

# Visualización y detección ultrasónicas.

## Principios físicos y sistemas. Transferencia industrial

Antonio Ramos; José Luis San Emeterio; Pedro Tomás Sanz  
Dpto. Señales, Sistemas y Tecnologías Ultrasónicas  
Instituto de Acústica ( CSIC ). Serrano 144. 28006 Madrid  
Telef.: 34 - 91 - 5618806. Fax: 34 - 91 - 4117651  
E-mail: aramos@ia.cetef.csic.es

PACS: 43.35. - c

### Resumen

Se describen los objetivos científico-técnicos de la línea de investigación "Visualización y Detección Ultrasónicas" que se desarrolla en el Departamento de Señales, Sistemas y Tecnologías Ultrasónicas del Instituto de Acústica del CSIC. Se detallan sus áreas de aplicación, así como algunas transferencias tecnológicas desde el CSIC implantadas en la industria de END. Se analiza su evolución científico-tecnológica a lo largo de los proyectos de I+D y contratos industriales en los que se ha apoyado su desarrollo, y se hace especial referencia a los resultados publicados durante este último sexenio.

### Summary

The scientific and technical objectives of the "Ultrasonic Imaging and Detection" research line, which is being developed in the Signals, Systems and Ultrasonic Technologies Department of the Institute of Acoustics of CSIC, are described. The application areas as well as some technological transfers from CSIC implanted in the NDE industry are detailed. The scientific and technological evolution of this line, along successive R&D projects and industrial contracts is analysed. A special reference is done to the results published during the last six years.

### Objetivos de la línea de investigación. Temáticas, aplicaciones y equipamiento

El *objetivo principal* es la investigación y desarrollo de nuevos procedimientos y sistemas para la visualización de la estructura interna de cuerpos opacos, buscando la detección de posibles anomalías ocultas o defectos de pequeñas dimensiones. La *vía utilizada* para ello es la síntesis y procesamiento de haces ultrasónicos de corta duración con características optimizadas para cada supuesto concreto de inspección. La consecución de las mejoras necesarias en calidad y/o velocidad de formación, de las trazas de señal ecográfica o las imágenes resultantes en los barridos ultrasónicos implicados, supone generalmente introducir innovaciones en las *temáticas* siguientes:

- Sistemas de transducción piezoeléctrica en banda ancha: Configuraciones mono y multielemento.
- Sistemas de control de haces ultrasónicos pulsados: Conmutación y focalización de arrays.
- Modelización matemático-numérica y Diseño de sistemas de Evaluación No Destructiva (END).
- Detección y Procesado de señales pulsadas en Visualización Ultrasónica.

Desde un punto de vista *práctico*, también se busca reducir la complejidad y coste de las tecnologías resultantes para posibilitar el diseño y implantación industrial de nuevos equipos de Inspección y Evaluación No Destructiva con altas prestaciones en resolución de imagen y capacidad de detección, como respuesta a requerimientos especí-

ficos de empresas del sector que no encuentren una solución adecuada a partir de los equipos comerciales disponibles.

### Temas científicos concretos involucrados en la línea de investigación

La optimización de resultados en visualización y detección requiere esfuerzos coordinados de investigación multidisciplinar en temas muy específicos [1], dentro de las temáticas generales de actuación mencionadas:

- Modelado, simulación y caracterización de transductores piezoeléctricos.
- Diseño y simulación de las etapas electrónicas de emisión / recepción AF en régimen pulsado.
- Análisis teórico y evaluación experimental de fenómenos de difracción ultrasónica en régimen transitorio.
- Modelización, métodos numéricos y simulación global en pulso-eco y en ensayos por transmisión.
- Análisis y evaluación de procesos de focalización y deflexión en arrays ultrasónicos.
- Diseño de sistemas electrónicos para formación y control de haces ultrasónicos pulsados.
- Conmutación de pulsos de A.T. y tratamiento multicanal de trazas de radio-frecuencia.
- Procesos de formación de imagen ultrasónica con alta resolución.
- Propagación de pulsos ultrasónicos de AF en el medio de inspección.
- Técnicas eficaces para procesado de señales ultrasónicas inmersas en ruido.

Sus áreas generales de aplicación son: - Procedimientos y equipos de Evaluación No Destructiva.- Caracterización ultrasónica de materiales y tejidos.- Diseño de sistemas de inspección automatizada en tiempo real.- Diagnóstico no invasivo de alta resolución y otras aplicaciones médicas.- Control de calidad mediante ultrasonidos (END).

