

REDUCCIÓN DEL RUIDO DE BAJA FRECUENCIA EMITIDO POR UNA FUENTE SONORA, MEDIANTE CONTROL ACTIVO DE RUIDO, APROVECHANDO LA DISMINUCIÓN DE LA DENSIDAD MODAL POR ENCAPSULAMIENTO

REFERENCIA PACS; 43.50.Ki

Salueña X., Romeu J., Jiménez S., Capdevila R, Pámies T, Gutierrez M.
Laboratorio de Mecánica e Ingeniería Acústica ETS de Ingenieros Industriales de Terrassa.
U.P.C.
C/ Colom 11
08922 Terrassa. Barcelona. España
Tel: 34 937 398 146
Fax: 34 937 398 101
E-Mail: saluena@em.upc.es

ABSTRACT

The main problem we find when apply active noise control in a three dimension enclosure is the difficulty to reproduce the acoustic field. Then we must try to placed the secundaries sources the most closed to the machine and we resign to reduced only in some zones (local cancellation). But sometimes it's impossible to placed the loudspeakers near of the noise source, constantly the acoustic field changes and the control its comes unstable. We proposed capsuled the machine to obtain a global cancellation.

RESUMEN

Uno de los principales problemas que nos encontramos cuando se desea cancelar el ruido tonal de una máquina en un recinto (fábrica) mediante el control activo¹ es la dificultad de reproducir el campo acústico en tres dimensiones y su variabilidad. En estos casos debemos conformarnos en colocar las fuentes secundarias lo más próximas a la máquina y reducir sólo en algunas zonas (cancelación local). Pero no siempre es posible colocar los altavoces cerca de la fuente de ruido, tenemos dificultad en encontrar la posición idónea de los micrófonos de error y el más mínimo cambio de contornos en el interior del recinto puede modificar el campo y desestabilizar el control .

En este artículo se propone un método para mejorar los resultados obtenidos en la cancelación activa de ruido de una fuente. El método consiste en encapsular la fuente pero no tanto para realizar un aislamiento sino para reducir la densidad modal del ruido emitido y por tanto simplificar el campo acústico. Así mismo se provocará, mediante el cálculo de las dimensiones de este encapsulamiento en función de las frecuencias de emisión de la fuente, la creación de una onda estacionaria que por su simplicidad podrá cancelarse con control activo mediante un solo micrófono de error (Uno por frecuencia). En la publicación se demostrará la importancia de colocación de la fuente en el interior del encapsulamiento y su influencia en el campo externo al encapsulamiento (recinto). También se fijará la adquisición de la señal de referencia y de error para la optimización del control. Se demostrará que si cancelamos en el interior del encapsulamiento cancelamos en todo el recinto y de forma global. Finalmente se describirá el experimento realizado en un laboratorio con el método descrito, se comentarán y analizarán los resultados obtenidos.

CAMPO ACÚSTICO EN UN RECINTO VERSUS A UN ENCAPSULAMIENTO

Cuando tenemos una única fuente de ruido, tal como una máquina, encerrada entre superficies (en un local) el campo acústico producido en su interior es función de las frecuencias de emisión de dicha fuente, de la posición de la fuente dentro del local, de la geometría u obstáculos y de las dimensiones del local y finalmente de la rigidez de sus paredes. A su vez la amplitud del campo creado es función de la potencia y de la posición de la fuente. Para comprender la creación de este campo vamos a partir de un caso experimental sencillo. Partimos de una fuente puntual con un tono puro de 42 Hz en el interior de una sala cuadrada de 8x8 metros y 3,25 metros de altura.

