

TÉCNICAS DE INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS EN AIRE

J. M. Moreno¹, J. Topete¹, C. Fritsch¹, R. González-Bueno², R. Giacchetta²

¹ ITEFI-CSIC, c/Serrano 144, 28006 Madrid, carlos.f@csic.es

² DASEL, S.L., Av. Madrid 84, 28500 Arganda, Madrid, ricardo@daselsistemas.com

RESUMEN

A lo largo de los últimos años hemos venido desarrollando transductores, electrónica y procedimientos para la inspección ultrasónica sin contacto de diversos materiales (ultrasonidos en aire). Las mayores dificultades surgen por las enormes pérdidas de inserción (superiores a 100 dB), principalmente debidas a la desadaptación de impedancias acústicas transductor-aire-pieza.

Los principales avances dieron como resultado una mayor sensibilidad, ancho de banda y resolución. Mediante distintas técnicas de optimización se han conseguido transductores de banda ancha, nuevos diseños para el enfoque de haces ultrasónicos y transductores activos en recepción, que mejoran significativamente la relación señal a ruido.

Este trabajo muestra algunos de los resultados obtenidos con la tecnología desarrollada para ultrasonidos en aire, particularmente para aplicaciones END de componentes de los sectores aeronáutico y aeroespacial.

ABSTRACT

Along the last years we have been developing transducers, electronics and procedures for non-contact ultrasonic inspection of a diversity of materials (air-coupled ultrasound). The major difficulties arise from the huge insertion losses (above 100 dB), mainly due to the transducer-air-part acoustic impedances mismatch.

Major advances resulted in improved sensitivity, bandwidth and resolution. Optimization techniques were followed to get wideband transducers, new designs for beam focusing and active receiving transducers, which improve significantly the signal-to-noise ratio.

This work presents some of the results obtained with the developed air-coupled ultrasound technology, particularly directed towards NDT applications in the aeronautic and aerospace fields.

Palabras clave (keywords): air-coupled ultrasound, non contact inspections

1. INTRODUCCIÓN

Habitualmente, la inspección automática por ultrasonidos de piezas de cierto tamaño y/o geometría compleja se realiza por inmersión total, parcial o con chorros de agua. El agua es un medio acoplante de baja atenuación del sonido entre el transductor (monoelemento o *phased array*) y el componente.

Sin embargo, la utilización de agua presenta múltiples inconvenientes. Por un lado, las piezas han de trasladarse de la línea de fabricación a la de inspección y someterse a un proceso de secado, lo que aumenta los tiempos y costes de producción. Además, ciertos materiales no deben mojarse porque pueden dañarse como es frecuente en muchos componentes del sector aeronáutico-aeroespacial. Finalmente, se ha comprobado que la introducción de agua en materiales laminados puede enmascarar la presencia de algunos defectos.

Por todo ello sería muy conveniente prescindir del medio de acoplamiento o, más precisamente, utilizar aire como medio de acoplamiento entre el transductor y la pieza. Esta situación ideal ha venido presentando importantes dificultades para llegar a ser utilizada en aplicaciones reales.

En primer lugar, el ultrasonido se atenúa en el aire proporcionalmente al cuadrado de su frecuencia, así como en la pieza inspeccionada. Pero, sobre todo, existe una gran desadaptación de impedancias acústicas entre los materiales sólidos y el aire, que ocasiona las mayores pérdidas.

En efecto, la impedancia acústica de un medio es el producto de la densidad por la velocidad de propagación ($Z=\rho\cdot c$) y se mide en Rayls ($\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$). El aire a presión atmosférica y temperatura ambiental, tiene una impedancia acústica $Z_A=410$ Rayls, mientras que un *composite* típico (laminado de fibra de carbono o CFRP), presenta una impedancia acústica $Z_C=5.3$ MRayls, más de 10^4 veces superior. Una cerámica piezoeléctrica tiene una impedancia acústica típica $Z_P=35$ MRayls y, el agua, $Z_W=1.5$ MRayls. Los coeficientes de transmisión T y de reflexión R en la interfaz entre dos medios con impedancias acústicas Z_1 y Z_2 son:

$$T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

De aquí se obtienen las pérdidas de inserción mostradas en la figura 1 para inspecciones por transmisión de CFRP con acoplamiento agua o aire, sin considerar otras pérdidas debidas a la atenuación.

