

## **ALTERACIONES FRECUENCIALES DE LA EXCITACIÓN EN CASOS PRÁCTICOS DE CONTROL DE CALIDAD POR PULSOS ULTRASÓNICOS**

REFERENCIA PACS: 43.35.Zc

Ramos, Antonio; Sanz, Pedro T.; San Emeterio, José L.; Cegarra, Manuel  
Instituto de Acústica C.S.I.C.  
Serrano 144.  
28006 Madrid. España  
Telef.: 34 915 618 806  
Fax: 34 914 117 651  
E-Mail: aramos@ia.cetef.csic.es

### **ABSTRACT**

The required high-voltage driving pulses in ultrasonic quality control ( NDE ) suffer marked perturbations in shape and amplitude of the frequency spectrum when they are applied across the probe reactive impedance. Limitations of an NDE pulse generator to supply "nominal" waveforms in frequency domain across a probe are shown. Some alterations in the HV pulses, induced from electrical and motional probe sections, are analysed. Prediction of driving waveforms with different probes is an useful tool to improve NDE results, but requires fairly complex models in transient regime whose limitations are commented.

### **RESUMEN**

Los pulsos eléctricos de excitación AT en los generadores específicos requeridos en control de calidad por ultrasonidos (END) pueden sufrir alteraciones notables en forma y amplitud de su espectro frecuencial a causa de la impedancia reactiva del palpador ultrasónico. Se muestran las limitaciones de un generador END para mantener características "nominales" en el dominio frecuencial sobre bornes del palpador, frente al caso de carga ideal. Se analizan alteraciones inducidas por la carga transductora, con origen tanto eléctrico como vibracional. La mejora de resultados END, prediciendo el pulso excitador ante diferentes palpadores, requiere aplicar modelos de cierta complejidad que presentan a su vez limitaciones que también se comentan.

### **1. GENERALIDADES**

En aplicaciones industriales de ensayo no destructivo desarrolladas en sectores diversos como el metalúrgico, nuclear o de transporte, resulta de gran utilidad la exploración de partes internas mediante haces ultrasónicos pulsados de corta duración, y por tanto de frecuencia elevada, generados mediante una excitación eléctrica breve de los palpadores (normalmente de tipo piezoeléctrico) mediante pulsos eléctricos de banda ancha. Ello implicaría idealmente buscar excitaciones tipo delta de Dirac. En la práctica, y por consideraciones energéticas, se recurre a

pulsos de mayor anchura. Sus espectros de frecuencia efectivos suelen diferir mucho de los nominales a causa del considerable valor de admitancia de entrada en los palpadores.

En este trabajo mostraremos, a través de configuraciones ultrasónicas típicas para control de calidad, la importancia de las alteraciones sufridas en su contenido frecuencial, frente al caso de carga nominal resistiva, por algunas señales excitadoras cuando se someten los equipos de generación de los pulsos eléctricos de disparo a las condiciones reales de carga.

## **2. CARACTERÍSTICAS DE LA EXCITACIÓN PULSADA PARA END ULTRASONICO**

Para la obtención de una buena resolución en END se utilizan barridos con salvas ultrasónicas breves sucesivas ( de espectro frecuencial por encima del MHz), generadas por estimulación momentánea de transductores piezoeléctricos con un pulso eléctrico intenso y de banda adecuada [1,2]. Se intenta abarcar un amplio rango de frecuencias centrado en la banda ultrasónica de emisión/recepción. El objetivo es asegurar un pulso ultrasónico transmitido lo mas breve posible y con niveles bajos de rizado [3]. En condiciones ideales, buscar este objetivo conduce a ensayar bandas excitadoras lo más anchas posible para alimentar equitativamente todos los segmentos frecuenciales de trabajo (impulsos ideales de duración prácticamente nula y muy alta amplitud). Este requisito se suele materializar con duraciones de pulso similares o bastante inferiores a un semiperiodo resonante, dependiendo del nivel de eficiencia buscado. Por ejemplo, cuando se necesite primar la sensibilidad del ensayo frente a su resolución en profundidad, se debe buscar un espectro de excitación con valores máximos en las cercanías de las frecuencias de resonancia efectiva de los dispositivos ultrasónicos, que frecuentemente están desplazadas notablemente de los valores nominales. La banda frecuencial excitadora elegida debe ajustarse cuidadosamente en cada caso, ya que su eficacia depende mucho de factores de acoplamiento eléctrico en los transmisores [4], y también de los desplazamientos sufridos por las frecuencias de resonancia nominales de los elementos piezo-cerámicos vibrantes, en presencia de cargas mecánicas junto a pérdidas mecánicas y dieléctricas [5].

