

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Departament d'Enginyeria Electrònica

**CONTRIBUCIÓN A LA MEJORA DE
RESOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE
OBTENCIÓN DE IMÁGENES POR
ULTRASONIDOS**

Autor: Jordi Salazar Soler
Director: Miguel J. García Hernández

Diciembre de 1997

CAPÍTULO 4

Excitación específica de transductores

4.1 Introducción.

En el caso de estudio 1 tratado en el capítulo anterior, el pulso de ultrasonidos capturado por el hidrófono presentaba un comportamiento tal que no permitía poder ser acortado mediante un segundo pulso de excitación aplicado al transductor.

Lógicamente, si se desea obtener un pulso acústico muy estrecho que proporcione gran resolución, el método en teoría más idóneo consistiría en excitar el transductor con la inversa de su respuesta impulsional, obteniendo idealmente una función delta a la salida. El único inconveniente que podríamos encontrarnos sería que la forma de onda de la inversa de la respuesta impulsional no fuera sintetizable debido a su complejidad y ancho de banda.

Sin embargo, si la forma de onda no es muy compleja, se podrá excitar el transductor con su función inversa mediante el empleo de un generador de forma de onda

programable o un circuito electrónico equivalente. Esta solución requiere el conocimiento previo de la respuesta impulsional del transductor.

En este capítulo se obtendrá la respuesta impulsional de un transductor a 4 MHz, se estudiará su comportamiento con la distancia axial, y se sintetizará la función inversa, excitación específica, que proporciona a la salida una señal de gran resolución temporal. Finalmente, se evaluará la calidad de la señal pulso capturado en recepción y se realizará una breve comparativa entre las técnicas de excitación específica y de cancelación por pulso.

4.2 Determinación de la respuesta impulsional de un sistema.

Los métodos existentes de identificación de sistemas son diversos. Algunos de ellos ya fueron estudiados en [TORM97a], proporcionando resultados prácticamente idénticos. En este apartado nos quedaremos con uno de ellos, quizás el más utilizado normalmente.

En un sistema lineal invariante con el tiempo como el de la figura 4.1, la salida $y(t)$ está relacionada con la entrada a través de la convolución con la respuesta impulsional del sistema $h(t)$,

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (4.1)$$

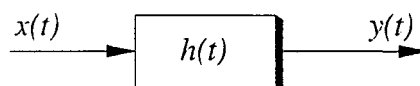


Fig. 4.1 Sistema lineal invariante con el tiempo con respuesta impulsional $h(t)$.

Las técnicas de deconvolución existentes en la literatura han sido desarrolladas para determinar la respuesta impulsional de cualquier sistema lineal.

En el dominio de la frecuencia, la ecuación (4.1) puede ser escrita como

$$Y(j\omega) = X(j\omega) \cdot H(j\omega) \quad (4.2)$$

donde la función de transferencia del sistema $H(j\omega)$ se puede obtener utilizando la expresión (4.2) como

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (4.3)$$

Idealmente, la respuesta impulsional $h(t)$ se obtendría aplicando la función transformada inversa de Fourier a $H(j\omega)$, determinada por la expresión (4.3). Sin embargo, existe un inconveniente ya que generalmente los ceros y polos de $X(j\omega)$ son también ceros y polos de $Y(j\omega)$. Para estos ceros y polos, la expresión (4.3) presenta una indeterminación. Si no se resuelven antes estas indeterminaciones, la $h(t)$ que se obtendría no caracterizaría convenientemente la respuesta impulsional del sistema.

Para resolver estas indeterminaciones, se introduce un compensador $C(j\omega)$ cuya misión es la de interpolar la función de transferencia $H(j\omega)$ en dichos ceros y polos [PARR83, BENN90], esto es

$$H_e(j\omega) = Y(j\omega) \cdot C(j\omega) \quad (4.4)$$

donde $C(j\omega)$ se encuentra definida como sigue

$$C(j\omega) = \frac{X^*(j\omega)}{\left[|X(j\omega)|^2 + \lambda\right]} \quad (4.5)$$

y el superíndice * indica que se trata del complejo conjugado.

La sustitución de la expresión (4.5) en (4.4) resulta en

$$H_e(j\omega) = \frac{Y(j\omega)X^*(j\omega)}{[|X(j\omega)|^2 + \lambda]} \quad (4.6)$$

Típicamente, el proceso de optimización es llevado a cabo de forma iterativa mientras se monitoriza algún indicador, bien sea en el dominio del tiempo o de la frecuencia [PARR83, BENN90]. En ambas formas de resolver el problema, se encuentra un rango de valores para λ para los cuales se cumple el criterio de optimización.

De lo expuesto anteriormente, si se entiende que el proceso de optimización de λ consiste en encontrar la respuesta impulsional que convolucionada con la señal de entrada aproxime lo mejor posible la señal de salida, entonces, se puede intentar determinar el valor de λ_{opt} que hace esto posible.

Para ello, se debería calcular la respuesta impulsional para varios valores del parámetro λ y determinar cuánto se parecen la señal de salida y el resultado de la convolución de la señal de entrada con la respuesta impulsional estimada para ese parámetro λ dado.

La solución propuesta en esta Tesis, que ya fue adelantada en [TORM97a], consiste en utilizar el coeficiente de correlación cruzada normalizado definido como [PROA92]

$$\rho_{xy} = \frac{\phi_{xy}(0)}{\sqrt{\phi_{xx}(0)\phi_{yy}(0)}}, \quad 0 \leq \rho_{xy} \leq 1 \quad (4.7)$$

donde ϕ_{xy} es la correlación cruzada de las señales x e y , y ϕ_{xx} , ϕ_{yy} , representan la autocorrelación de x y la autocorrelación de y , respectivamente. Cuanto más próximo a la

unidad sean los valores que toma este coeficiente, más parecidas serán las señales que se comparan x e y , siendo exactamente la misma señal cuando el coeficiente sea igual a la unidad.

Utilizando la expresión (4.7), se puede optimizar el parámetro λ escogiendo aquél que maximiza el coeficiente de correlación normalizado. La principal ventaja de utilizar este método propuesto es que proporciona un único valor óptimo y no un rango de valores como lo hacían los métodos propuestos por [PARR83, BENN90].

4.3 Obtención de la respuesta impulsional del transductor.

En el apartado anterior, se abordó uno de los procedimientos para la obtención de la respuesta impulsional de un sistema, a partir de la entrada y la salida del mismo. El objetivo de este apartado es obtener la respuesta impulsional del sistema de medida descrito en la figura C.1 del apéndice C.

La frontera entre la región de campo próximo o de Fresnel y la región de campo lejano o de Fraunhofer se encuentra a una distancia L_0 del transductor, dada por

$$L_0 = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (4.8)$$

donde D es el diámetro de la cerámica empleada y $\lambda=c/f$, siendo c la velocidad del sonido en el agua, de valor 1500 m/s, y f la frecuencia de resonancia de la cerámica. Con los parámetros especificados en el apéndice C, la frontera entre las regiones de campo próximo y lejano se encuentra a una distancia de 15 cm del transductor.

Supóngase que se excita el transductor con el pulso $p1(k)$, obteniendo la señal $s1_{30}(k)$ en campo lejano capturada por el hidrófono, medida a una distancia de 30 cm

del transductor, sobre el eje de máxima radiación. Se pueden ver ambas señales muestreadas a 100 MHz en la figura 4.2.

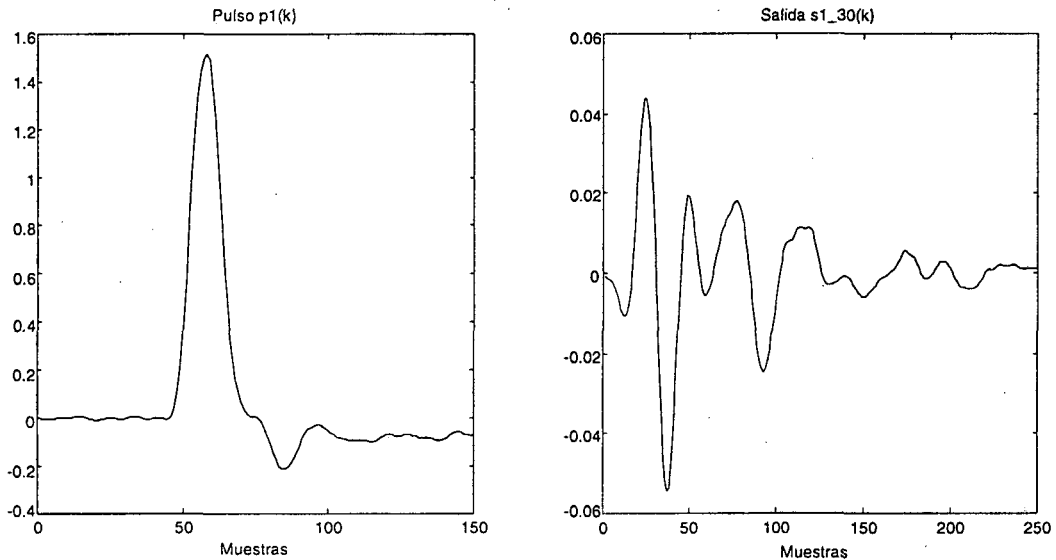


Fig. 4.2 Pulso de excitación $p1(k)$ y señal de salida del transductor $s1_{30}(k)$ medida en campo lejano a una distancia de 30 cm del transductor.

La función de transferencia estimada que se desea obtener vendrá dada por la expresión (4.6) donde se han substituido la señal pulso a la entrada y la señal recogida por el hidrófono:

$$H_e(j\omega) = \frac{S1_{30}(j\omega)P1^*(j\omega)}{\left[|P1^2(j\omega)| + \lambda\right]} \quad (4.9)$$

Aplicando la optimización según el criterio del coeficiente de correlación cruzada normalizado, se obtiene que el valor óptimo para λ es de $\lambda_{opt}=2.65$, tal y como puede apreciarse en la figura 4.3. En la figura 4.4 se puede ver la respuesta impulsional del transductor estimada para λ_{opt} , así como el módulo de su transformada de Fourier en escala lineal.

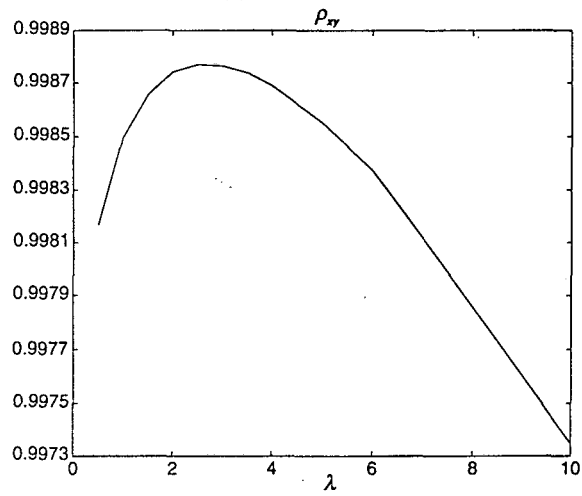


Fig. 4.3 Coeficiente de correlación cruzada normalizado para diferentes valores de λ , pudiendo apreciarse un máximo para $\lambda_{opt}=2.65$.