Se observa que, utilizando agua como acoplante, las pérdidas de inserción se sitúan en el entorno de los 20 dB. En contraste, tales pérdidas aumentan hasta unos 160 dB cuando el medio acoplante es el aire.

La obtención de señales útiles para la evaluación no destructiva en estas condiciones es un reto importante que ha requerido superar diversos problemas. Este trabajo presenta nuestra tecnología de inspección con acoplamiento en aire, demostrando su capacidad para evaluar componentes a partir de imágenes ultrasónicas obtenidas sin contacto.

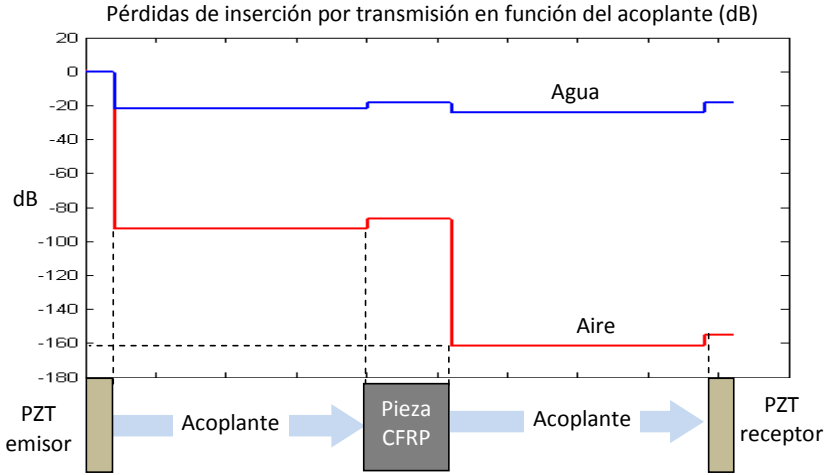


Figura 1. Pérdidas a lo largo del recorrido del ultrasonido por desadaptación de impedancias acústicas, inspección por transmisión con acoplamiento en agua o en aire.

2. TRANSDUCTORES

La gran desadaptación de la impedancia de una cerámica con la del aire produce pérdidas del orden de los 90 dB (figura 1). Sin embargo, diversos avances recientes han permitido reducir significativamente tales pérdidas a niveles similares a los que se producen en los transductores por inmersión.

Para ello se dispone en la superficie del elemento piezoeléctrico una o más capas de adaptación que efectúan un tránsito "suave" de la impedancia acústica de la cerámica a la del aire.

La señal transmitida a través de una capa de adaptación es la suma de las contribuciones de las múltiples reverberaciones dentro de la capa de adaptación. Por esta razón, utilizar una única capa de adaptación conduce inevitablemente a operar en banda estrecha (ancho de banda relativo inferior al 5%).

Para una transferencia máxima de energía al aire, la impedancia acústica de una única capa de adaptación de espesor $\lambda/4$ es [1]:

$$Z_L = \sqrt{Z_A \cdot Z_P} \quad (2)$$

Obsérvese que, con los valores actuales de Z_A y Z_P , la impedancia acústica de esta capa de adaptación debe ser del orden de 0.12 MRayls, que demanda su fabricación con materiales de baja densidad y baja velocidad de propagación, junto con una baja atenuación. Ciertos materiales (por ejemplo, siliconas cargadas con microesferas [2]), proporcionan valores próximos al requerido, aunque también presentan un nivel de atenuación no despreciable.

La atenuación del material de la(s) capa(s) de adaptación juega un papel mucho más determinante en los transductores acoplados al aire que los utilizados para inmersión o por contacto.