La siempre difícil transferencia de resultados al sector productivo se ha efectuado de forma paulatina, mediante contratos y proyectos tecnológicos con la industria del área de la inspección ultrasónica en sectores tales como: construcciones aeronáuticas, transporte ferroviario, energía nuclear, industria metalúrgica, [2].

### Principal Equipamiento Instrumental Específico Disponible

- Analizadores Digitales de Señal en tiempo real con frecuencias de muestreo de hasta 2 GHz.
- Sistemas de Generación / Recepción Ultrasónica pulsada y de tratamiento analógico de señal, en el rango AF, comerciales y también de diseño propio.
- Equipo de Análisis automático de Funciones de transferencia e Impedancias ( hasta 100 MHz en frecuencia ).

- Sistemas para Ensayos no Destructivos: Equipo Krautkrämer para detección no destructiva de defectos y modelo Sendas, en parte de diseño propio a través de un proyecto conjunto con el Instto. de Automática Industrial.
- Sistemas Electrónicos para Control Digital y Focalización Programable de haces ultrasónicos pulsados en AF (desarrollados por el equipo investigador para simulaciones en laboratorio).
- Equipamiento para "Scanning" de precisión en 3-D, Visualización de campo acústico de AF y Generación de imagen ultrasónica. ( Unidad de generación AT diseñada en nuestro laboratorio ).
- Dispositivos y equipos de desarrollo propio para la conmutación multicanal de pulsos AF con alta potencia instantánea. Demultiplexores para pulsos de alto voltaje.

### Resumen de actividades desarrolladas dentro de la línea

Los objetivos y temáticas de esta línea fueron concretados durante la planificación del Instituto en 1994 para el "Programa Científico" del CSIC (1995-1999), [3]. Su planteamiento partía ya de una amplia experiencia anterior y de resultados previos en algunos de los temas implicados. Concretamente, se contaba con la actividad desarrollada durante el quinquenio anterior en dos de las temáticas comprometidas por la U.E.I. de Ultrasonidos en el Plan Estratégico del Instituto ideado en 1989 para los primeros años de la década de los '90: a) "Tratamiento de señales ultrasónicas y procesos de formación de imagen acústica"; b) "Transducción piezoeléctrica en banda ancha".

Como un *antecedente remoto* importante debe mencionarse un proyecto de investigación CAICYT financiado con 22 millones durante el cuatrienio (1984-88): Proyecto CICYT PR84-0193-CO2-01, coordinado parcialmente con proyectos de los Institutos de Física de Materiales, Electrónica de Comunicaciones y Automática Industrial [4]. En dicho proyecto participaron la práctica totalidad de los miembros de la UEI de Ultrasonidos, y contamos además con la colaboración de los Institutos citados, la cual se intensificó en el tercer caso durante la década de los '90.

La *transferencia tecnológica* se abordó en colaboración con empresas destacadas en Ensayos no Destructivos: CASA, TECNATOM, TECAL, ENSIDESA y CAF, y buscando la convergencia con otros equipos del CSIC en proyectos industriales y de los Planes Nacionales de I+D ("Tecnologías Avanzadas de la Producción, y de la Información"). El cauce conductor básico, que ha dado continuidad a las investigaciones, fueron 6 proyectos CICYT tri-anales consecutivos (3 de ellos coordinados) centrados en temas de la línea. Como vía complementaria para la transferencia

tecnológica de los resultados obtenidos, se establecieron 7 contratos de investigación con empresas. En [5] se da una descripción cronológica detallada de las actividades en ambas vías y la metodología de trabajo empleada.

También se ha participado en proyectos CAM, CDTI, de la CC. EE., y en la Red Iberoamericana RITUL de CYTED, estableciéndose relaciones internacionales de cooperación con grupos que cultivan áreas similares.