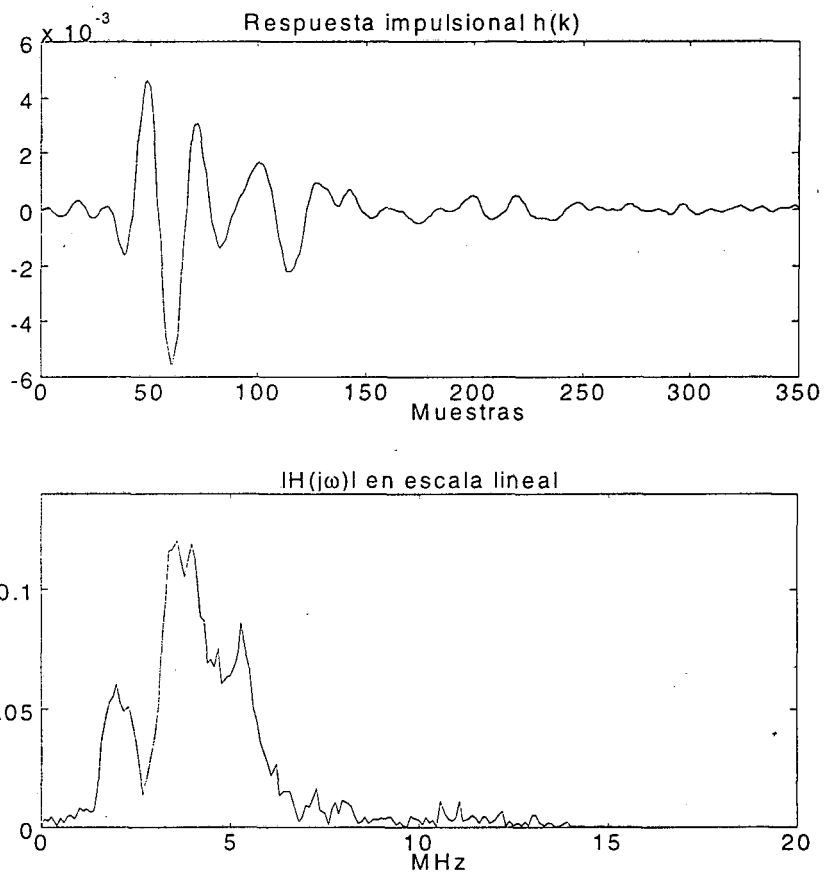


Fig. 4.4 Respuesta impulsional $h(k)$ del transductor y módulo de su transformada de Fourier.

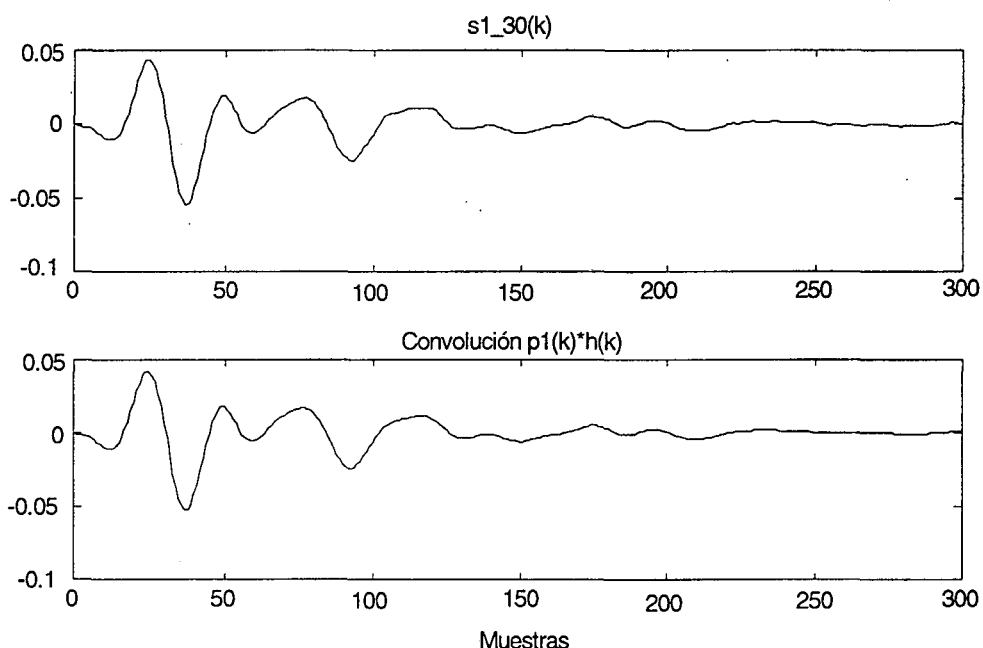


Fig. 4.5 Comparativa de la convolución $p1(k)*h(k)$ y la salida recogida por el hidrófono $s1_30(k)$.

En la figura 4.5 puede apreciarse gráficamente el parecido entre la convolución del pulso de excitación con la respuesta impulsional estimada, y la señal recogida por el hidrófono. Se puede observar que el parecido es muy grande, como se desprende del valor del coeficiente de correlación cruzada normalizado de la figura 4.3, cuyo valor es de $\rho_{xy}=0.99876$, muy próximo a la unidad.

Para reafirmar la validez de esta respuesta impulsional estimada, ésta se va a convolucionar con otro pulso de excitación, y se comparará el resultado de la convolución con la señal a la salida capturada por el hidrófono.

El nuevo pulso de excitación $p2(k)$ empleado, aparece representado en la figura 4.6, siendo completamente distinto al pulso $p1(k)$.

En la figura 4.7, aparece una comparativa entre la convolución antes mencionada y la señal medida, pudiendo apreciarse el gran parecido entre las dos señales, con un coeficiente de correlación cruzada normalizado de 0.9715, próximo también a la unidad.

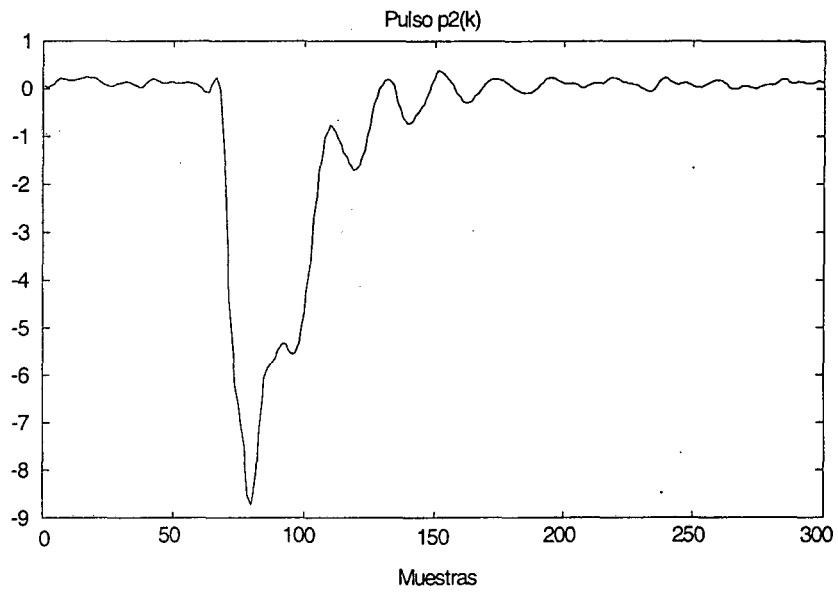


Fig. 4.6 Pulso $p2(k)$ utilizado como nueva excitación del transductor.

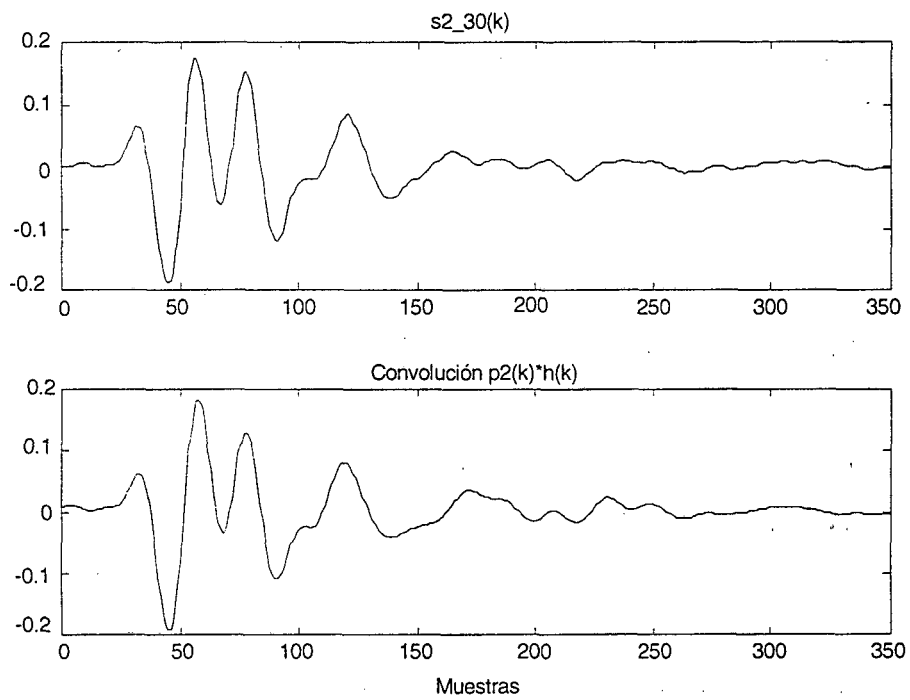


Fig. 4.7 Comparativa del pulso $p2(k)$ convolucionado con $h(k)$, y la señal medida $s2_30(k)$.

4.4 Variación de la respuesta impulsional con la distancia.

A la hora de caracterizar la respuesta impulsional de un transductor, hay que tener en cuenta su variación espacial, ya que la respuesta impulsional de un transductor de ultrasonidos presenta una dependencia espacial, además de una dependencia temporal. Esto implica que la respuesta impulsional caracterizada a una cierta distancia del transductor puede no ser válida a otras distancias.

Se puede estudiar su variación con la distancia al transductor, caracterizando la respuesta impulsional a una cierta distancia y comprobando su comportamiento a otras distancias.

En la figura 4.8 se muestran los valores que toma el coeficiente ρ_{xy} al utilizar la respuesta impulsional caracterizada a las distancias de 30, 12 y 5 cm, en un margen de distancias de 1 a 30 cm. De hecho, el experimento se realizó también con la respuesta impulsional caracterizada a 20 cm, pero no se incluye en la gráfica porque prácticamente presentaba el mismo comportamiento que la respuesta caracterizada a 30 cm, superponiéndose ambas gráficas.

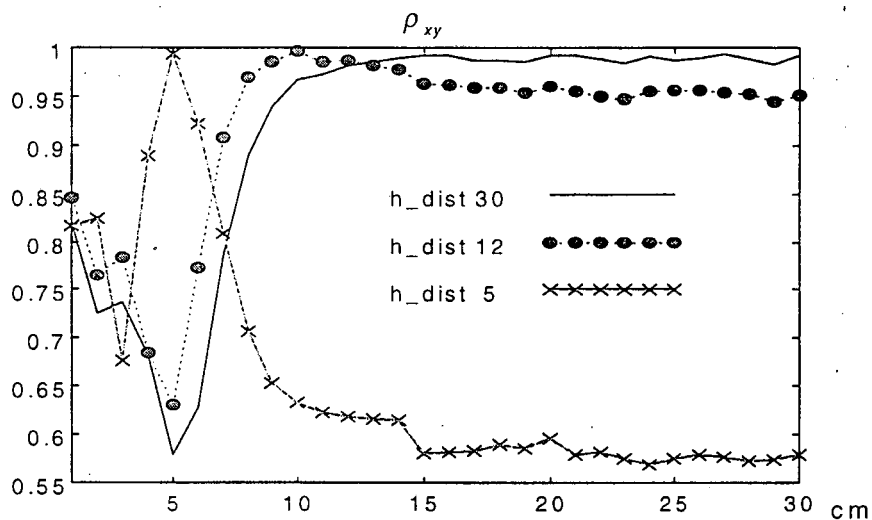


Fig. 4.8 Comportamiento de la respuesta impulsional del transductor en campo lejano, próximo, y en la frontera entre ambos.

Se puede observar que la respuesta impulsional caracterizada en campo lejano h_{dist30} proporciona muy buen resultado en dicho campo, mientras que para campo próximo, la respuesta impulsional se aleja del comportamiento deseado.

La respuesta impulsional caracterizada en campo próximo h_{dist5} presenta un buen comportamiento en un margen muy estrecho alrededor del valor de 5 cm, que es justamente la distancia a la que se ha caracterizado, mientras que para el resto de distancias, tanto en campo próximo como en campo lejano, su comportamiento se aleja del óptimo, como puede apreciarse en la disminución del coeficiente ρ_{xy} .

En cambio, se observa en la curva correspondiente a la respuesta impulsional caracterizada a una distancia de 12 cm, h_{dist12} , que proporciona resultados más o menos aceptables para un margen de distancias mayor. Esto se debe a que hemos caracterizado la respuesta impulsional a una distancia en la frontera entre campo lejano y próximo.