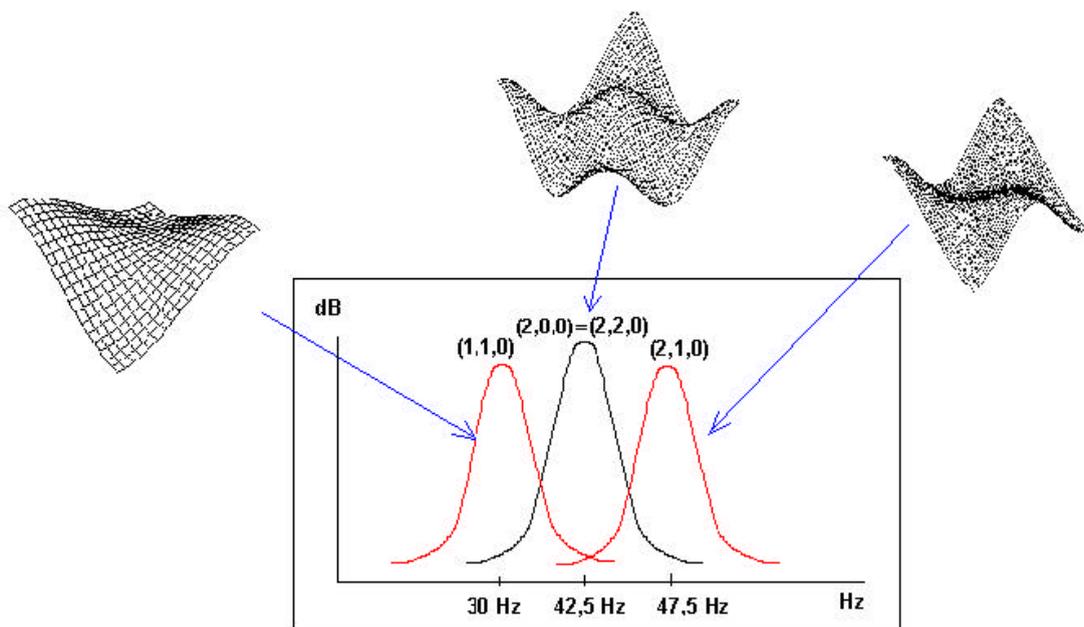
En un recinto de dimensiones $L_x = 8$, $L_y = 8$ y $L_z = 3,25$ m para cada uno de los modos propios aparecen las siguientes frecuencias de resonancia.

$$f_{lmn} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2}$$

l	m	n	f_{lmn}	Diferencia	l	m	n	f_{lmn}	Diferencia
1	0	0	21,3		5	0	1	118,4	0,0
1	1	0	30,1	8,8	4	4	0	120,2	1,8
2	0	0	42,5	12,4	5	1	1	120,3	0,1
2	1	0	47,5	5,0	2	2	2	120,7	0,4
0	0	1	52,3	4,8	3	0	2	122,5	1,8
1	0	1	56,5	4,2	5	3	0	123,9	1,4
2	2	0	60,1	3,6	3	1	2	124,3	0,4
1	1	1	60,3	0,2	5	2	1	125,8	1,5
3	0	0	63,8	3,5	6	0	0	127,5	1,7
3	1	0	67,2	3,4	6	1	0	129,3	1,8
2	0	1	67,4	0,2	3	2	2	129,7	0,4
2	1	1	70,7	3,3	4	4	1	131,1	1,4
3	2	0	76,6	5,9	6	2	0	134,4	3,3
2	2	1	79,7	3,1	5	3	1	134,5	0,1
3	0	1	82,5	2,8	4	0	2	134,8	0,3
4	0	0	85,0	2,5	5	4	0	136,1	1,3
3	1	1	85,2	0,2	4	1	2	136,5	0,4
4	1	0	87,6	2,4	6	0	1	137,8	1,3
3	3	0	90,2	2,6	3	3	2	138,1	0,3
3	2	1	92,8	2,6	6	1	1	139,4	1,3
4	2	0	95,0	2,2	4	2	2	141,3	1,9
4	0	1	99,8	4,8	6	3	0	142,5	1,2
4	1	1	102,0	2,2	6	2	1	144,2	1,7
3	3	1	104,2	2,2	5	4	1	145,8	1,6
0	0	2	104,6	0,4	7	0	0	148,8	3,0
4	3	0	106,3	1,7	7	0	0	148,8	0,0
5	0	0	106,3	0,0	4	3	2	149,1	0,3
1	0	2	106,8	0,5	5	0	2	149,1	0,0
5	1	0	108,4	1,6	5	5	0	150,3	1,2
4	2	1	108,5	0,1	7	1	0	150,3	0,0
1	1	2	108,8	0,3	5	1	2	150,6	0,3
2	0	2	112,9	4,1	6	3	1	151,8	1,2
5	2	0	114,4	1,5	6	4	0	153,2	1,4
2	1	2	114,9	0,5	7	2	0	154,7	1,5
4	3	1	118,4	3,5	5	2	2	155,0	0,3

Tabla 1. Primeras 70 frecuencias propias del recinto.