Detallamos una selección de los últimos proyectos que hemos desarrollado dentro de la línea:

- (1994-97)- **Proyecto Coordinado** CICYT, P. N., TAP 94-0812CO2, "*Introducción de mejoras en END de materiales compuestos mediante técnicas ultrasónicas de exploración multicanal y procesado digital en tiempo real*". Coordinación Itos. Acústica - Automática. Proyecto en Ito. Acústica: "*Técnicas de exploración ultrasónica multicanal en ensayos no destructivos mediante la conmutación electrónica de arrays distribuidos y matriciales*".
- (1994-95)- **Proyecto de I+D** contratado con la empresa TECAL, "*Sistema de conmutación multicanal para exploración automática en procesos de inspección ultrasónica de aceros laminados (64 canales)*". (Proyecto "Ultratec" de ENSIDESA). El sistema es un re-diseño mejorado de un demultiplexor AT de 16 canales, implantado por TECNATOM en la Central nuclear Finlandesa de Loviisa II a partir de un desarrollo de nuestro Instituto.
- (1994-98)- **Contrato de transferencia** de tecnología incluyendo la *concesión del CSIC a TECAL S.A. de licencia exclusiva para la utilización y explotación de Patente Española nº 9300154, Patente USA nº 5,592,031 y Patente Europea EP 0651 508 B1*. (Protegen dispositivos básicos de conmutación para pulsos AT).
- (1995-96)- **Proyecto de I+D CAM**, "*Módulo Transceptor para excitación impulsional eficiente en aplicaciones de ensayos no destructivos*". (Proyecto Concertado Sondas: Instos. Automática y Acústica - CSIC y TECAL ).
- (1994-96)- **Proyecto ESPRIT** -P7510-PACE PC-144, (CEE - MINER ), "*Tecnología Multipalpador en Ultrasonidos*" (TEMPUS ). Consorcio: C. S. I. C. - C. A. S. A. - TECNATON S.A. - TECAL S.A. y CAF S.A.
- (1997-99)- **Proyecto CICYT**, P. N., TAP 97-0662-C02-02, "*Optimización de sistemas de generación/recepción de señales de banda ancha en evaluación no destructiva por ultrasonidos*". Coordinado con Insto. de Automática.
- (1998-99)- **Proyecto I+D, CAM** -Tecnol. Inform. Com. Nº 07T/0031/1997:"*Aplicación de Modelos Computacionales y Técnicas de Caracterización a Adecuación de Señales Ecográficas para Ensayo Demultiplexado Eficaz por US*".

## Proyecto de investigación del curso

- CICYT - Plan Nacional TAP, Nº 99-0864 - ( 2000 - 2003 ) "*Nuevos sistemas de exploración pulsada multihaz para control ultrasónico preciso de características internas en estructuras industriales*"

## Algunos resultados científico - tecnológicos recientes obtenidos

Como resultados de propósito general se obtuvieron diversos Métodos y Técnicas Originales que se encuentran disponibles en nuestro laboratorio, entre los que destacamos:

- Programas de simulación del comportamiento electroacústico de transductores y resonadores piezoeléctricos bajo excitación de banda ancha típica en aplicaciones ultrasónicas para END y ecografía.
- Métodos de análisis en régimen transitorio de fenómenos complejos de radiación ultrasónica a través de aperturas modificadas por medios electrónicos.
- Desarrollo de procedimientos computerizados para el control y la colimación de haces ultrasónicos pulsados en medios fluidos así como para su visualización cuantitativa.
- Técnicas de análisis y diseño de sistemas electrónicos pulsados en alta tensión para excitación, conmutación y focalización de transductores multielemento en el rango (0.5-20) MHz.
- Nuevos algoritmos y software para evaluación numérica y simulación de procesos de difracción ultrasónica en aperturas no convencionales tanto con onda continua como en régimen pulsado.

Dentro de los *Procedimientos y Tecnologías transferidos a la industria en los últimos años*, destacamos algunas innovaciones con una mayor incidencia sobre la mejora en calidad y competitividad de productos industriales:

\* *Desarrollo de Sistema de conmutación multicanal de pulsos AT* sobre 64 transductores, para exploración masiva de defectos durante la producción de acero (prototipo industrial instalado en Tecal S.A.). Permite la inspección en tiempo real con tan solo 4 unidades de generación / tratamiento compartidas por toda la red de transducción.

\* *Procedimiento de excitación impulsional multicanal* (Seim) para transmisión US con alta eficiencia. Se integró en el equipo Sondas (Instos. Acústica/Automática/empresa Tecal). Versiones industriales implantadas en: Instalaciones de CASA ( Illescas -Sara 10, 8 canales- y Cadiz -Sara 1, 4 canales-), CAF S.A. (Beasain, 4 canales), y Centre Europeen pour la Recherche Nucleaire - CERN - (Inspección de soldaduras en el LHC de Ginebra , 4 canales).