Por tanto, analizando la figura 4.8, se puede observar que, en campo lejano, la variación de la respuesta impulsional consiste prácticamente en una variación de amplitud, no de la forma de la señal. En cambio, en campo próximo, la variación de la respuesta impulsional con la distancia afecta tanto a la amplitud como a la forma de la señal, siendo crítico su empleo fuera de un margen muy estrecho alrededor de la distancia para la que ha sido diseñada.

De todo lo anterior se desprende que, en función de la aplicación que se esté realizando, se puede utilizar la respuesta impulsional calculada en cada punto, o utilizar una única respuesta impulsional para un cierto margen de distancias, sin tener grandes diferencias en los resultados, escogiendo adecuadamente la distancia a la cual calcular dicha respuesta. Estos resultados ya fueron adelantados en [TORM97b].

4.5 Caracterización de un nuevo transductor.

El transductor utilizado hasta ahora fue sustituido por otro de las mismas características, con el propósito de caracterizar un nuevo transductor, y observar las posibles semejanzas o diferencias entre ellos, pudiendo constatar ligeras diferencias entre una respuesta impulsional y otra, atribuibles en su mayor parte al proceso de montaje del transductor.

En la figura 4.9 están representados el pulso de excitación $p3(k)$ y la señal medida $s3_30(k)$ empleados en la caracterización de la respuesta impulsional $h2(k)$ del nuevo transductor. La señal $s3_30(k)$ se ha capturado con el hidrófono en campo lejano a una distancia del transductor de 30 cm. La respuesta impulsional de este nuevo transductor es la que aparece en la figura 4.10, donde se puede apreciar además el módulo de su transformada de Fourier.

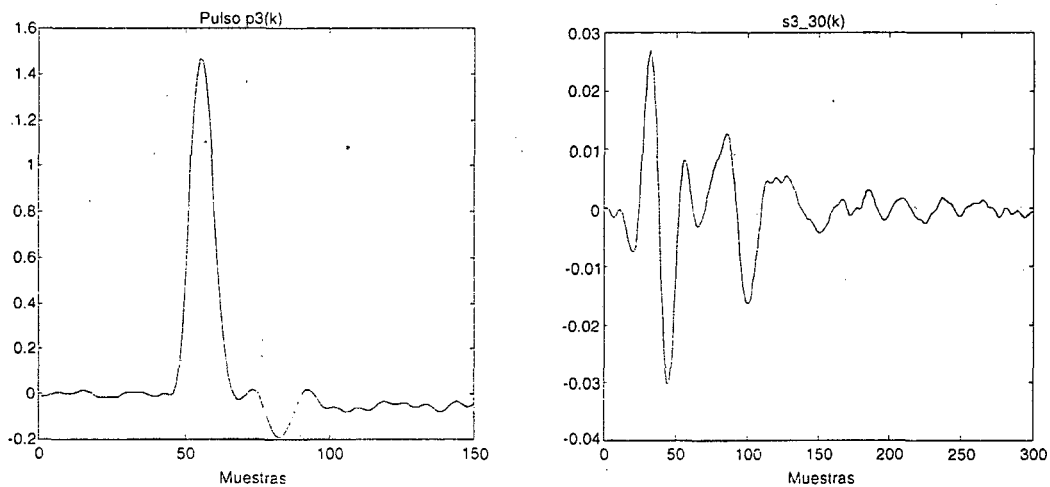


Fig. 4.9 Formas de onda del pulso de excitación para el nuevo transductor y señal capturada por el hidrófono a una distancia de 30 cm del transductor.

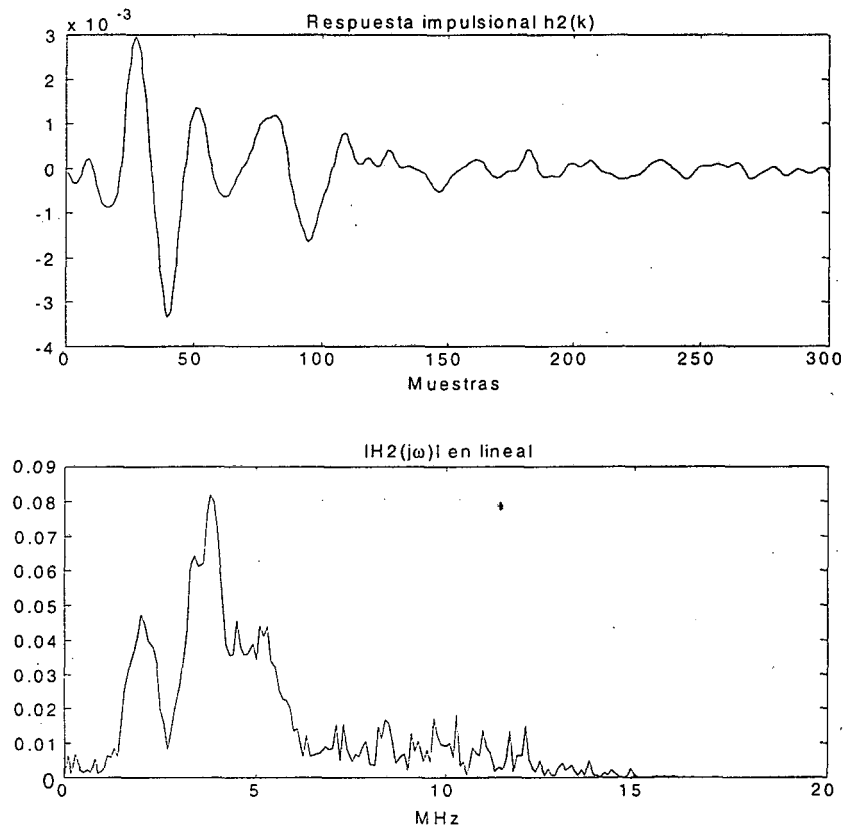


Fig. 4.10 Respuesta impulsional $h_2(k)$ del nuevo transductor y módulo de su transformada de Fourier.

En la figura 4.11 puede verse el parecido entre la convolución del pulso de excitación con la nueva respuesta impulsional, y la señal recogida por el hidrófono $s_3_{30}(k)$. El valor del coeficiente de correlación cruzada normalizado para estas señales es de $\rho_{xy} = 0.9995$.

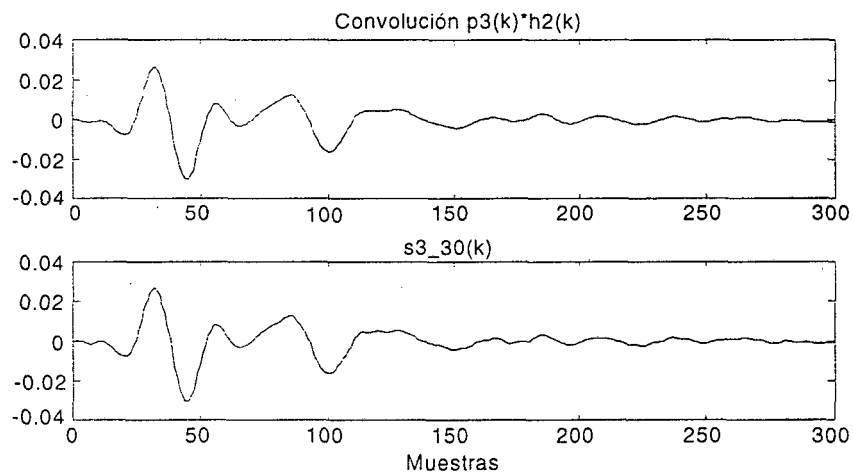


Fig. 4.11 Comparativa de la convolución $p_3(k) * h_2(k)$ y la salida recogida por el hidrófono $s_3_{30}(k)$.

4.6 La función inversa.

4.6.1 Obtención de la función inversa.

Como se ha comentado anteriormente, la utilización de la inversa de la respuesta impulsional como excitación del transductor es en principio el método más idóneo para conseguir una señal de gran resolución, teóricamente una delta.

La inversa de la respuesta impulsional del nuevo transductor bajo estudio, en el dominio frecuencial, debe cumplir la siguiente condición:

$$H2_inv(j\omega) = \frac{1}{H2(j\omega)} \quad (4.10)$$

donde $H2(j\omega)$, $H2_inv(j\omega)$ son las funciones de transferencia del transductor y de su inversa, respectivamente.

Esta función obviamente es imposible de realizar, porque requiere valores infinitos en los puntos donde $H2(j\omega)=0$. Por tanto, lo mejor que podemos realizar es una función que actúe como ecualizador.

Una manera de realizar esto, por supuesto, consiste en limitar frecuencialmente la función $H2(j\omega)$ del transductor [KINO87], procedimiento ya visto en el capítulo 2. Si $H2(j\omega)$ es finita y distinta de cero en un rango de frecuencias $\omega_1 < \omega < \omega_2$, podemos considerar como función inversa aquella que cumple que

$$H2_inv(j\omega) = \begin{cases} \frac{1}{H2(j\omega)} & ,si \ \omega \in (\omega_1, \omega_2) \\ 0 & ,si \ \omega \notin (\omega_1, \omega_2) \end{cases} \quad (4.11)$$

Esta función inversa puede aplicarse como excitación al transductor si se sintetiza mediante un generador de forma de onda programable. Pero antes de sintetizar esta forma de onda, tenemos que tener en cuenta las limitaciones del generador utilizado, HP 33120A, el cual únicamente puede trabajar con formas de onda arbitrarias de frecuencia máxima 5 MHz, ver apéndice C.

Por tanto, teniendo en cuenta estas limitaciones, el intervalo frecuencial (ω_1, ω_2) que vamos a considerar es el comprendido entre 0 y 5 MHz. La función inversa así obtenida se muestra en la figura 4.12, junto con el módulo de su transformada de Fourier.

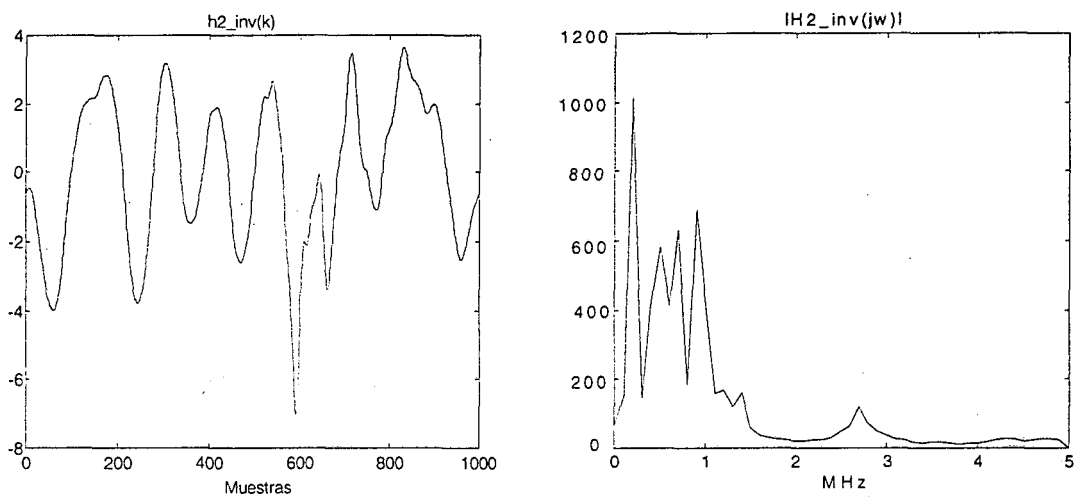


Fig. 4.12 Forma de onda de la inversa de la respuesta impulsional del transductor y módulo de su transformada de Fourier.

En la figura 4.13 se muestra el resultado de la convolución, realizada mediante simulación, de la respuesta impulsional con su función inversa, esto es, $h_2(k) * h_{2_inv}(k)$, obteniendo efectivamente un pico perfectamente definido.