La razón radica en que la energía acústica queda confinada en el interior de la capa de adaptación de forma más prolongada para su adaptación al aire que para el agua por la diferencia de impedancias acústicas. Ello supone un mayor recorrido del sonido reverberando en el interior de la capa de adaptación, con el consiguiente incremento en las pérdidas por atenuación. Por esta razón, es difícil conseguir una sensibilidad mejor a -30 dB a frecuencias superiores a 1 MHz.

Por otra parte, para aumentar el ancho de banda, es preciso incorporar varias capas de adaptación. Puede generalizarse (2) cuando se apilan n capas, donde la impedancia acústica óptima para la capa j es [3]:

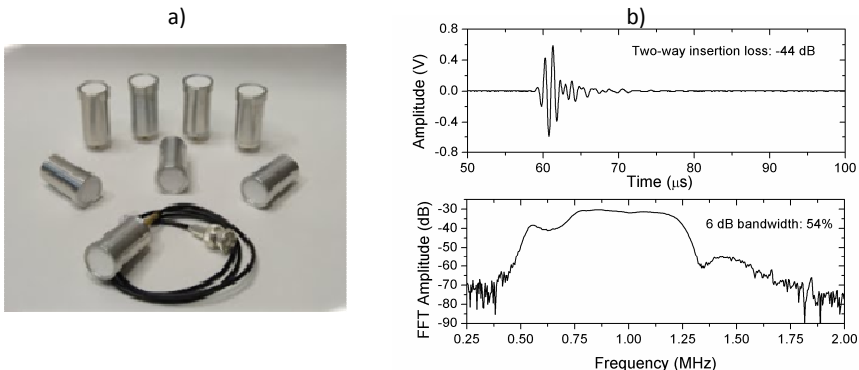
$$Z_L(j) = \sqrt[n+1]{Z_P^{n-j+1} Z_A^j} \quad (3)$$

Los transductores de banda ancha, al igual que en el caso de inmersión, presentan ventajas respecto a los de banda estrecha, a pesar de su mayor complejidad de diseño. Entre otras, facilita colocar adecuadamente las puertas de detección de defectos y reduce las reverberaciones e interferencias en el interior de la pieza.

Para su fabricación, hemos desarrollado procedimientos que proporcionan unas características estables y repetibles, además de gran sensibilidad y ancho de banda.

La figura 2.a muestra algunos de los transductores desarrollados para operar con acoplamiento en aire, así como la respuesta temporal y espectral (transductor de 1 MHz y banda ancha, figura 2.b). Su sensibilidad es del orden de -30 dB en la banda comprendida entre los 0.75 y 1.25 MHz, un valor próximo a la ofrecida por los transductores de inmersión. La duración de la respuesta temporal es de unos 3 ciclos. Obsérvese que la amplitud pico a pico de la señal recibida por un transductor pasivo es de 1 V (excitación=pulso de 160 V).

Figura 2. a) Transductores acoplados al aire de diversas frecuencias; b)



Respuesta temporal y en frecuencia del transductor de 1 MHz.

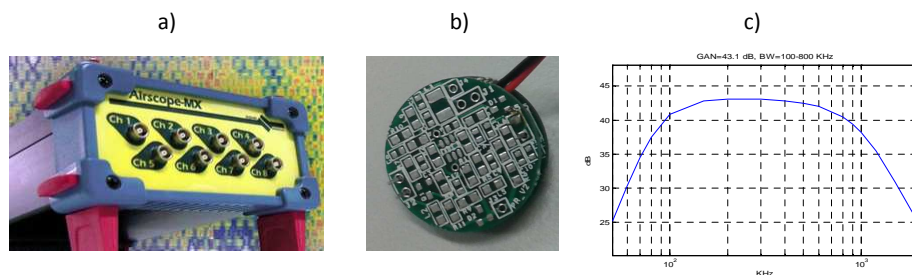


Figura 3. a) Sistema comercial AirScope-MX de 4 canales E/R (transmisión); b) Preamplificador integrado en receptor; c) Respuesta del preamplificador adaptado a la banda 100-800 KHz

3. ELECTRÓNICA

Otro aspecto no menos importante es contar con una electrónica específica para ultrasonidos en aire. El principal objetivo es obtener la mejor relación señal/ruido posible, lo que facilitará la inspección robusta y, al mismo tiempo, una mayor velocidad de barrido al eliminar la necesidad de realizar promediados.