En este primer ejemplo escogemos 42 Hz. El campo creado a las frecuencias de resonancia del recinto sería el que observamos en el esquema. La amplitud a estas frecuencias se incrementa al acercarse a las propias del recinto. El campo creado entre dos de estas frecuencias, imaginemos 40 Hz, es una mezcla de ambas en que predomina el campo de la más próxima, en este caso el campo de 42 Hz. Por ello trabajamos a la frecuencia de resonancia, para simplificar el campo creado. En nuestro caso como emitimos a 42 Hz y debido a que el recinto es cuadrado, al crearse el modo (2,0,0) automáticamente se genera el (2,2,0).

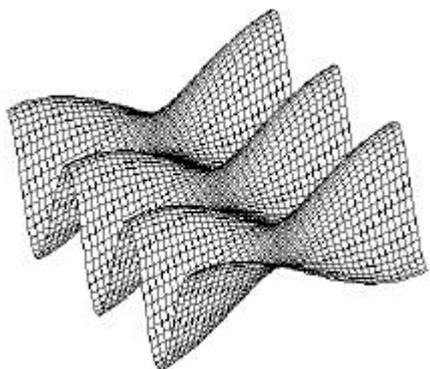


Campos creados a las frecuencias de resonancia de la sala si la fuente está en una esquina.

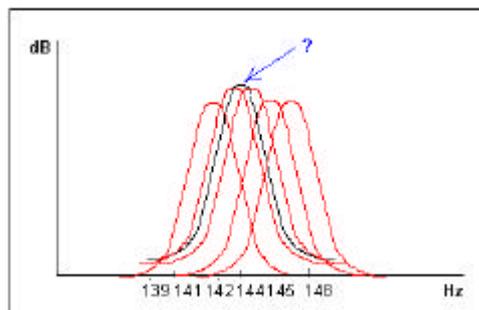
Escogemos 42 Hz porque además es una frecuencia de baja densidad modal. Esto se debe a que a esa frecuencia la repercusión de los campos generados por las demás frecuencias de resonancia es mínima ya que la diferencia con ellas es de 8,8 y 12,4 Hz respectivamente y el campo es claramente un (2,2,0).

Si en vez de a 42Hz la fuente emitiera a 144 Hz el campo no sólo se complicaría (6,2,1) sino que aumentaría la densidad modal (Frecuencias propias próximas: 139,4; 141,3; 142,5;

144,2;145,8; 148,8) y el campo no sería claramente un (6,2,1) sino una mezcla de este con los demás campos generados.



Campo (6,2,1) en una sección en x,y y fuente en la esquina



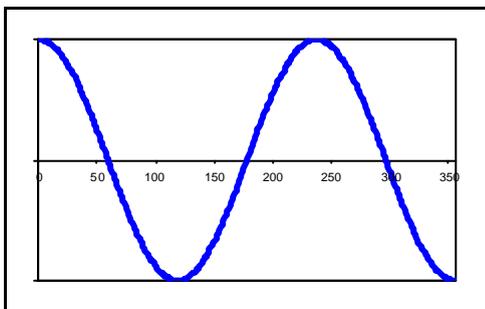
Campo de alta densidad modal a 144 Hz

Otro de los parámetros que influye es la posición de la fuente en el campo y los agentes externos como otros ruidos y obstáculos que modifican dicho campo.

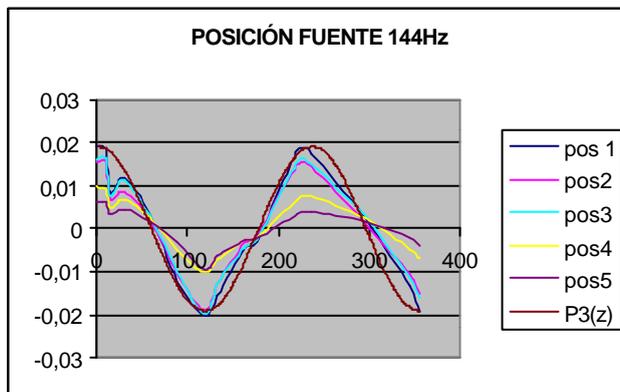
¿Qué ocurre si esta misma fuente la encapsulamos? Esta claro que en el interior del encapsulamiento $L_x = 3,55$, $L_y = 0,28$ y $L_z = 0,28$ m se producen los siguientes modos propios.

l	m	n	f_{lmn}	Diferencia	l	m	n	f_{lmn}	Diferencia
1	0	0	47,9		5	0	0	239,4	47,9
2	0	0	95,8	47,9	6	0	0	287,3	47,9
3	0	0	143,7	47,9	7	0	0	335,2	47,9
4	0	0	191,5	47,9	5	0	0	383,1	47,9

En el interior del encapsulamiento se produce una onda plana y una densidad modal baja. Para el caso anterior en que la fuente emitía a 144 Hz la onda producida en el interior es (3,0,0):



Comparación entre el campo creado para distintas posiciones de la fuente.