\* Una variante de este equipo, que incorpora un demultiplexor PC compatible de AT y 16 canales en array (Proy.

TEMPUS), se instaló en CASA - Getafe. (Inspección de "composites" CFRP). Este desarrollo ESPRIT-PACE, recibió Menciones Especiales MINER-CC.EE por destacados resultados en Innovación Tecnológica y Exportación.

### Selección de resultados científicos publicados durante el último sexenio

Los resultados científicos relacionados con esta línea han sido publicados en las revistas especializadas del área. A continuación se referencia una selección de las publicaciones más recientes:

# A. Ramos, J.L. San Emeterio, and P.T. Sanz, "Improvement in Transient Piezoelectric Responses of NDE Transceivers Using Selective Damping and Tuning Networks", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Cont., Vol. 47, n° 4, Julio, 2000.

# J.L. San Emeterio, A. Ramos, P.T. Sanz, and M. Cegarra, "Definition and measurement of the normalized electrical impedance of lossy piezoelectric resonators for ultrasonic transducers", Ultrasonics, Vol. 38, n° 1-8, Marzo, pp. 140-144, 2000.

# A. Ramos, J.L. San Emeterio, and P.T. Sanz, "Dependence of pulser driving responses on electrical and motional characteristics of NDE ultrasonic probes", Ultrasonics, Vol. 38, n° 1-8, Marzo, pp. 553-558, 2000.

# J.L. San Emeterio, A. Ramos, P.T. Sanz, "La impedancia eléctrica normalizada de transductores cerámicos piezoelectrónicos como herramienta de evaluación y caracterización". Bol. Soc. Esp. Cerám. Vid., Vol. 38 [ 5 ], pp. 518-521, 1999.

# P.T. Sanz, M. Cegarra, A. Ramos, J.L. San Emeterio, "Marco experimental para reconfiguración de las condiciones de excitación - conmutación pulsada en sistemas ultrasónicos de END". CD-ROM Confer.Comunic., TECNIACUS-TICA'99, pp. 1-8, ISBN: 84-8785-02-5, 1999.

# A. Ramos, J.L. San Emeterio y P.T. Sanz, "Sistema ultrasónico para END de composites laminados con núcleos nomex", 9º Congreso Nac. END, 19-21 Mayo 99, Vitoria. Libro de ponencias Edit. AEEND, pp. 43-51, 1999.

# J.C. Lázaro, J.L. San Emeterio, A. Ramos, P.T. Sanz, "Utilización de transformadas tiempo-escala para supresión de ruido coherente en END por ultrasonidos", 9º Congreso Nac. END, Vitoria. Libro de ponencias Edit. AEEND, pp. 363-371, 1999.

# A. Ramos, P.T. Sanz, "Schneller bidirektionaler analoger schalter für hf-impulse mit hoher momentaner leistung". Patente alemana N° DE 693 17 426 T2, 1998.

# P.T. Sanz, A. Ramos, J.L. San Emeterio, "Distortions on the output waveforms of high-voltage spike generators induced from piezoelectric loads, Ferroelectrics, Vol. 224, pp. 47-54, 1999.

# J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, A. Ramos, "Influence of dielectric losses on the shift of the fundamental frequencies

of thickness mode piezoelectric ceramic resonators", Journal of the European Ceramic Society, Vol. 19, n° 6-7, pp. 1165-1169, 1999.

# A. Ramos, J.L. San Emeterio y P.T. Sanz, "Different tuning contributions in piezoelectric transceivers improving transient signals for ultrasonic imaging", Proceedings XI IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, IEEE Cat. Num. 98CH36245, NJ, USA, pp. 251-254, 1999.

# A. Ramos, J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, "Vías de optimización en la generación de señales pulsadas para visualización ultrasónica". I Jorn. IberoAmeric. Ultrason. 1998, Cartagena de Indias (Colombia); Libro Edit. Cyted - UPV, pp. 3-14, 1999.

# Antonio Ramos y Pedro T. Sanz, "Fast Bidirectional Analog Switching System for Electrical Signals of High Instantaneous Power", N° Solic. 94903 893.9; año de concesión: 1998; European Patent EP 0651 508 B1.

# José L. San Emeterio, Pedro T. Sanz y Antonio Ramos, "Adaptación de impedancias mecánicas en procesos de transducción piezoelectrónica para visualización ultrasónica", Revista Acústica, Vol. XXVIII, n° 3-4, pp. 29-31, 1997.

