, 9, 1997.
10. ASME case code 2235-9: "Cases of ASME boiler and pressure vessel code", Oct. 11, 2005.
11. O. Zahran, S. Shihab, W. Al-Nuaimy: 'Time-Frequency Techniques applied to TOFD for the automation of Rail-track Inspection', *Railway Engineering*, April, ISBN 0-947644-51-2, 2003.
12. E. P. Moura, R.R. Silva, M. H. S. Siqueira, J. A. M. Rebello: "Pattern Recognition of Weld Defects in Preprocessed TOFD Signals Using Linear Classifiers", *J. of NDE*, 23, 4, pp. 163-172, 2004.
13. V. Schmitz, M. Kröning, S. Chakhlov, W. Fisher: "Synthetic Aperture Focusing Technique 3D-CAD-SAFT", *Review of Progress in Quantitative NonDestructive Evaluation*, 19, pp. 873-880, 2000.
14. J. P. Charlesworth, J. A. G. Temple, "Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction", 2ª Edición, pp. 25.28, *Research Studies Press Ltd*, Inglaterra, 2001.
15. C. Fritsch, T. Sánchez, D. Jiménez: "AMPLIA: una arquitectura modular para procesamiento y despliegue de imagen acústica", *Rev. Acústica*, 31, 2000.
16. J. Camacho, A. Ibañez, M. Parrilla, C. Fritsch: "A front-end ultrasound array processor based on LVDS Analog-to-Digital Converters", *2006 IEEE International Ultrasonics Symposium*, Vancouver (Canadá), 3-6 Oct. 2006.
17. C. Fritsch, J. Camacho, A. Ibañez, J. Brizuela, R. Giacchetta, R. González: "A full featured ultrasound NDE system in a single FPGA", Th 4.3.2, *9th ECNDT*, Berlin, 25-29 Sept. 2006.
18. R. Mateos, J.L. Lázado, F. Espinosa: "Hardware/Software Co-simulation Environment for CSoC with Soft Processors", *IEEE Int'l Conf. on Field-Programmable Technology, ICFPT'04* Brisbane (Australia), Dic. 2004.
19. C.J. Martin, R. González Bueno, R. Giacchetta, E. Moreno: "Ultrascope TOFD: un sistema compacto para la captura y procesamiento de imágenes TOFD", *IV PANDT*, Buenos Aires, Oct. 2007.
20. R. Mateos, J. Brizuela, M. Parrilla, A. Ibañez, C. Fritsch, "An Ethernet-based Ultrasound Signal Processor", *IEEE Int'l Symp. on Intelligent Signal Processing, WISP'07*, DOI [10.1109/WISP.2007.4447610](https://doi.org/10.1109/WISP.2007.4447610), 2007.
21. J. Camacho, C. Fritsch, "Protection Circuits for Ultrasound Applications", *IEEE Trans. UFFC*, 55, 5, pp. 1160-1164, 2008.