Las amplitudes adecuadas para los pulsos de excitación, en casos prácticos de END, suelen alcanzar voltajes de pico relativamente altos pero respetando algunas limitaciones para evitar problemas en relación con la conductividad inter-electródica o la posible despolarización piezoeléctrica por sobretensiones. Unas anchuras medias para el pulso de disparo del orden de centenas de nanosegundo, unos tiempos de transición en los flancos de entre 10 y 40 ns, y amplitudes de algunos centenares de voltios pueden considerarse adecuados en aplicaciones típicas de control de calidad industrial mediante ultrasonidos [6].

### **2.1 Planteamiento de los Supuestos Prácticos Analizados en este Trabajo**

Aunque los parámetros generales recomendados en el subapartado anterior para excitación adecuada en control de calidad ultrasónico son bien conocidos, sin embargo la forma de onda excitadora concreta resultante y su espectro de frecuencias en condiciones de trabajo, no resultan fácilmente predecibles a partir de las características "nominales" recomendadas. Una de las causas que dificulta esta predicción es el comportamiento reactivo y la baja impedancia relativa de los palpadores ultrasónicos AF, como carga eléctrica de un generador. Estos factores suelen alterar profundamente el contenido frecuencial del pulso excitador nominal. Algunas redes usadas para adaptar / sintonizar la etapa de transmisión modifican también el espectro final aplicado al transductor piezoeléctrico [7-10]. Por tanto, no pueden evaluarse las características de excitación en condiciones "de vacío" para el generador, o bajo el supuesto de una carga convencional de tipo resistivo.

Por otra parte, la banda frecuencial efectiva aplicada en bornes de los palpadores, bajo condiciones END operativas, resulta determinante para conformar los pulsos ultrasónicos de exploración resultantes, ya que afecta directamente de una forma multiplicativa a la vibración de la superficie radiante a través de la función de transferencia emisora; por tanto dicha banda repercute directamente también en la respuesta de difracción de la apertura emisora [11].

En los siguientes apartados se analizan algunos casos que ilustran la importancia de las alteraciones introducidas en la excitación, frente a lo esperado con cargas convencionales. Esta decisiva influencia de la carga en la etapa electrónica es una problemática distintiva de estas tecnologías frente a muchas aplicaciones electrónicas, por ejemplo en comunicaciones, donde los aspectos de carga eléctrica en cada subsistema han podido ser normalizados a valores óhmicos estándar puramente resistivos, de acuerdo a normativas internacionales.

Una consecuencia de este problema, y en particular de las dificultades de análisis originadas por ello, es la necesidad de perfeccionar herramientas de análisis transitorio en modelización y simulación numérica del sistema global para poder evaluar con precisión su comportamiento electroacústico en régimen de pulsos y con disposiciones (generador AT-palpador) diversas.

### 3. EXCITACIONES IDEALES DE BANDA ANCHA Y EN ALTA TENSIÓN

Idealmente, la mejor elección de forma de onda para excitar en banda ancha sería una delta de Dirac,  $\delta(t)$ , de alto voltaje de pico. En la Figura 1.a se muestra como ejemplo un pulso estrecho de 200 voltios de amplitud que se aproxima a ese impulso ideal en el sentido de que su anchura es muy inferior a los periodos de señal ultrasónica más usuales en END. Se obtuvo a partir de un generador AT diseñado para ensayo industrial [12], ajustando sus parámetros para pulsos de salida cortos e intensos, y sometiéndole únicamente a condiciones de carga resistiva (en concreto, 100  $\Omega$  en paralelo). Puede comprobarse en la Figura 1.b (módulo de la FFT del pulso en 1.a) como las características frecuenciales de este pulso AT son bastantes aceptables hasta 17 MHz como señal de banda ancha ( $\pm 4$  dB), presentando además un rizado pequeño, y por tanto resultaría muy válido para todo el rango de trabajo en END.

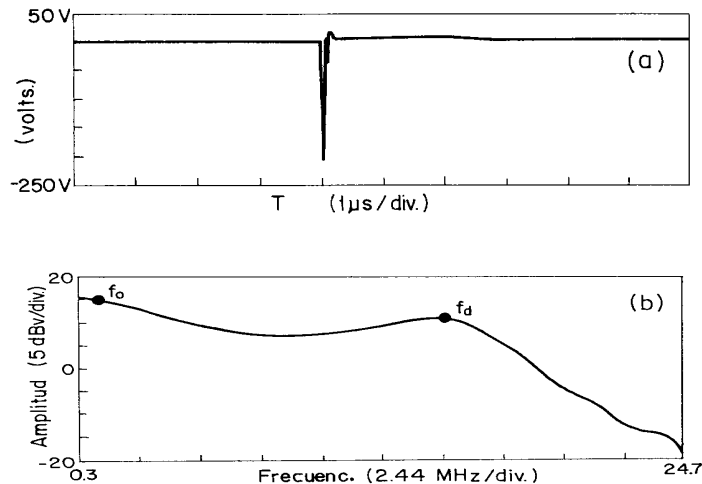


Figura 1. Forma de onda y contenido frecuencial de un impulso estrecho de alto voltaje.