La relación señal/ruido de las señales registradas depende, por un lado, de la energía de excitación del transductor emisor y, por otro, de la calidad de la amplificación en el lado receptor y de las capacidades del sistema para evitar/cancelar interferencias externas (ruido EMI o Electro-Magnetic Interferences).

Estos aspectos se han cubierto en nuestra tecnología mediante (figura 3):

- a) Excitación: El sistema AirScope permite generar ondas cuadradas de anchura, duración y amplitud programables. Este tipo de excitación entrega al transductor una mayor energía que una impulsiva típica de descarga de condensador y evita los ajustes de amortiguamiento. La anchura nominal de la excitación óptima es igual al semiperiodo de la frecuencia central del transductor (p.ej., 500 ns para un transductor de 1 MHz), y puede adaptar transductores entre 10 KHz y 5 MHz. La amplitud de la excitación es programable entre 20 y 400 V, lo que facilita la adaptación a múltiples condiciones.

La duración de la excitación se mide en número de ciclos (periodos) de la frecuencia fundamental, y es programable entre 1 y 16 ciclos. Al aumentar la duración de la excitación, aumenta la energía transmitida facilitando la inspección de materiales atenuantes, de alta impedancia acústica y/o de elevado espesor, consiguiendo niveles de potencia instantánea de varios KW.

- b) Amplificación: Se divide en dos partes, una integrada en el propio transductor receptor y otra en el sistema AirScope.

El preamplificador incorporado al transductor receptor garantiza la integridad de señal al evitar la captura de ruido EMI o de otra naturaleza, por estar unido directamente a la cerámica receptora y apantallado por el

encapsulado. Tiene una ganancia nominal de 43 dB, que puede modificarse, ancho de banda seleccionable entre 0.05 y 5 MHz, una elevada impedancia de entrada y un ruido equivalente a la entrada inferior a 3 nV/√Hz que, para un ancho de banda de 100 KHz, equivale a 1 μV eficaces (unos 6 μVpp).

En estas condiciones, la mayor contribución al ruido en el receptor es de origen térmico en la propia cerámica del transductor.

El amplificador y conversor A/D de 14 bits integrados en la unidad AirScope cubren un rango dinámico de 100 dB sobre un ancho de banda de 20 KHz a 5 MHz, con 4 canales de emisión y 4 de recepción. El ancho de banda puede modificarse mediante filtros digitales de forma arbitraria dentro de esta banda. El ruido equivalente a la entrada de este conjunto es similar al del previo, con lo que no afecta al ruido final de salida.

El conjunto pre-amplificador y amplificador principal cubre un rango superior a los 140 dB para señales de hasta 1 Vpp. Con excitaciones de 400 V, el rango dinámico disponible para compensar las pérdidas de inserción es de 182 dB. Con la mejora de sensibilidad de los transductores, el sistema cubre sobradamente las necesidades de inspección por ultrasonidos acoplados en aire de una gran cantidad de aplicaciones.

- c) Cancelación de ruido EMI: AirScope cuenta con un filtro específico de cancelación de ruido EMI. Este filtro, que se puede activar o no, realiza 2 ó 3 disparos consecutivos para eliminar las indicaciones que cambian su posición en el A-scan, lo que mantiene únicamente las señales ultrasónicas. Como el ruido impulsivo externo es aleatorio, este filtro evita que se produzcan falsas indicaciones. El filtro EMI está particularmente indicado para ambientes industriales con altos niveles de ruido eléctrico (motores, iluminación, etc.).