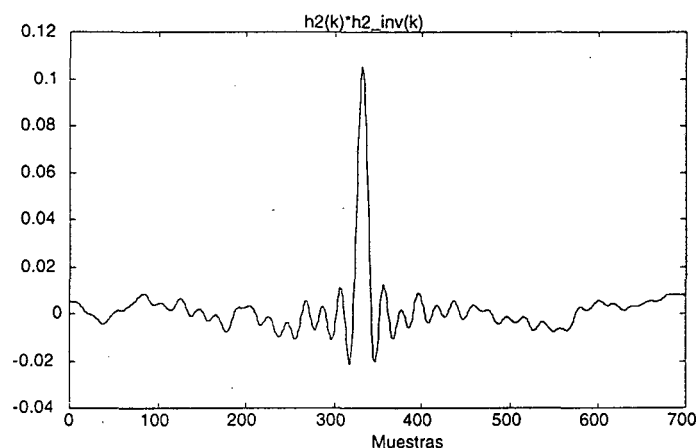


Fig. 4.13 Convolución obtenida por simulación de la respuesta impulsional del transductor con su función inversa.

4.6.2 Aplicación de la función inversa como excitación.

Una vez calculada la función inversa, podemos proceder a cargarla en el generador de forma de onda programable utilizando un sencillo programa realizado en QuickBasic, transfiriendo la forma de onda mediante una línea RS-232 conectada entre el PC y el generador [TORM97a].

Cargada la forma de onda, se excita el transductor con ella y se recoge la señal capturada con el hidrófono posicionado a una distancia de 30 cm del transductor. El resultado es el que aparece en la figura 4.14.

Puede verse que esta señal no coincide con la señal teórica mostrada en la figura 4.13, debido principalmente a problemas de desadaptación de impedancias. Al conectar la salida del generador a la entrada del transductor, no se estaba considerando que la impedancia de salida del generador, de 50Ω , es mucho mayor que la impedancia de entrada del transductor, de 4Ω , a la frecuencia de trabajo.

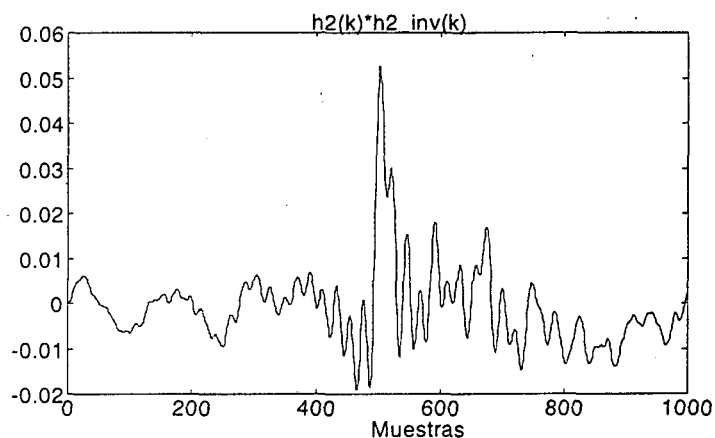


Fig. 4.14 Señal captada por el hidrófono posicionado a una distancia de 30 cm del transductor cuando éste ha sido excitado con la inversa de su respuesta impulsional, señal $h2_inv(k)$.

4.6.3 Adaptación de impedancias entre el generador y el transductor.

Debido a la baja impedancia de entrada que presenta el transductor de ultrasonidos a la frecuencia de 4 MHz, es necesario utilizar un circuito de adaptación, como el que aparece en la figura 4.15.

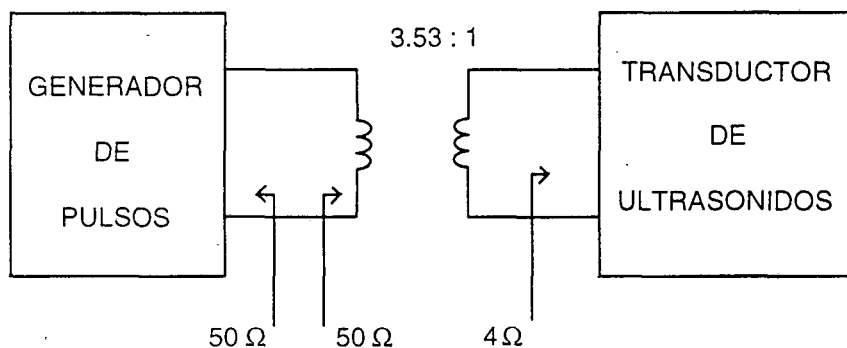


Fig. 4.15 Esquema de la red de adaptación utilizada para adaptar la impedancia de salida del generador de funciones arbitrarias y la impedancia de entrada del transductor.

4.6.4 Excitación con la función inversa empleando la red de adaptación.

Utilizando la red de adaptación de la figura 4.15, se excita de nuevo el transductor con la inversa de su respuesta impulsional, $h2_inv(k)$, que fue encontrada en el apartado 4.6.1.

Como puede apreciarse en la figura 4.16, la señal recogida ahora por el hidrófono sí presenta un pico bien marcado, tal y como era de esperar a partir de los resultados teóricos.

Sin embargo, al conectar la red de adaptación, se está modificando en cierta forma el montaje inicial, al no comportarse la red de adaptación como un transformador ideal. A continuación se va a considerar el conjunto transformador-transductor como un único sistema, se calculará su respuesta impulsional, se obtendrá su función inversa, y finalmente será utilizada como excitación del conjunto mediante el uso del generador de formas de onda programable.

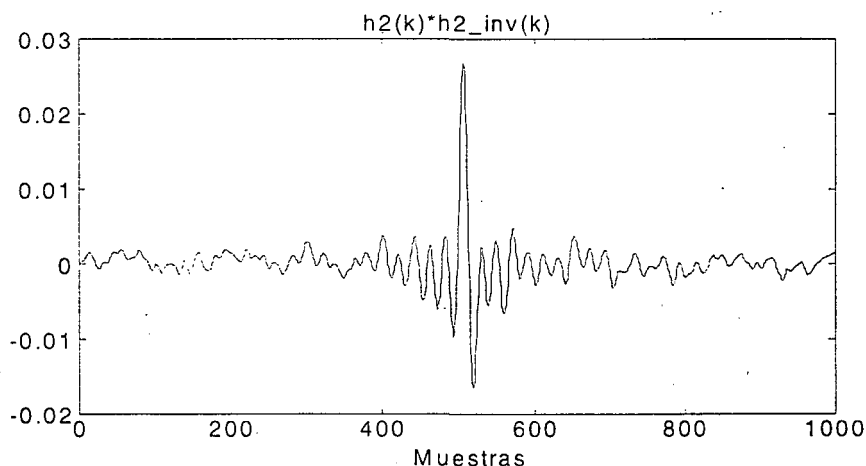


Fig. 4.16 Resultado de excitar el transductor con la inversa de su respuesta impulsional, utilizando una red de adaptación de impedancias. La señal se ha medido a una distancia de 30 cm del transductor.

4.6.5 Respuesta impulsional del conjunto transformador-transductor.

Considérese ahora el sistema de la figura 4.17, donde puede apreciarse que la respuesta impulsional $h_{total}(k)$ hace referencia al conjunto transformador-transductor.

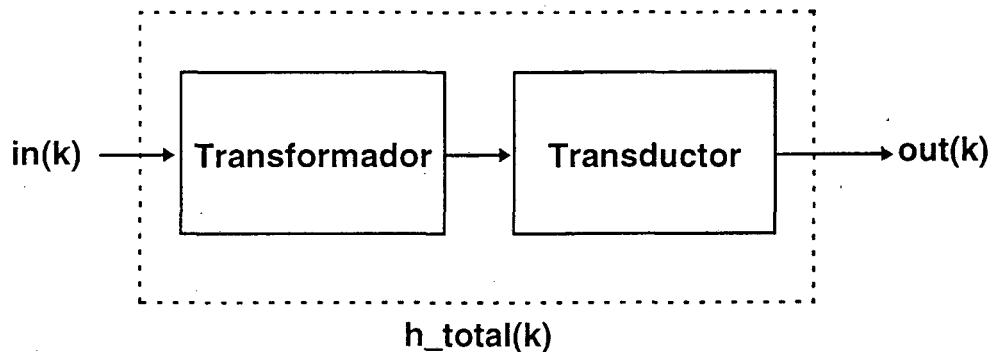


Fig. 4.17 Sistema formado por el conjunto transformador-transductor, con respuesta impulsional $h_{total}(k)$.

Por tanto, nuestro objetivo ahora es caracterizar esta nueva respuesta impulsional, para posteriormente encontrar la expresión de su inversa y utilizarla como excitación de nuestro sistema. El proceso seguido en la caracterización de la respuesta impulsional $h_{total}(k)$, es el mismo que ya fue visto en el apartado 4.3.

La respuesta impulsional $h_{total}(k)$ es la que se muestra en la figura 4.18, donde también se representa el módulo de su transformada de Fourier.

Una vez encontrada la respuesta impulsional $h_{total}(k)$, el siguiente paso es obtener su inversa para poder aplicarla como excitación de nuestro sistema, empleando para ello el generador de formas de onda programable.

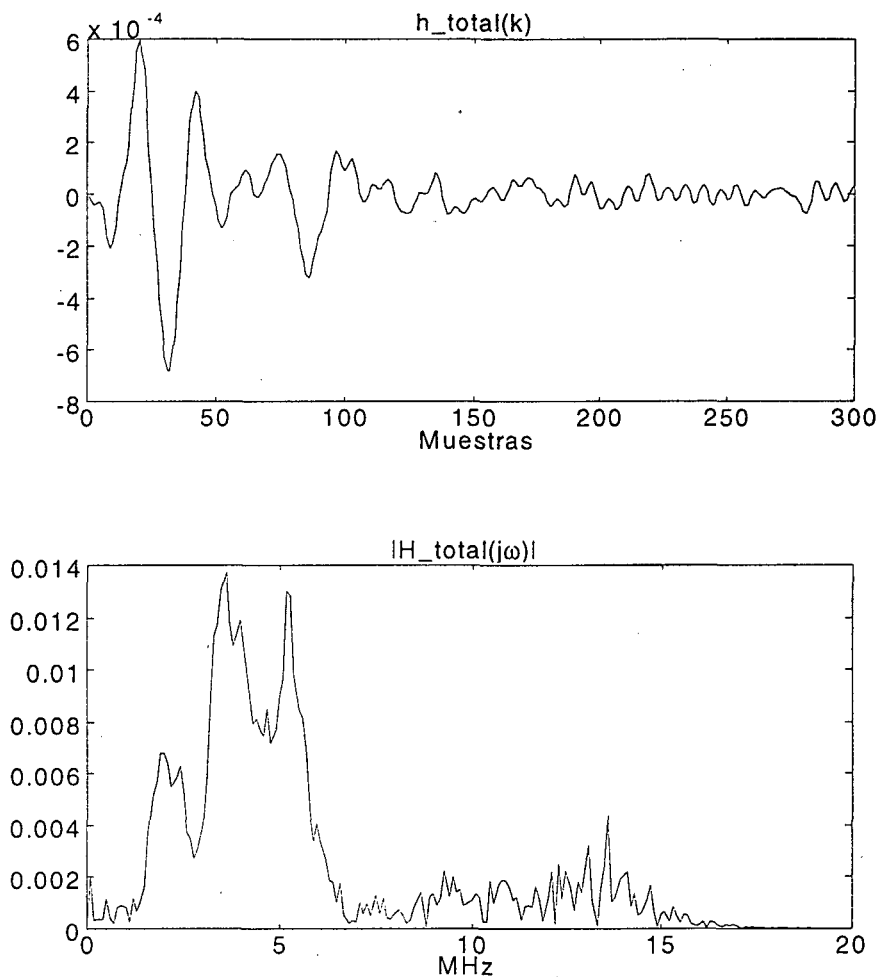


Fig. 4.18 Respuesta impulsional $h_total(k)$ del conjunto transformador-transductor y módulo de su transformada de Fourier.

4.6.6 Obtención de la función inversa del conjunto transformador-transductor.

Una vez más, para obtener la función inversa de la respuesta impulsional $h_total(k)$, se deberá tener en cuenta las limitaciones del generador de funciones de formas de onda programables, comentadas anteriormente, así como la condición dada por la expresión (4.11). Como ya se hizo en anteriores apartados, el intervalo de frecuencias que se va a considerar para el cálculo de la función inversa es aquél que comprende las

frecuencias de 0 a 5 MHz. Con estas restricciones, la función inversa $h_{total_inv}(k)$ obtenida se muestra en la figura 4.19, junto con el módulo de su transformada de Fourier.