Sin embargo, esta forma de pulso no se mantiene cuando se conectan al generador eléctrico palpadores ultrasónicos END típicos. El motivo es la peculiar admitancia eléctrica de éstos combinada con las impedancias de salida y de cableados en el generador. Todo ello puede provocar deterioros frecuenciales notables como se detalla en el apartado 4.

Otra forma de onda ideal es la ampliamente utilizada ( como señal de estímulo en análisis de sistemas ) función “escalón”. Su realización física con elementos electrónicos la convierte realmente en una función “rampa”. En la Figura 2 se representa en tiempo y frecuencia una función de este tipo, con una amplitud de 310 voltios y un tiempo de bajada de tan solo 9ns, obtenida con el mismo generador de la Figura 1 pero bajo configuración eléctrica muy distinta.

Esta señal excitadora, como era de esperar, decrece más rápidamente con la frecuencia (en la zona útil de su espectro) que la señal impulsional en Fig. 1, y por otra parte presenta similares limitaciones energéticas. Además, por su morfología, resulta muy sensible a deterioros frecuenciales a lo largo de las redes de conexión con cargas fuertemente reactivas, como son los palpadores ultrasónicos. Por ello tampoco resulta ser muy adecuada en ensayos ultrasónicos reales.

La forma de pulso de disparo en banda ancha más utilizada en los equipos industriales viene a ser un intermedio entre las mostradas en las Figuras 1 y 2. Su duración temporal oscila entre un semiperiodo de la frecuencia central de trabajo y una anchura varias veces inferior a ésta. En cualquier caso se trata de asegurar, para unas condiciones reales de carga, una banda de respuesta de la excitación lo más plana posible en la zona ultrasónica útil. En la Figura 3 se muestra una forma de onda de estas características, obtenida bajo condiciones de carga resistiva, con nuestro generador AT de baja impedancia de salida ajustado para una tensión intermedia y una anchura de pulso adecuada a ensayos ultrasónicos en el entorno de 5 MHz.

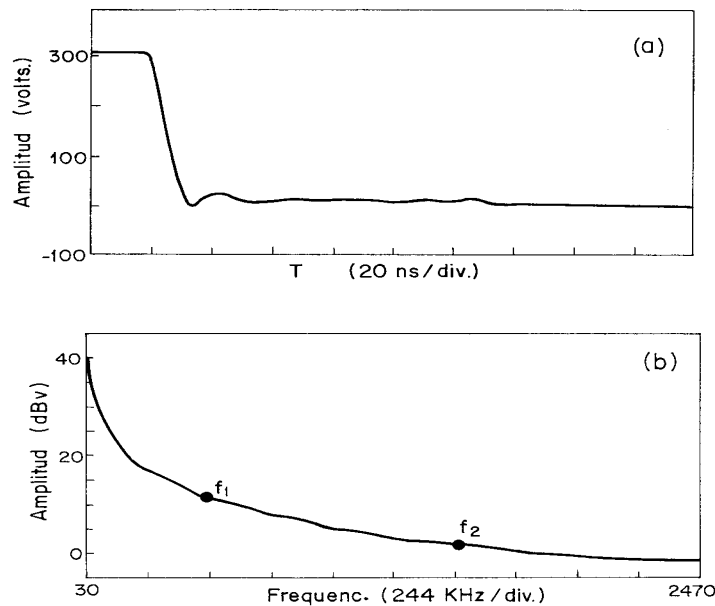


Figura 2. Representación temporal (a) y módulo del espectro (b) de una función escalón de alta tensión "en la práctica" (rampa "exponencial" de - 310 V). Condiciones de carga: 100  $\Omega$ .

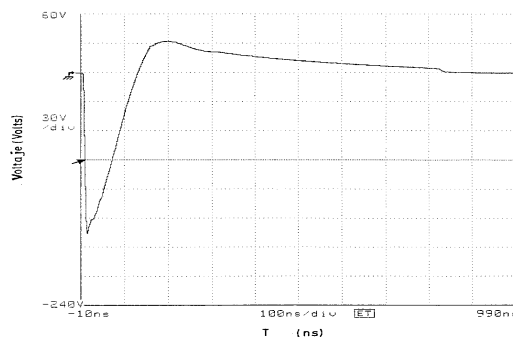


Figura 3. Forma de onda más próxima a los pulsos adecuados para aplicaciones de control de calidad por ultrasonidos. Con una carga resistiva de 220  $\Omega$  y palpador END no conectado.