4. ENFOQUE Y COLIMACIÓN DEL HAZ

Al operar a baja frecuencia para evitar pérdidas por atenuación (a menudo entre 100 y 400 KHz), los elementos piezoeléctricos son relativamente gruesos (3 a 6 mm) y deben ser bastante anchos (hasta 25 mm) para que predominen los modos de vibración axiales sobre los radiales.

Como el haz producido tiene, aproximadamente, el mismo diámetro que el de la cerámica PZT, la resolución lateral resulta inaceptable para muchas inspecciones (~25 mm). Para mejorar la resolución hasta los niveles requeridos (entre 1 y 4 mm, típicamente), es preciso concentrar el haz ultrasónico.

Los métodos convencionales tallan la cerámica de forma esférica con un radio que determina la distancia focal. La anchura del haz a -6 dB a la distancia focal F de una cerámica enfocada de diámetro D es:

$$\Delta x = 1.22F \frac{\lambda}{D} \quad (4)$$

Para conseguir una anchura del haz $\Delta x=2$ mm a una frecuencia de 400 KHz ($\lambda=0.85$ mm en aire) con $D=25$ mm, la distancia focal (radio de curvatura) debe

ser $F= 48$ mm. Esta curvatura deben tenerla tanto la cerámica como sus capas de adaptación. Por otra parte, la profundidad de foco a -3 dB es:

$$\Delta z = 7.1\lambda \left(\frac{F}{D} \right)^2 \quad (5)$$

Para los valores anteriores, $\Delta z=5$ mm, esto es, resulta bastante crítico situar la pieza en el foco (en un rango de 48 ± 2.5 mm). Además, un haz enfocado tiene cierto ángulo de incidencia que viene dado por:

$$\alpha = \tan^{-1}(D/2F) \quad (6)$$

Con los valores anteriores, $\alpha \approx 15^\circ$. Debido al elevado índice de refracción aire-CFRP, buena parte del haz incidente será reflejado al superar el ángulo crítico ($\alpha_c \approx 6.5^\circ$), reduciendo la energía introducida en el material y, por tanto, la sensibilidad para la detección de defectos.

Nuestra alternativa es diferente. Consiste en concentrar y colimar el haz ultrasónico producido por la cerámica, esencialmente una onda plana, mediante espejos reflectores internos.

El diseño recuerda la estructura de los telescopios *Newtonian* y *Cassegrain*, modificados para optimizar la inspección por ultrasonidos. Cuenta con dos espejos: uno frente a la cerámica (primario) y otro sobre la propia cerámica (secundario).

El conjunto produce un haz colimado y estrecho de onda plana, evitando así el problema angular asociado a las cerámicas enfocadas. Denominamos SONOJET a estos transductores pues parecen producir un estrecho "chorro de sonido" en el eje.

La figura 4.a muestra el principio de funcionamiento del SONOJET mediante un trazado de rayos. El haz emitido por la cerámica se refleja en el primario, concentrándolo hacia el eje. El espejo secundario refleja a su vez la onda recibida hacia el orificio de salida practicado en el centro del espejo primario. Los espejos se diseñan para conseguir un haz de fase constante (onda plana) en el eje. El ejemplo muestra un transductor de 400 KHz.

La figura 4.b muestra el campo generado en el exterior a partir del agujero de salida. Se observa que permanece colimado con pocas pérdidas en un rango elevado (70 mm), aunque con ligeras oscilaciones de amplitud en el eje de ± 1 dB, aproximadamente.

El patrón lateral del haz se muestra en la figura 4.c y la resolución a -6 dB (Full Width at Half Maximum o FWHM) es de 2.1 mm a 5 mm del agujero. Se aprecian unos lóbulos laterales a -12 dB respecto al principal, visibles también en la figura 4.b que, en general, no afectarán a la inspección por situarse en posiciones que superan el ángulo crítico.