Como puede observarse a 144 Hz (frecuencia de resonancia) se produce una onda estacionaria muy sencilla cuya amplitud aumenta si desplazamos la fuente hacia los vientres (pos1) y disminuye si lo hacemos hacia los nodos (pos 5).

Nos queda la pregunta: ¿Y que campo queda en el recinto?. Experimentalmente se demuestra que el campo en el exterior no cambia en cuanto a forma, sí en amplitud.

Despreciando el aislamiento propio del encapsulamiento podemos decir:

Si la fuente está en el vientre existe máxima resonancia por lo que la amplitud crece en los dos campos, parece como si en el campo exterior existiera una fuente lineal con los valores del campo interno.

Si la fuente está en el nodo, el campo exterior es parecido al que obtendríamos con una fuente sin el encapsulamiento ya que el campo creado en el interior es de poca amplitud y domina la fuente.

CONTROL ACTIVO EN EL ENCAPSULAMIENTO DE UNA FUENTE PUNTUAL

Es evidente que si el campo es muy sencillo (onda plana) el control activo será también más fácil (un micrófono y un altavoz por frecuencia a cancelar) y eficaz. Y lo más importante, global.

En primer lugar debemos demostrar:

Si se produce una cancelación global² (en todos los puntos) del interior del encapsulamiento también se producirá una cancelación global en todo el recinto. Además, al ser de baja densidad modal, si la frecuencia varía en torno a la frecuencia propia el control continúa siendo estable.

Si la fuente de ruido está cercana a un nodo la reducción absoluta en el exterior es mayor. Pero debemos tener en cuenta la direccionalidad de la fuente.

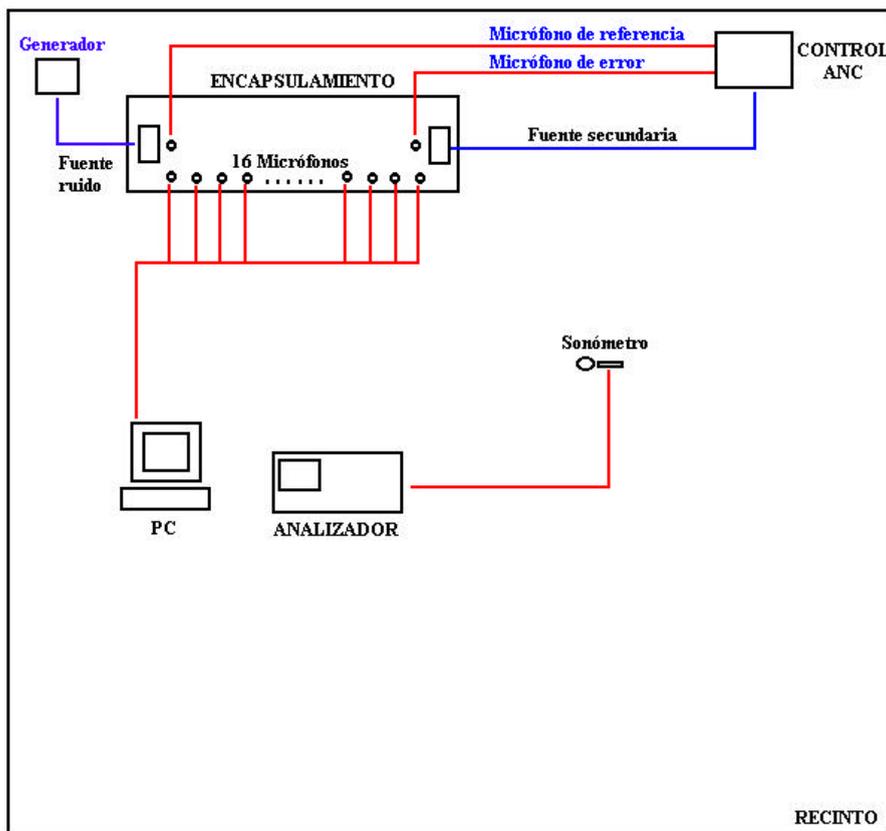
La mejor configuración parece ser un feedforward adaptativo con un micrófono de error cerca de la fuente, un acelerómetro como señal de referencia y el altavoz, si es posible, lo más cerca de la fuente (a veces efecto Larsen o realimentación).