# A. Ramos, P.T. Sanz y J.L. San Emeterio, "Adaptación eléctrica en régimen transitorio de transceptores piezoelectrónicos para formación de imagen ultrasónica", Revista Acústica, Vol. XXVIII, n° 3-4, pp. 33-35, 1997.

# J.L. San Emeterio, "Determination of eletromechanical coupling factors of low Q piezoelectric resonators operating in stiffened modes", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect., Freq. Cont., Vol. 44, n° 1, pp. 1-6, 1997.

# J.L. San Emeterio, "Influence of material damping over de shift of the resonance/antirresonance frequencies in thickness-mode piezoelectric ceramic resonators", Ferroelectrics, Vol. 201, pp. 93-100, 1997.

# A. Ramos, J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, "Electrical matching effects on the piezoelectric transduction performance of a through-transmission pulsed process", Ferroelectrics, Vol. 202, pp. 71-80, 1997.

# J.L. San Emeterio, L. G. Ullate, A. Ramos, "Radiación ultrasónica de elementos de array lineal para uso ecográfico", Anales de Física, Vol. 92, n° 2 , pp. 85-93, 1996.

# A. Ramos, P.T.Sanz, "Fast bidirectional analog switching system for HF pulses of high instantaneous power", Patente USA n° 5,592,031, 1996.

# J.L. San Emeterio, "Determinación del coeficiente de acoplamiento electromecánico de cerámicas piezoelectrónicas con altas pérdidas intrínsecas", Bol. Soc. Esp. Cerám. Vid., Vol. 34, pp. 379-381, 1995.

# L. G.Ullate, A. Ramos, J.L. San Emeterio, "Analysis of the ultrasonic field radiated by time-delay cylindrically focused linear arrays", IEEE Trans.Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont., vol. 41, n° 5, pp. 749-760, 1994.

# E. Riera, A. Ramos, F. Rodríguez, "Temporal evolution of transient transverse beam profiles in near field zones", *Ultrasonics*, Vol.32, n° 1, pp. 47-56, 1994.

Agradecimientos: Nuestro agradecimiento a los colegas del CSIC que han colaborado en alguna de las temáticas de

la línea de investigación, y muy especialmente a los componentes de la U.E.I. de Ultrasonidos, grupo originario de nuestro departamento actual. También agradecemos a las empresas Tecnatom, CASA y Tecal su colaboración en resultados tecnológicos. Este trabajo se realizó con financiación del proyecto CICYT Ref. TAP1999-0864.

## Referencias

[1] A. Ramos; J.L. San Emeterio; P.T. Sanz, "Vías de optimización en la generación de señales pulsadas para visualización ultrasónica": I Jorn. IberoAm. Ultrason., Colombia; Libro Edit. CYTED - UPV, pp. 3-14, 1999.

[2] A. Ramos; L. Gomez-Ullate; C. Valdecantos, "Transferencia de Tecnología desde el CSIC en Inspección Ultrasónica" (Cooperación Tecnológica entre Centros Públicos de Investigación y Empresas), pp. 45-50, Edit: Madri+d, Dir. Gal. Invest., Consej. Educ. y Cultura - CAM, ISBN - 84-451-1455-7, Madrid, 1998.

[3] Programa Científico del Instituto de Acústica del C. S. I. C.. ( 1995 - 1999 ), pp. 17-28, 1994

[4] A. Ramos, J.A. Gallego, F.R. Montero de Espinosa, F. Montoya, E. Riera, J.L. San Emeterio, P.T. Sanz. Memoria final: Realizaciones tecnológicas y resultados del proyecto de investigación CICYT PR84-0193-C02-01, "Estudio y desarrollo de nuevos sistemas de transducción ultrasónica con focalización variable para exploración ecográfica de alta resolución", (1985-88), D. G. de Invest. Cient. y Tec - M E C, 1989.

[5] A. Ramos; C. Fritsch. "Innovación en Sistemas de Imagen Ultrasónica para END. Algunos resultados recientes de cooperación Investigación - Industria. ( I - Antecedentes de transferencia tecnológica desde el CSIC a la industria en sistemas de visualización ultrasónica )". Conferencias del Centro de Tecnologías Físicas (CETEF). Madrid. Junio, 1997.