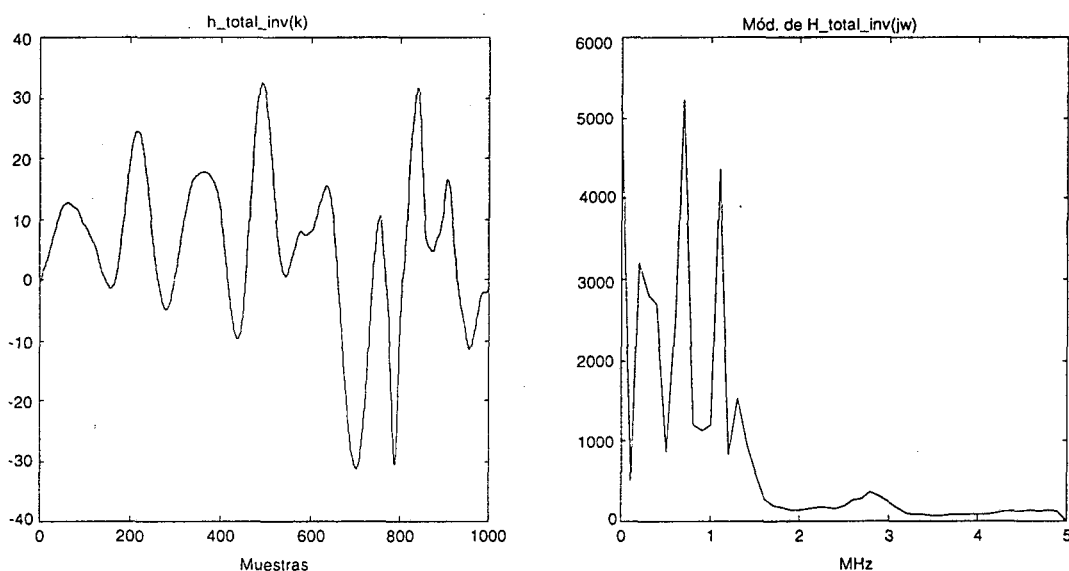


Fig. 4.19 Inversa de la respuesta impulsional del conjunto transformador-transductor, y módulo de su transformada de Fourier.

En la figura 4.20 se muestra el valor de la convolución $h_{total}(k)*h_{total_inv}(k)$ recogida por el hidrófono a una distancia de 30 cm del transductor. Se puede apreciar como ahora la señal presenta una mayor concentración de energía alrededor de su máxima amplitud que en el caso de no considerar el conjunto transformador-transductor.

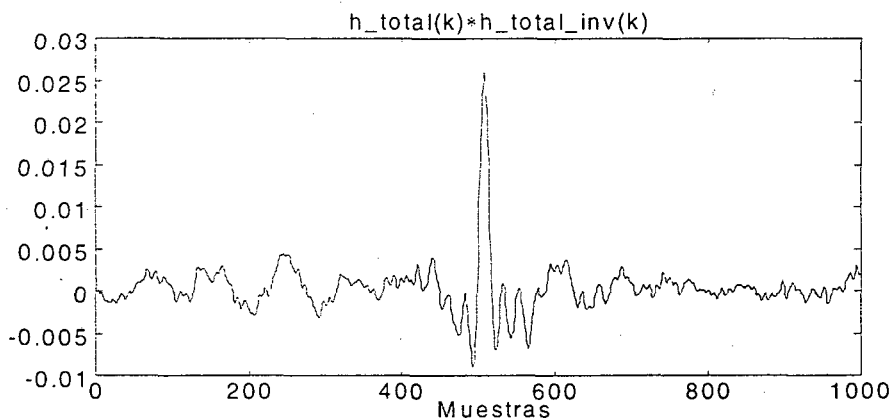


Fig. 4.20 Convolución $h_{total}(k)*h_{total_inv}(k)$ recogida por el hidrófono a una distancia de 30 cm del transductor.

4.7 Comportamiento con la distancia al transductor de la función inversa.

Como ya se ha visto en este mismo capítulo, la respuesta impulsional del transductor varía con la distancia al mismo. Por tanto, resulta evidente que se van a obtener distintas inversas en función de la distancia con respecto al transductor a la que estén calculando esas funciones. Una vez más, se debe distinguir entre la función inversa de una respuesta impulsional obtenida en campo lejano y en campo próximo.

En los siguientes apartados, se estudia el comportamiento con la distancia cuando se excita el transductor con una función inversa obtenida en campo lejano, y otra función inversa obtenida en campo próximo, utilizando ambas excitaciones para realizar medidas tanto en campo próximo como en campo lejano.

4.7.1 Comportamiento de la función inversa obtenida en campo lejano.

Para estudiar el comportamiento de una función inversa obtenida en campo lejano al emplearla como excitación, tanto en campo próximo como en campo lejano, vamos a considerar la función inversa de la respuesta impulsional del conjunto transformador-transductor caracterizada a una distancia de 30 cm. Esta función inversa es la que se ha empleado en apartados anteriores, y cuya forma de onda se muestra en la figura 4.19.

En la figura 4.21 se muestran las señales recogidas por el hidrófono a las distancias de 30, 20, 12, 5 y 3 cm del transductor, que se corresponden a las diferentes convoluciones entre la función inversa calculada en campo lejano, con las respuestas impulsionales del conjunto transformador-transductor a esas distancias.

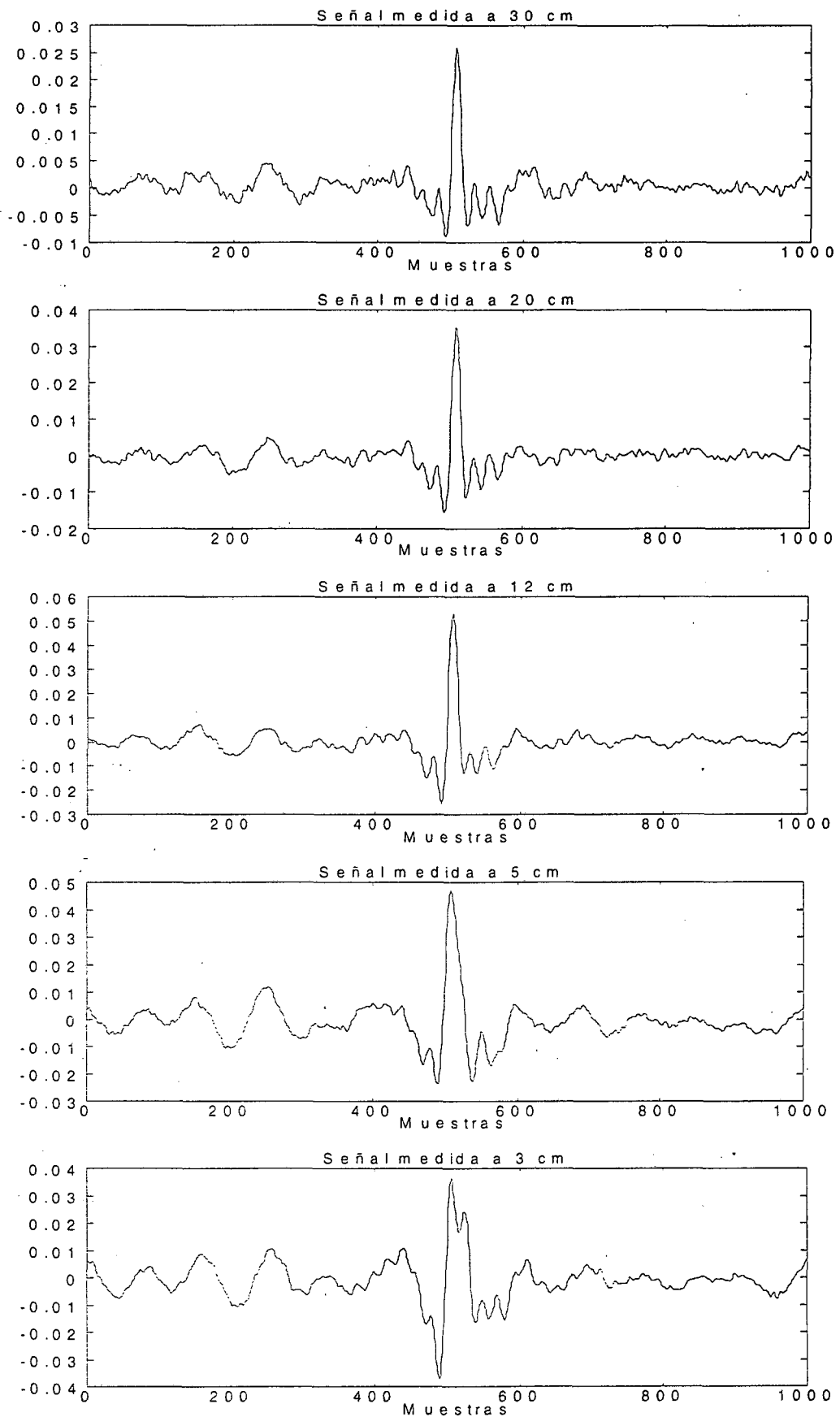


Fig. 4.21 Señales recogidas por el hidrófono a diferentes distancias, empleando como excitación la función inversa obtenida en campo lejano a una distancia de 30 cm del transductor.

Si nos fijamos en las medidas hechas en campo lejano, podemos ver que hay una cierta uniformidad en los resultados, es decir, que las señales medidas presentan un gran parecido, siendo todas ellas señales capaces de proporcionar una gran resolución, al ser fácilmente discriminables. Esto es lógico, ya que como se ha visto en apartados anteriores, la respuesta impulsional del transductor en campo lejano conserva prácticamente la forma de onda, presentando únicamente diferencias en cuanto a amplitud.

Sin embargo, en campo próximo, las señales medidas, además de proporcionar una resolución menor, no conservan la uniformidad comentada anteriormente, debido a que la respuesta impulsional del transductor en campo próximo no conserva la forma de onda en todo el margen de campo próximo. Puede verse en la figura 4.21 como la medida efectuada a una distancia de 5 cm presenta mejor resultado que la efectuada a 3 cm, debido seguramente a que la respuesta impulsional del conjunto transformador-transductor caracterizada a 30 cm presenta un parecido mayor con la respuesta impulsional del transductor a 5 cm, que a 3 cm.

4.7.2 Comportamiento de la función inversa obtenida en campo próximo.

Para estudiar el comportamiento de la función inversa obtenida en campo próximo, emplearemos dos funciones inversas obtenidas a las distancias de 5 y 3 cm. El motivo de esto es que, como se ha visto anteriormente, el transductor no responde por igual en todo el margen de campo próximo.

Lógicamente, el primer paso que hay que realizar es caracterizar la respuesta del transductor a 5 y 3 cm, para posteriormente encontrar sus respectivas inversas.

En la figura 4.22 aparecen la respuesta impulsional del transductor y su función inversa respectivamente, caracterizadas a una distancia de 5 cm del transductor, junto con los módulos de sus respectivas transformadas de Fourier.

En la figura 4.23, podemos ver la respuesta impulsional y su función inversa respectivamente, caracterizadas a una distancia de 3 cm, junto con los módulos de sus transformadas de Fourier.

En las figuras 4.24 y 4.25 se muestran las señales recogidas por el hidrófono a diferentes distancias, tanto en campo próximo como en campo lejano, al utilizar como excitación las funciones inversas a 5 y 3 cm, respectivamente.

Si se hace una comparativa entre la utilización de una función inversa caracterizada en campo lejano y otra caracterizada en campo próximo, se puede observar que la utilización en campo lejano de una función inversa caracterizada en campo lejano proporciona un excelente resultado desde el punto de vista de resolución, obteniendo ecos de duración (anchura de lóbulo) inferior a 25 muestras (250 ns), en comparación con las aproximadamente 200 muestras (2 μ s) que presenta la señal original captada por el hidrófono cuando no se está aplicando ningún método de reducción de la duración del pulso. En cambio, al emplearla en campo próximo, los resultados obtenidos no son tan buenos, llegando incluso a valores similares a los de la señal original dependiendo de la distancia a la que se emplee. Además, se observa que se obtienen distintos resultados al emplear esta excitación en el margen de campo próximo.