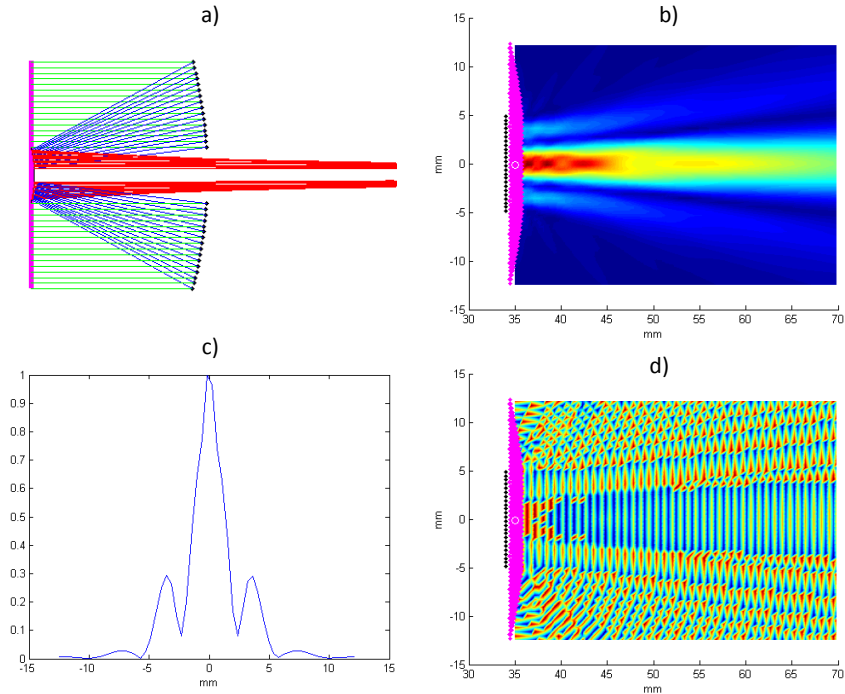


Figura 4. a) Principio de funcionamiento de Sonojet; b) Campo exterior; c) patrón lateral a 5 mm; d) Fase en la región exterior.

Un aspecto diferenciador de SONOJET es que produce un haz colimado con propagación de onda plana, como muestra el diagrama de fases de la figura 4d. Es una característica esencial para optimizar la cantidad de sonido que penetra en el material, al garantizar que el ángulo de incidencia es perpendicular en toda la anchura del haz. Este hecho contrasta con la respuesta de los transductores focalizados convencionales que se comentó anteriormente.

Además, SONOJET proporciona una gran profundidad de foco, sin que apenas varíe la anchura del haz, relajando las exigencias de distancia entre transductor y pieza. La figura 5 muestra la medida experimental de campo.

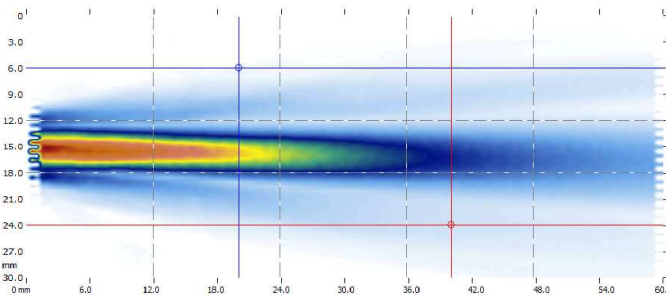


Figura 5. Campo medido experimentalmente, Sonojet 400 KHz-b.a.