**4. ALTERACIONES FRECUENCIALES EN EL PULSO EXCITADOR PROVOCADAS POR CARGAS PIEZOELÉCTRICAS. REFLEJO DE ASPECTOS VIBRATORIOS**

El contenido frecuencial de los pulsos de disparo más o menos ideales, mostrados en el apartado anterior para cargas que no incluyen el palpador END, sufre en la práctica notables alteraciones en presencia de cargas piezoeléctricas, incluso para casos muy favorables como los aquí analizados: generador específico para END con alta eficiencia y muy baja impedancia de salida ( del orden del  $\Omega$  ) cargado con un palpador de impedancia relativamente alta.

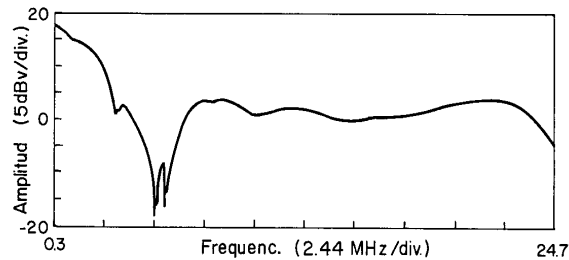


Figura 4. Alteración del espectro de Fig. 1, causada por un palpador END de 1 MHz.

Así, en la Fig. 4 se detalla la deformación espectral que sufre la señal de la Fig. 1, a causa de la conexión de un palpador END de banda relativamente ancha centrada en 1 MHz. La alteración es notable a pesar de que la capacidad  $C_0^S$  de 1,1 nF no representa una carga excesiva a  $f_s$ , y que la conductancia de entrada no resulta especialmente alta (Véase Fig. 5).

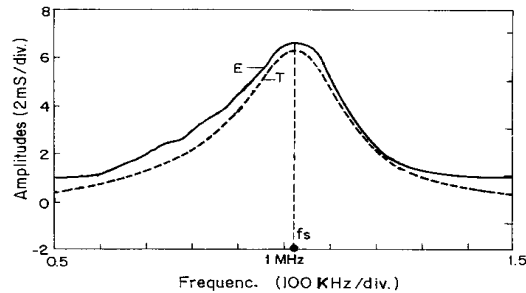


Fig. 5. Conductancia del transductor de carga de 1 MHz ( T = Teórica, E = Experimental ).

La Fig. 6 muestra la alteración observada en el conector de salida en panel del generador, con el escalón de partida de la Fig. 2, y en presencia del palpador considerado en Fig. 5.

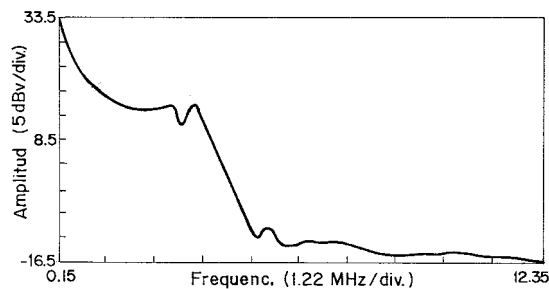


Fig. 6. Alteraciones en la salida del generador a partir del escalón interno de la Fig. 2.

El grado de alteración frecuencial debido a la carga eléctrica del transductor resulta de mucha mayor trascendencia aún en generadores de pulsos convencionales donde la amplitud “en bornes”, y por tanto la eficiencia, resultan particularmente afectadas en alta frecuencia [13].

Otro tipo de alteración que puede afectar al contenido frecuencial de la excitación es la interacción de aspectos vibratorios con la etapa de salida de los generadores END ya que, bajo ciertas condiciones en su impedancia compleja de salida, puede aparecer reflejada en el pulso de excitación (ver Fig. 7) una réplica clara del pulso de fuerza emitido al medio [14].