Para demostrar estos puntos introduciremos un altavoz en el interior de un encapsulamiento

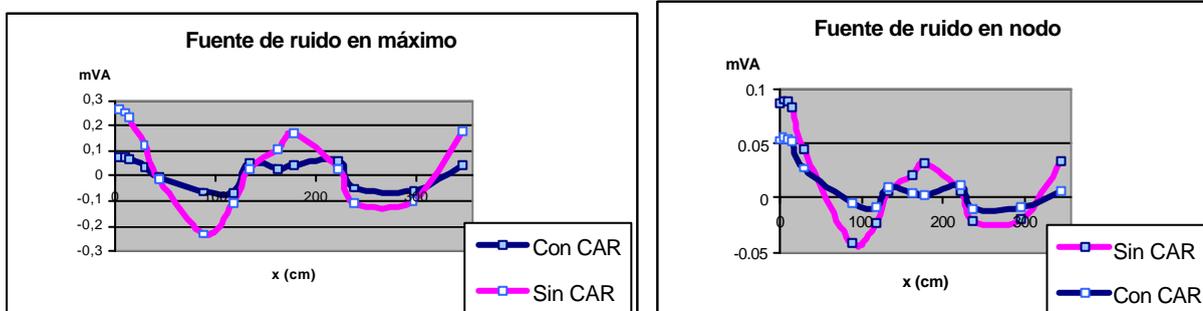
$L_x = 3,55$, $L_y = 0,28$ y $L_z = 0,28$ m y emitiremos un tono puro de 144Hz (3,0,0) y posteriormente 192 Hz (4,0,0). Colocando el altavoz secundario, un micro de referencia y el micro de error en máximos realizaremos un control activo en el interior. Comprobaremos a continuación si el campo en el exterior se reduce.

Comprobamos para el campo en el interior antes y después del control activo con la fuente de ruido en el vientre o en el nodo. Las reducciones son globales y para todo el espectro.

Esquema del montaje.



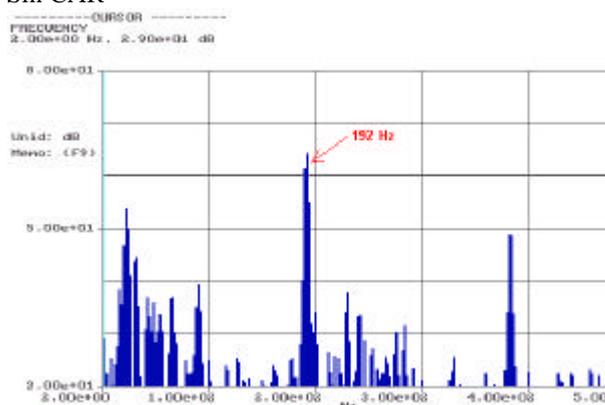
Se comprueba que el campo en el exterior se reduce globalmente. En general se reduce más, los niveles de ruido son inferiores, si la fuente está en un nodo, aunque la atenuación es mayor si la fuente está en el máximo