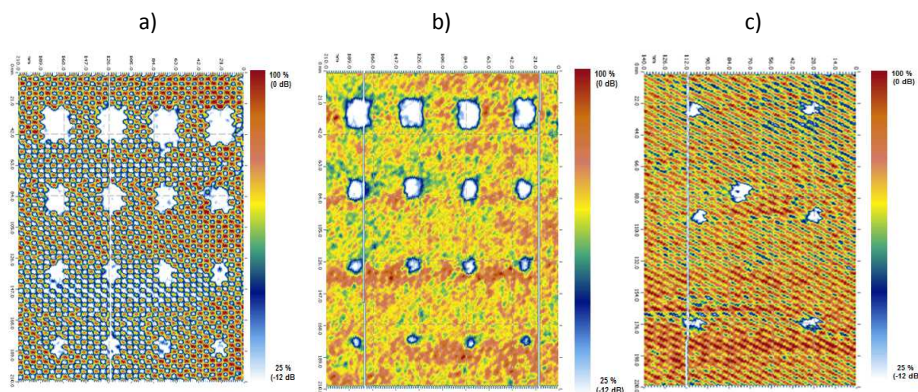


Figura 6. Inspección por de piezas CFRP con núcleo honeycomb metálico: a) Núcleo de 1/4"; b) Núcleo de 1/8"; c) Núcleo de 3/16"

5. ALGUNOS RESULTADOS CON PIEZAS REALES

La tecnología descrita de ultrasonidos en aire se ha utilizado para inspeccionar piezas de una diversidad de materiales, siendo una de sus principales aplicaciones la inspección sin contacto de componentes del sector aeroespacial. En las imágenes que se presentan, se trata de paneles utilizados para la construcción de antenas satelitales, realizados con laminados CFRP y núcleos honeycomb metálicos diversos. Se utilizaron transductores SONOJET, con receptor activo, por transmisión y un sistema AirScope.

La figura 6 muestra imágenes de la inspección por transmisión con acoplamiento en aire de diversos paneles con núcleo honeycomb metálico de 1/4", 1/8" y 3/16", respectivamente, con defectos artificiales de lámina de teflón, insertados en una y otra cara bajo el laminado. Las imágenes no tienen la misma escala.

En la figura 6.a (núcleo de 1/4") los defectos mayores son de 22x22 mm y los más pequeños de 10x10 mm, identificándose en su totalidad. También se observa perfectamente la estructura en nido de abeja del interior del panel.

En la figura 6.b (núcleo de 1/8") los defectos van de 18x18 mm a 6x6 mm. También se observa parte de la estructura, aunque con menor nitidez. Todos los defectos se identifican en la imagen con buena resolución.

En la figura 6.c (núcleo de 3/16"), todos los defectos son de 8x8 mm, observándose otro defecto mayor hacia el centro producido por impacto.

Todos los defectos se detectan con buena resolución y contraste (caída de señal superior a los 12 dB). Demuestra que las imágenes obtenidas con la tecnología de ultrasonidos en aire descrita, permiten evaluar la integridad estructural de estos componentes.

6. CONCLUSIONES

El desarrollo combinado de la tecnología para inspeccionar por ultrasonidos en aire incluyendo transductores, sistema de enfoque/colimado y electrónica de excitación y recepción de señal, ha permitido obtener imágenes con una calidad comparable a las obtenidas con técnicas de inmersión y, en cualquier caso, de calidad suficiente para evaluar la integridad estructural de los componentes inspeccionados sin contacto.

La tecnología desarrollada presenta varias ventajas respecto a otras disponibles, como son la producción de haces colimados de onda plana, la mayor sensibilidad y ancho de banda de los transductores, una mejor relación señal/ruido y un rango dinámico superior a los 180 dB.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto EuroStar E!8929 NUTHIC, financiado por la UE y el CDTI.

A Vicente Martin, de EADS CASA-Espacio (Airbus Defence & Space), por el suministro de los paneles de antenas satelitales utilizados para la experimentación.

REFERENCIAS

1. T. E. Gómez Álvarez-Arenas, "Acoustic Impedance Matching of Piezoelectric Transducers to the Air", *IEEE Trans. UFFC*, v. 51, n. 5, pp. 624-633, 2004.
2. B. T. Khuri-Yakub, J. H. Kim, C.-H. Chou, P. Parent, and G. S. Kino, "A new design for air transducers," in *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, 1988, pp. 503-506.
3. M. N. Jackson, "Simulation and control of thickness mode piezoelectric transducers," *Ph.D. dissertation*, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, 1984.