Sin embargo, si se emplea tanto en campo lejano como próximo la función inversa caracterizada en campo próximo, se obtienen pulsos de unas 35 muestras de duración (350 ns) en el peor de los casos, tanto en campo próximo como lejano. Además, escogiendo adecuadamente la distancia en campo próximo a la que caracterizar la función inversa, se pueden obtener resultados de aproximadamente 25-30 muestras (250-300 ns) en todo el margen de distancias.

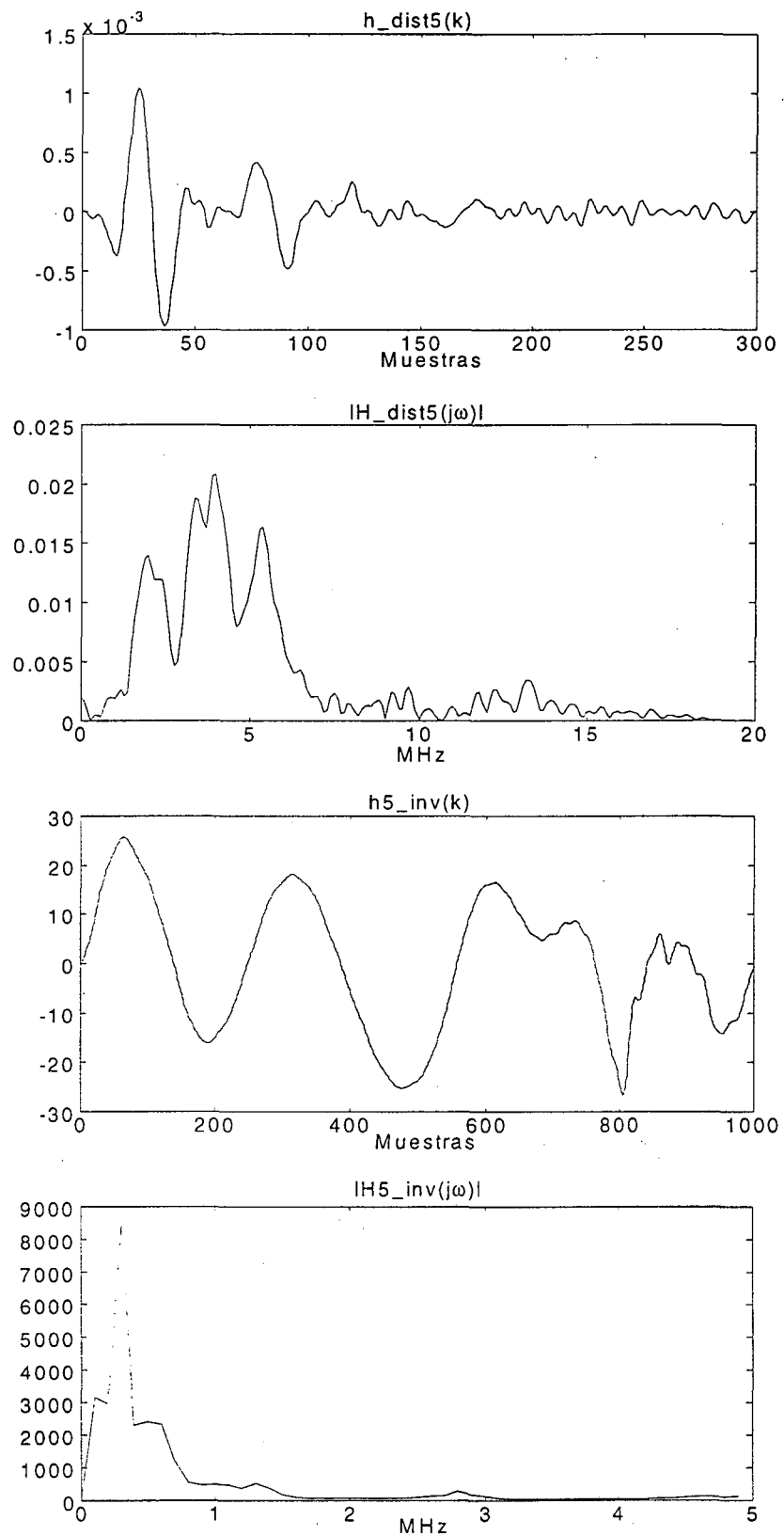


Fig. 4.22 Caracterización de la respuesta impulsional del conjunto transformador-transductor a una distancia de 5 cm del transductor, la inversa de su respuesta impulsional y sus módulos de sus respectivas transformadas de Fourier.

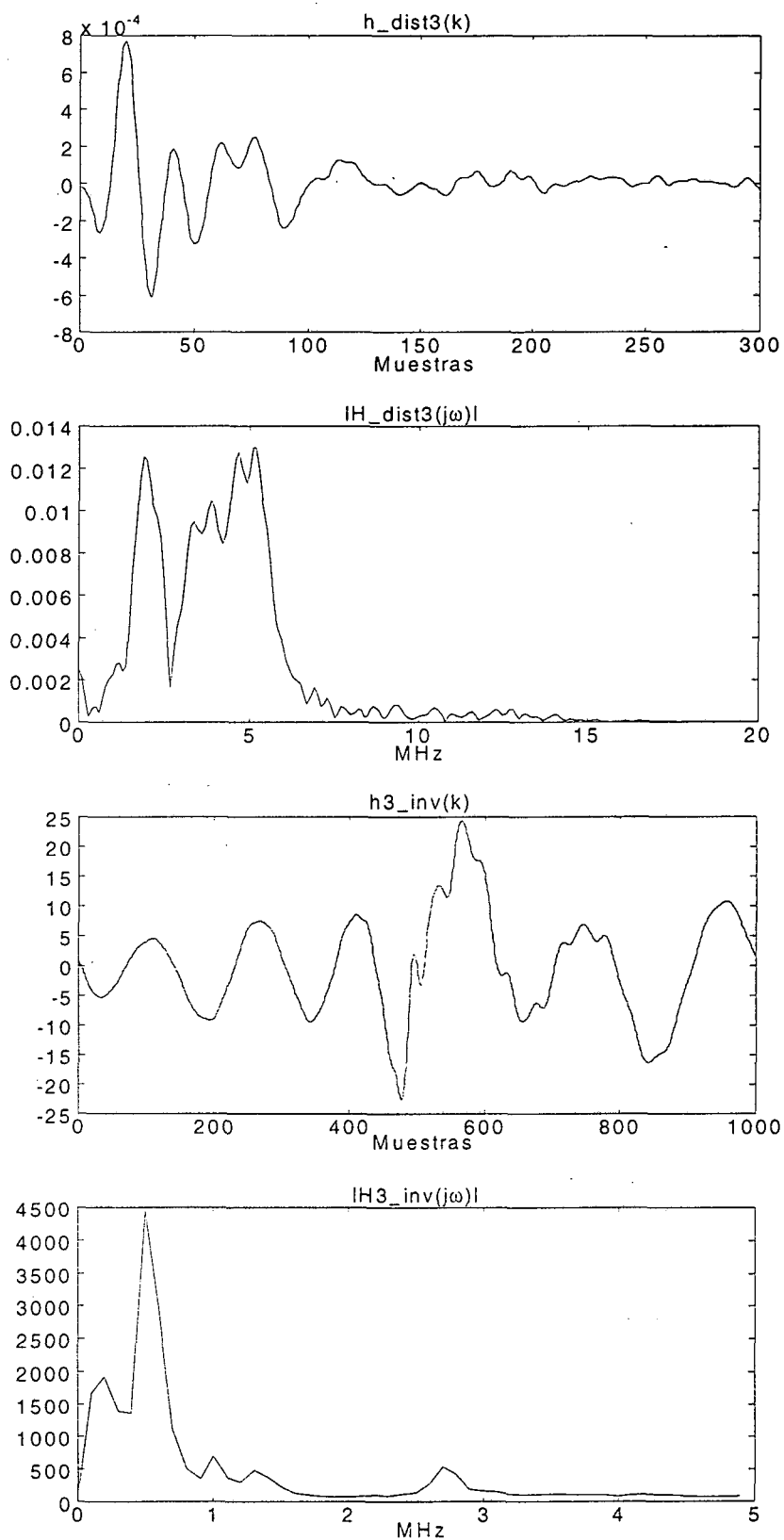


Fig. 4.23 Caracterización de la respuesta impulsional del conjunto transformador-transductor a una distancia de 3 cm del transductor, la inversa de su respuesta impulsional y sus módulos de sus respectivas transformadas de Fourier.

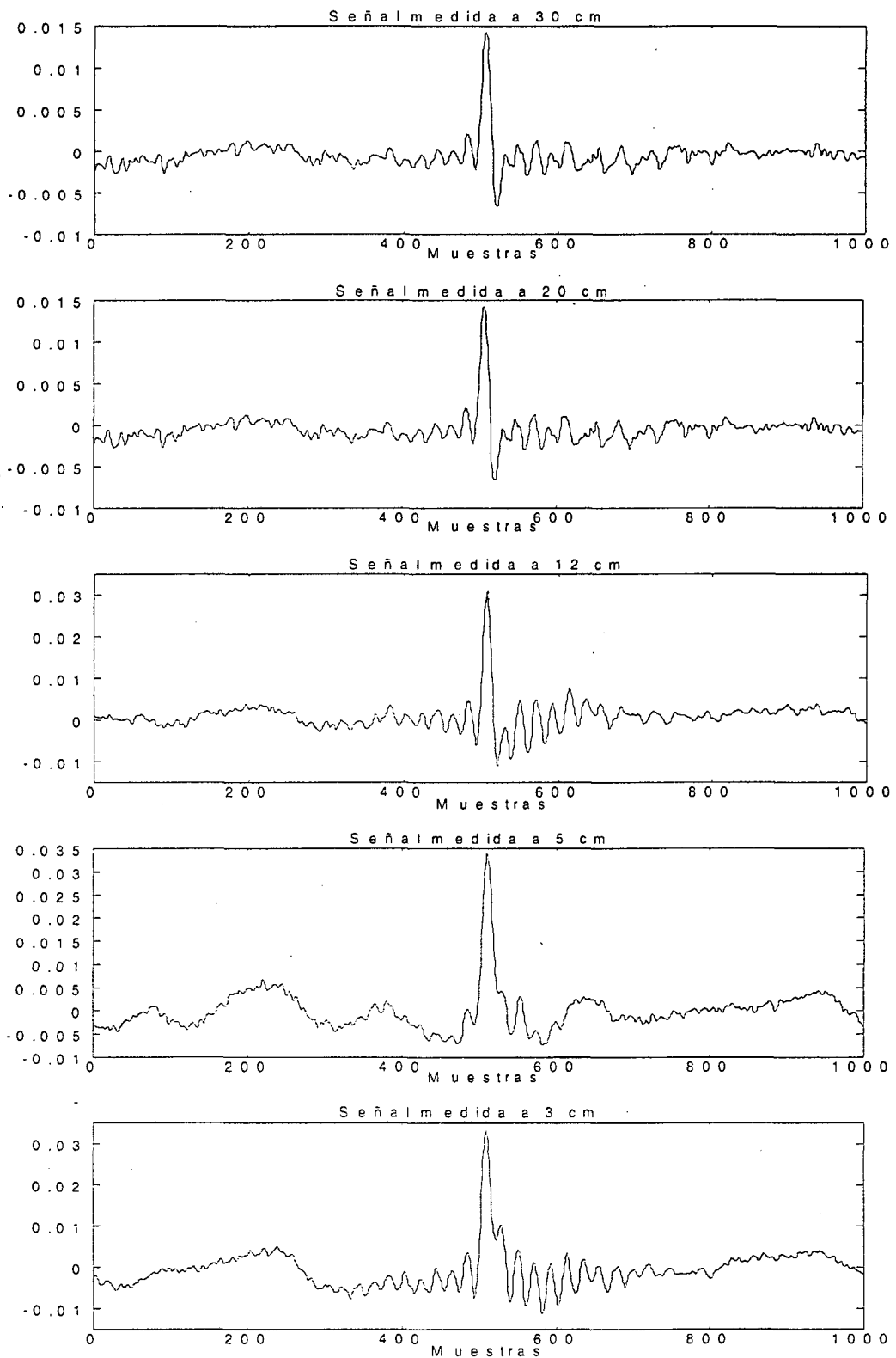


Fig. 4.24 Señales recogidas por el hidrófono a diferentes distancias, empleando como excitación la función inversa obtenida en campo próximo a una distancia de 5 cm del transductor.