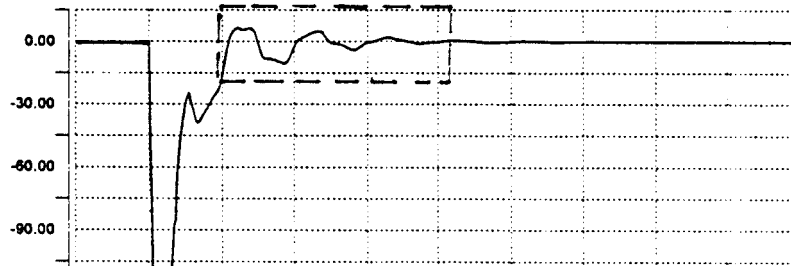


Fig. 7. Detalle del segmento inicial de un pulso excitador, reflejando alteraciones procedentes de la rama mecánica del palpador, y asociadas a la propia vibración pulsada del mismo.

Un análisis causal preciso de alteraciones como las mostradas y de otros efectos no ideales presentes en equipos END requiere disponer de modelos perfeccionados y procedimientos de simulación numérica muy específicos. Se han propuesto modelos equivalentes y expresiones aproximadas que resultan útiles para evaluar algunas de estas alteraciones con la finalidad de compensarlas en la medida de lo posible [10,14]. Sin embargo, presentan aún limitaciones que requieren esfuerzos de investigación adicionales, en particular para mejorar la precisión de análisis sobre algunos factores secundarios que, en una primera aproximación, no suelen considerarse y que sin embargo pueden ser importantes para la conformación de los pulsos de disparo en aplicaciones END de más alta frecuencia. Como ejemplo se pueden citar los efectos de filtrado de componentes frecuenciales elevados y fenómenos espurios de rizado en el pulso de salida causados por conexiones y pistas de C.I. internas de los equipos de ensayo.

## 5. CONCLUSIONES

Se han analizado alteraciones de cierta importancia en el contenido frecuencial de señales de excitación nominales bajo las condiciones reales de carga en END, obtenidas incluso para condiciones de acoplamiento eléctrico bastante favorables con un generador AT diseñado específicamente con muy baja impedancia serie. Se ha mostrado la influencia en la excitación de aspectos espurios procedentes de la vibración del palpador, detallándose las limitaciones de modelos equivalentes para evaluar con precisión algunos efectos no ideales. Todo ello puede tener una clara incidencia, creciente con la frecuencia, sobre las señales resultantes en END ultrasónico. El problema se agrava con generadores de pulsos de tipo convencional.

## AGRADECIMIENTO

Este trabajo se ha realizado con financiación del proyecto CICYT Ref. TAP1999-0864

## REFERENCIAS

- [1] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials*, Berlin: Springer-Verlag, Cap. 7.3 y 10.2, 1983.
- [2] G.S. Kino, *Acoustic waves: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing*, Englewood Cliffs, N J: Prentice-Hall, Cap. 1.4 y 3.4, 1987.
- [3] M.G. Silk, *Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing*, Bristol: Adam Hilger, Capit. 3 y 4, 1984.
- [4] P.T. Sanz, A. Ramos, "Influencia de la capacidad negativa del circuito equivalente de Mason sobre la frecuencia de máxima eficiencia ecográfica", *Comun. XX Reun. Bienal de la RSEF* n. 544, p. 349, 1985.
- [5] 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, No. 6-7, pp. 1165-1169, 1999.
- [6] A. Ramos, P.T. Sanz, F.R. Montero, "Broad-band driving of echographic arrays using 10 ns - 500 V efficient pulse generators", *Ultrasonics*, Vol. 25, pp. 221-228, 1987.

- [7] G. Kossoff, "The effect of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers", *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics*, Vol. SU-13, No 1, pp. 20-30, 1966.
- [8] G.A. Hjellen, J. Andersen, R. Sigelmann, "Computer-aided design of ultrasonic transducers broadband matching networks", *IEEE Tran. Son. Ultrason*, Vol. SU-21, No 4, pp. 302-305, 1974.
- [9] 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.
- [10] A. Ramos, J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, "Improvement in Transient Piezoelectric Responses of NDE Transceivers Using Selective Damping and Tuning Networks", *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Cont.*, Special Issue on *Appl. of Ferroelectrics*, Vol. 47, Nº 4, 2000.
- [11] J.L. San Emeterio, L.G. Ullate, A. Ramos, "Radiación ultrasónica de elementos de array lineal para uso ecográfico", *Anales de Física*, Vol. 92, Nº 2, pp. 85-93, 1996.
- [12] A. Ramos, J. García, P.T. Sanz, "Transceptor ultrasónico en el rango de los MHz, con excitación impulsional de alta tensión en banda ancha", *Patente* nº 551861, pp. 1-19, 1987.
- [13] 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.
- [14] A. Ramos, J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, "Dependence of pulser driving responses on electrical and motional characteristics of NDE ultrasonic probes", *Ultrasonics*, Vol. 38, Nº 1-8, Marzo, pp. 553-558, 2000.