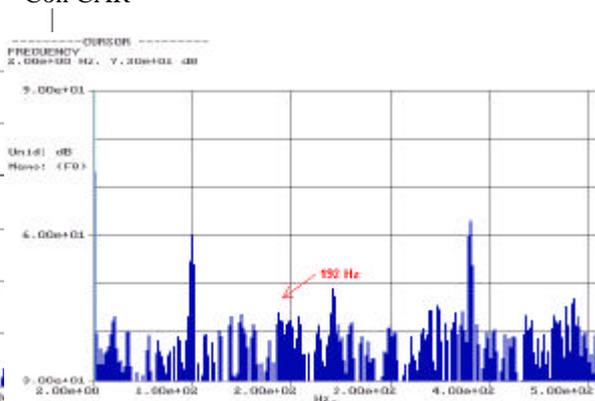
CONTROL ACTIVO EN EL ENCAPSULAMIENTO DE UN MOTOR

Realizamos ahora la experiencia para un caso real . Colocamos un motor cuya frecuencia principal es 192Hz en un encapsulamiento $L_x = 3,55$, $L_y = 0,28$ y $L_z = 0,28$ m donde se forma el campo modal (4,0,0). El montaje es igual al descrito anteriormente para fuente puntual pero sustituyendo esta por un motor de corriente continua. Se realizó un control activo con un acelerómetro³ como señal de referencia, un micrófono de error en un máximo y un altavoz en un máximo³ (en el otro extremo del encapsulamiento) para el motor en un máximo y en un nodo. Se analizó los niveles de presión sonora para todo el espectro de frecuencia en el interior del conducto y el valor del pico de 192Hz en el interior y en todo el recinto antes y después del control activo.

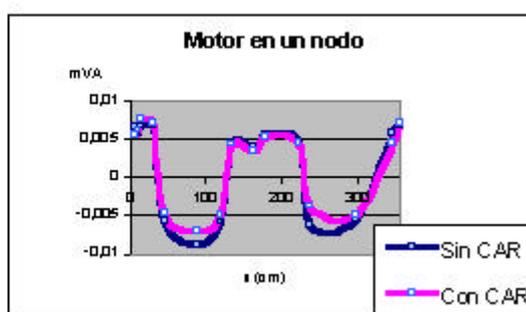
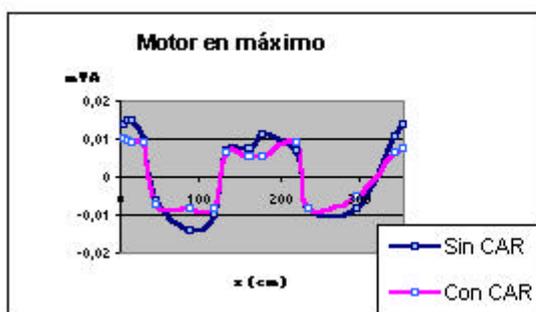
Sin CAR



Con CAR



Reducción de la frecuencia de 192Hz para el motor en el interior del conducto (Se muestra la banda hasta 500 Hz).



Reducción global del campo acústico en el interior del conducto por CAR con el motor en el máximo y en el nodo.

La reducción global es de 2 a 3 dBA tanto en el encapsulamiento como en el exterior. Estudiando la reducción del pico de 192 Hz en el recinto se deduce que es global y que la media es de 15 dBA.

CONCLUSIONES

Cuando queremos cancelar mediante control activo una fuente de ruido en un recinto con alta densidad modal podemos introducirla en un encapsulamiento con las dimensiones necesarias para que se produzca una onda plana de baja densidad modal y donde su frecuencia propia sea igual o múltiplo de la de la máquina por lo que se genera una onda estacionaria. Si cumple que la frecuencia principal es la propia del encapsulamiento o un múltiplo también se adaptará este a los armónicos de la máquina.

Si se cancela globalmente en el interior del encapsulamiento se cancela globalmente en el recinto. Si se cancela localmente en el recinto no se cancela globalmente en el interior del encapsulamiento.

El control activo se realizará mediante feedforward adaptativo con una fuente secundaria y un micrófono de error por frecuencia a cancelar.

La mejor posición de la fuente en el interior del encapsulamiento es colocarla en un nodo del campo creado. Hemos de tener en cuenta en ese caso la direccionalidad de la fuente y escoger la posición que irradie hacia el interior y no hacia la pared.

REFERENCIAS

1. J.Romeu, S. Jimenez, X. Salueña, R. Capdevila, J. Gibert; "Atenuación del ruido en conductos aplicando la técnica de absorción activa" XXVII Jornadas nacionales de acústica. Barcelona 1996

2. J.Romeu, : X. Salueña , Ll. Coll , S. Jimenez, R. Capdevila
“ Control activo de ruido en un conducto en presencia de ondas estacionarias”
XXX Jornadas nacionales de acústica. Avila 1999
3. J.Romeu, : X. Salueña ,S. Jimenez, R. Capdevila, Ll. Coll,
“Modelo para evitar la realimentación en un sistema de control activo de ruido en un conducto.”
XIII Congreso nacional de ingeniería mecánica. Terrassa 1998