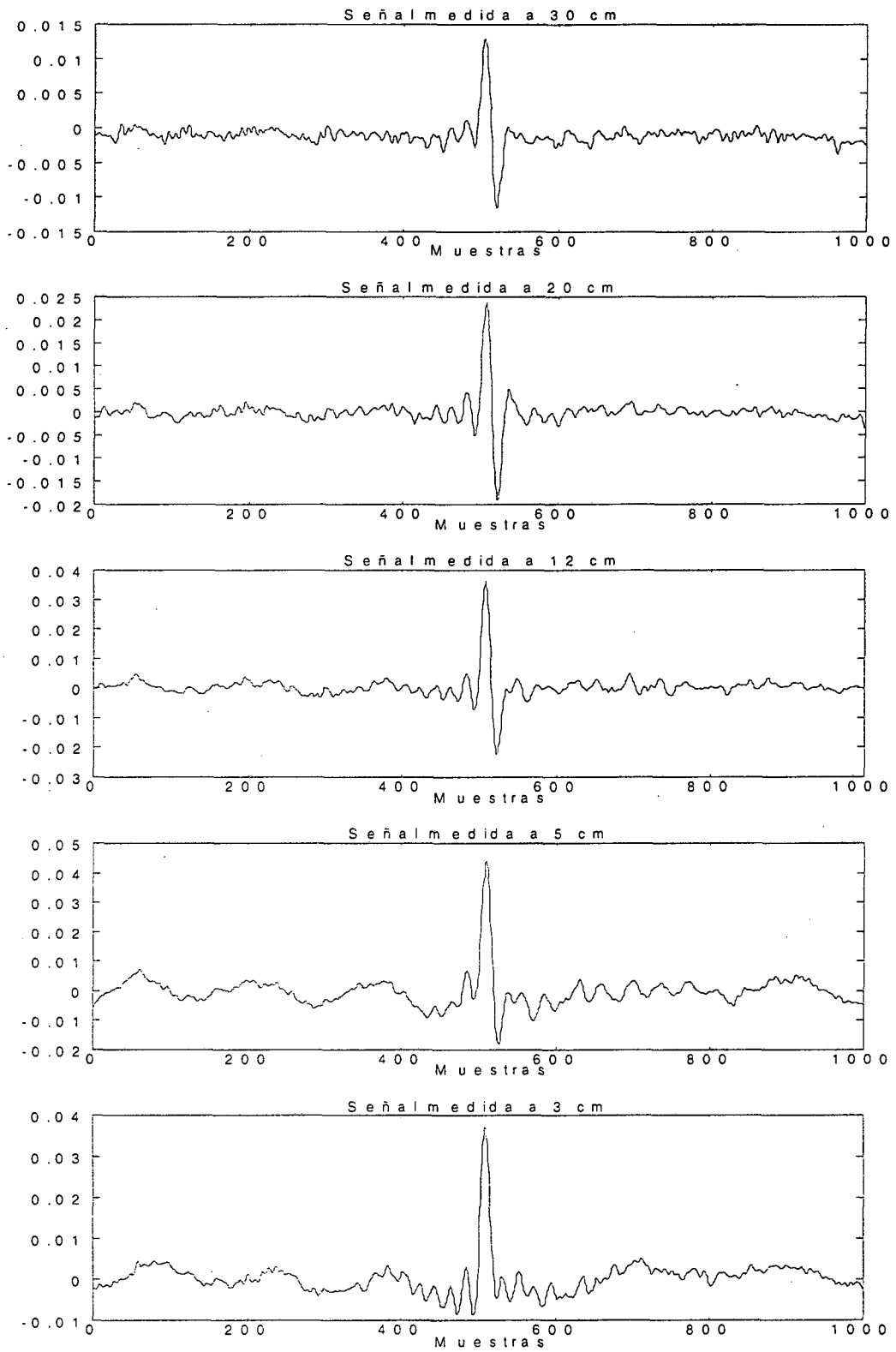


Fig. 4.25. Señales recogidas por el hidrófono a diferentes distancias, empleando como excitación la función inversa obtenida en campo próximo a una distancia de 3 cm del transductor.

4.8 Valoración de los resultados obtenidos.

En el apartado anterior se hizo una rápida valoración de los resultados obtenidos en función de la distancia al transductor cuando a éste se le aplicaba una excitación específica para campo lejano (para 30 cm) y dos excitaciones específicas para campo próximo (para 5 y 3 cm). El pulso obtenido presentaba a simple vista una duración mucho menor que la obtenida con la técnica de cancelación por pulso. Sin embargo, se hace difícil distinguir de entre ellas (figuras 4.21, 4.24 y 4.25) cuál es la mejor. Como ocurrió en el capítulo anterior al justificar la introducción de los factores de mérito, será necesario tener en cuenta más de un parámetro al hacer la valoración y no exclusivamente uno de ellos, en este caso la duración de la señal tomada como el ancho del lóbulo principal del pulso.

Se utilizará el criterio de la caída de amplitud a -6 dB en el pulso para determinar su duración, criterio que es también utilizado en los sistemas radar. Como la calidad en la medida no depende exclusivamente de un pulso de corta duración sino también de la cola emitida, se evaluará la energía relativa del pulso, E_{pulso} , definida como el cociente entre la energía contenida en el pulso, $E_{-6\text{ dB}}$, y la energía de toda la señal, E_{tot} .

Idealmente, toda la energía debería estar confinada en un pulso muy estrecho. El criterio de calidad que se tomará estará definido como la relación entre la energía relativa del pulso, E_{pulso} y su duración $T_{-6\text{ dB}}$. Cuanto más alto sea el valor de esta relación, mejor será la calidad de la medida realizada.

En la tabla 4.1 aparecen los valores relativos a cada uno de los parámetros definidos para las señales de las figuras 4.21, 4.24 y 4.25. La tabla agrupa a tres subtablas. Cada una de ellas se corresponde con los resultados de una de las figuras. En la primera columna y en negrita se indica el tipo de excitación que se está utilizando en el transductor. Así, *hinv_30* indica que en esa subtabla aparecen los valores resultado de excitar el transductor con la excitación específica para campo lejano (distancia 30 cm). Las filas, nombradas como *dist_30*, *dist_20*, *dist_12*, *dist_5* y *dist_3* contienen los

resultados para los pulsos medidos a las distancias de 30, 20, 12, 5 y 3 cm, respectivamente.

<i>hinv_30</i>	$T_{-6\text{ dB}}$	$E_{\text{pulso}}=E_{-6\text{ dB}}/E_{\text{tot}}$	$E_{\text{pulso}}/T_{-6\text{ dB}} (10^6)$
<i>dist_30</i>	120 ns	0.575	4.79
<i>dist_20</i>	120 ns	0.571	4.27
<i>dist_12</i>	120 ns	0.57	4.13
<i>dist_5</i>	180 ns	0.42	2.26
<i>dist_3</i>	280 ns	0.36	1.28
<i>hinv_5</i>			
<i>dist_30</i>	120 ns	0.518	4.32
<i>dist_20</i>	120 ns	0.518	4.32
<i>dist_12</i>	120 ns	0.553	4.61
<i>dist_5</i>	160 ns	0.559	3.49
<i>dist_3</i>	140 ns	0.44	3.14
<i>hinv_3</i>			
<i>dist_30</i>	120 ns	0.398	3.31
<i>dist_20</i>	120 ns	0.396	3.3
<i>dist_12</i>	120 ns	0.448	3.73
<i>dist_5</i>	160 ns	0.393	3.02
<i>dist_3</i>	120 ns	0.665	5.54

Tabla 4.1 Duración, energía relativa del pulso y relación entre la energía relativa y la duración del pulso.

Primero, se aprecia que el cociente $E_{\text{pulso}}/T_{-6\text{ dB}}$ toma su valor máximo, lógicamente, en aquella distancia a la que se ha calculado la respuesta inversa, excepto en el caso en que se está excitando al transductor con la respuesta inversa calculada a la distancia de 5 cm. Esta anomalía se atribuye al valor excesivo detectado en la medida de $T_{-6\text{ dB}}$ en la excitación específica a la distancia de 5 cm.

Si se considera únicamente la duración del pulso, $T_{-6\text{ dB}}$, se aprecia que en la mayoría de los casos ésta es del orden de 120 ns ($\lambda/2$) que comparada con la de la señal

original que aparece en la figura 4.2, unos 2 μ s, representa una reducción en la duración del pulso de un factor 16.

Cuando se utiliza la excitación específica para campo lejano, *hinv_30*, se obtienen valores altos de la relación $E_{pulso}/T_{-6\text{ dB}}$ para aquellos puntos situados en campo lejano y en la frontera entre el campo lejano y próximo. Sin embargo, el valor de $E_{pulso}/T_{-6\text{ dB}}$ es muy bajo en los puntos situados en campo próximo.

Al utilizar la excitación específica para campo próximo a una distancia de 3 cm del transductor, *hinv_3*, los valores de $E_{pulso}/T_{-6\text{ dB}}$ son muy similares para puntos fuera de la distancia de 3 cm sin que se distinga entre campo próximo y campo lejano. El valor máximo se sitúa, como ya se ha mencionado, en el punto de distancia 3 cm.

Si se comparan ahora los resultados proporcionados por las distintas subtablas, por ejemplo *hinv_30* y *hinv_3*, se observa que una excitación sintetizada a partir de un punto en campo próximo se comporta mejor en todo el margen de distancias que una excitación sintetizada a partir de un punto en campo lejano. Una posible interpretación de este resultado se fundamentaría en la distinta atenuación sufrida por las distintas componentes frecuenciales que contiene la excitación específica. Así, en campo lejano, fuera de lo que es la frecuencia de resonancia del transductor, la excitación específica debe compensar más aquellas frecuencias por debajo de la frecuencia propia de resonancia del transductor. En campo próximo estas frecuencias no se han extinguido todavía y una sobreexcitación de las mismas provoca el comportamiento en baja frecuencia detectado en la figura 4.21 para las señales medidas a 5 y 3 cm. Con una excitación específica para campo próximo, no existe sobreexcitación de frecuencias aunque tampoco se llega a compensar completamente la respuesta en frecuencia del transductor en campo lejano, figuras 4.24 y 4.25 para señales medidas en campo lejano.

4.9 Comparación de resultados con la técnica de cancelación por pulso.

Una vez visto el principio de funcionamiento y los resultados proporcionados por las técnicas de excitación específica y de cancelación por pulso, cabría preguntarse cuál es la mejor. Obviamente dependerá de lo que se entienda por mejor. Si en lo que se está interesado es en obtener una señal emitida/recibida lo más corta posible evidentemente en este caso nos vamos a decantar por la utilización de excitaciones específicas.

Existirán también aplicaciones en las cuales el requerimiento de resolución en la medida pueda obtenerse utilizando otros métodos de acortamiento de la duración del pulso emitido/recibido. Es en este tipo de aplicaciones donde la técnica de cancelación por pulso puede resultar muy atractiva.

En cuanto a resolución, la técnica de excitación específica ha resultado ser muy superior a la de cancelación por pulso. Con esta última, en términos de λ se obtienen pulsos con duración de 3.5λ en el caso de estudio 2 (agua) visto en el capítulo anterior y bastante superiores en el caso de estudio 3 (aire). Por contra, en [SALA96] se consiguió una duración entre λ y 1.5λ en el pulso emitido.

Esta disparidad en resultados tiene su lógica debido precisamente a que la técnica de cancelación por pulso fundamenta su éxito en la forma de la envolvente del pulso al que se quiere aplicar la cancelación. Luego será difícil, en este sentido, establecer una cota en la resolución máxima obtenida con la técnica de cancelación por pulso.

Sin embargo, la técnica de cancelación por pulso posee muchas más ventajas que la técnica de excitación específica, como pueda ser su baja dificultad técnica en su implementación y su bajo coste. Además, como se verá en este apartado, la técnica de cancelación por pulso es mucho menos sensible a la distancia a la cual se está efectuando la medida que la técnica de excitación específica.

En el apartado de dificultades técnicas se compara el proceso de obtención de la excitación específica con el de obtener los parámetros del segundo pulso utilizado para la cancelación. Claramente, el proceso de caracterización de varias respuestas impulsionales del transductor a distintas distancias y la síntesis final de la inversa de la respuesta impulsional con las limitaciones impuestas de ancho de banda finito es tarea mucho más compleja que la simple captura de un pulso de ultrasonidos para a partir de él y mediante el uso de una ecuación se determine el valor de los parámetros básicos del segundo pulso de cancelación.

En cuanto a coste de los equipos, un sistema simple de medida por ultrasonidos basado en excitación específica va a estar formado como mínimo por una memoria EPROM, donde estará almacenada la excitación específica, un registro de desplazamiento que permita ir leyendo la información contenida en la memoria, un conversor D/A y un amplificador de potencia. En cambio, la técnica de cancelación por pulso puede llevarse a cabo con los circuitos mostrados en las figuras B.1 y B.4 del apéndice B, formados por dos transistores, dos diodos y unas cuantas resistencias, condensadores y puertas lógicas.

Un estudio que no fue realizado en el capítulo anterior y que se ha creído conveniente hacer ahora, es el que hace referencia a la dependencia con la distancia de la técnica de cancelación de pulsos. El experimento que se realizará a continuación consistirá en ajustar los parámetros T_d y α en campo lejano midiendo el pulso recibido a diferentes distancias, comprobando en cada momento si la cancelación sigue siendo buena. Las distancias de separación de transductores que se han considerado han sido 30, 20, 10 y 5 cm.

Primero se ha medido el pulso sin cancelación recibido a 30 cm, figura 4.26. Con respecto al caso de estudio 2, uno de los transductores fue sustituido dando lugar a una forma de onda distinta a la que aparece en la figura 3.12 superior derecha. Ello hace que para un índice $n=5$, los parámetros T_d y α sean también distintos, siendo sus valores $\alpha=0.519$ y $T_d=570$ ns.

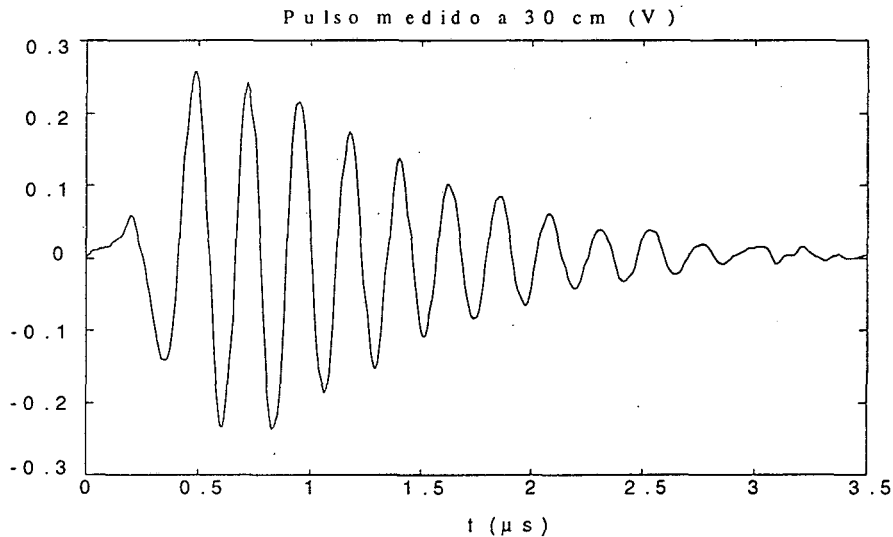


Fig. 4.26 Señal pulso recibido siendo la separación entre transductores de 30 cm.

En la figura 4.27 se muestra el pulso con cancelación medido a las distancias de 30, 20, 10 y 5 cm. Los pulsos medidos a 30 y a 5 cm son prácticamente idénticos pudiendo afirmar que al cabo de 1.5 μs el pulso con cancelación se ha extinguido completamente. No existe por tanto distinción entre campo lejano y campo próximo. Se observa también que en los pulsos medidos a 20 y a 10 cm aparece medio ciclo más de señal. Este hecho podría ser atribuido a un encaramiento no del todo perfecto entre transductores más que a un efecto debido a la distancia de separación de los mismos, pues como se ha indicado anteriormente el pulso a 30 y a 5 cm coinciden plenamente.

A modo de resumen, la tabla 4.2 recoge el resultado de la comparativa entre las técnicas de excitación específica y de cancelación de pulsos.

	Resolución	Dependencia con la distancia	Dificultad técnica	Coste económico
Excitación específica	alta	alta	alta	alto
Cancelación de pulsos	media	baja	baja	bajo

Tabla 4.2 Cuadro resumen de la comparativa entre la técnica de excitación específica y de cancelación de pulsos.

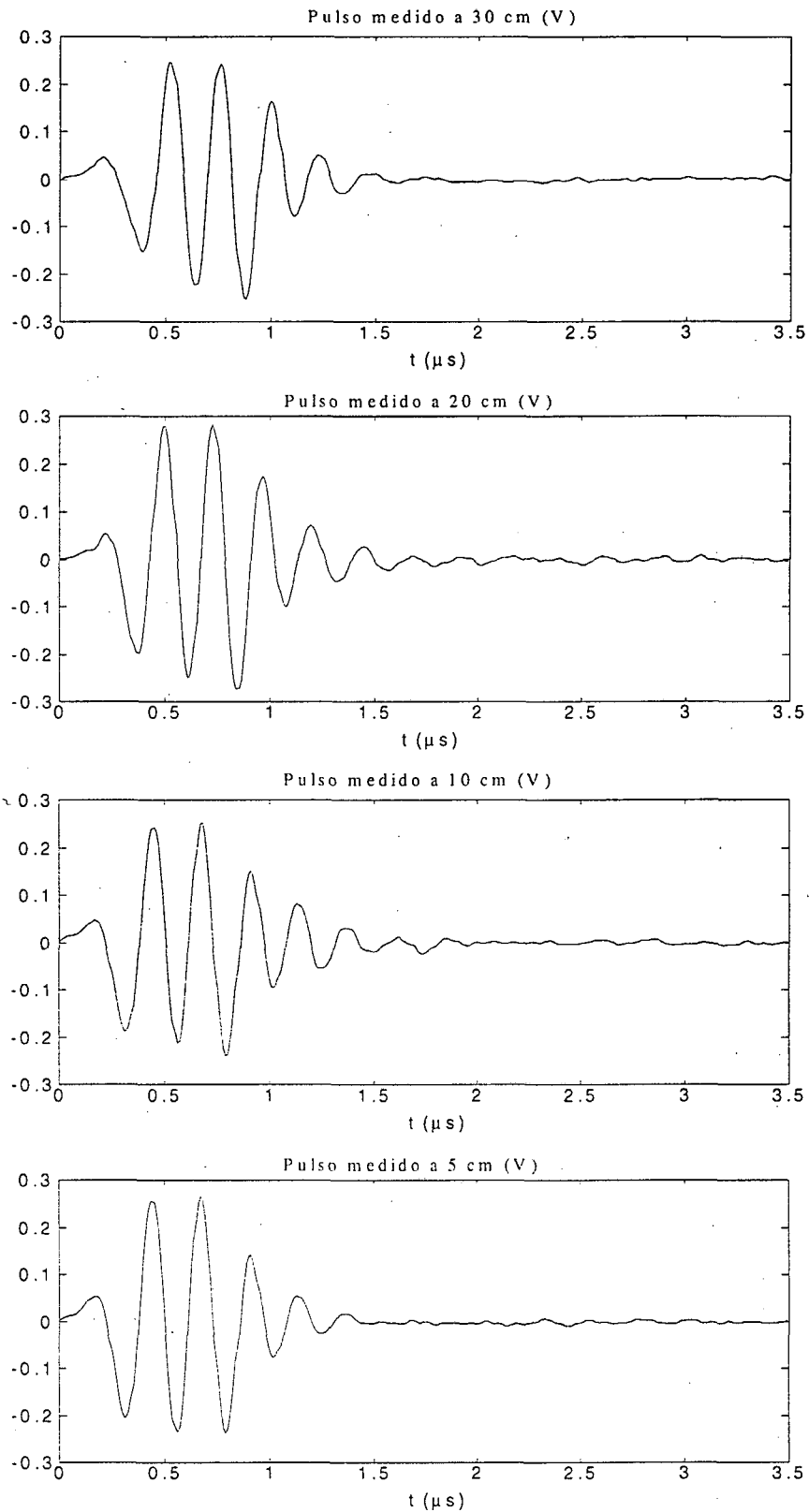


Fig. 4.27. Señales pulso recibido a diferentes distancias, empleando como excitación un segundo pulso con sus parámetros ajustados en campo lejano a una distancia de 30 cm del transductor ($\alpha=0.52$ y $T_d=570$ ns).

4.10 Conclusiones.

En este capítulo se ha tratado la técnica de excitación específica de transductores realizando al final del mismo una comparativa con la técnica de cancelación por pulso a nivel de resultados obtenidos, dificultades técnicas y coste de los equipos.

En el proceso de obtención de la respuesta impulsional del transductor, la aplicación del coeficiente de correlación normalizado ρ_{xy} ha permitido sistematizar uno de los métodos que se encuentran en la literatura para la determinación de la respuesta impulsional de un sistema.

El estudio realizado de la dependencia con la distancia de la respuesta impulsional permite poder determinar el número mínimo de excitaciones específicas a almacenar en un sistema de medida. Como era de esperar, en campo lejano (región de Fraunhofer) la respuesta impulsional depende exclusivamente de un factor de atenuación con la distancia viajada por el pulso de ultrasonidos. En campo próximo (región de Fresnel), sin embargo, la respuesta impulsional se ajusta solamente para aquella distancia a la que se ha calculado.

Los resultados proporcionados por las excitaciones específicas en campo lejano y campo próximo determinan que con esta última se obtienen buenos resultados tanto en campo próximo como en campo lejano, hecho que no ocurre cuando se utiliza una excitación específica para campo lejano.

Se ha podido comprobar también que al aplicar la técnica de excitación específica el ancho del pulso resultante disminuye considerablemente, hasta un factor 16, tomando valores del orden de $\lambda/2$ y, algo superiores en algún caso. Este resultado es muy superior comparado con el obtenido al utilizar la técnica de cancelación por pulso.

Aunque las técnicas de excitación inversa y de cancelación por pulso sean totalmente distintas, se ha realizado una comparación a nivel de ventajas e inconvenientes entre ellas, evaluando básicamente dificultades técnicas, costes y resultados obtenidos. En este sentido, la técnica de cancelación por pulso se ha mostrado altamente adecuada en aquellos sistemas de medida donde el concepto de sistema de bajo coste sea más importante que el poseer una resolución del orden de $\lambda/2$.

Uno de los resultados de la comparación es que la técnica de cancelación por pulso se ha mostrado mucho menos sensible, más tolerante, a la distancia a la cual se está efectuando la medida, no ocurriendo así para la técnica de la excitación específica. La explicación reside en que la excitación específica, con el fin de compensar la respuesta del transductor, tiene un contenido variado en frecuencias (entre 0 y 5 MHz por limitación del generador utilizado) y no todas ellas sufren la misma atenuación por el medio (atenuación proporcional al cuadrado de la frecuencia). La consecuencia inmediata es una degradación del pulso recibido en recepción. Sin embargo, el contenido frecuencial de los dos pulsos emitidos en la técnica de cancelación de pulsos es muy pobre como consecuencia de que los transductores utilizados son de banda estrecha. Por tanto, toda la señal es atenuada por igual.