

Localización de fuentes de ruido mediante mapas de intensidad.

San Juan Blanco, Manuel; Herráez Sánchez, Marta; Montoya Moreno, Felipe
Dpto. Ingeniería Mecánica e Ingeniería de Materiales (IMEIM)

Pérez García, Antonio
Laboratorio de Acústica y Vibraciones. LTI.
E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES
Universidad de Valladolid

Introducción

La localización de la fuente de ruido de un sistema es, sin duda, el primer problema que se plantea para la aplicación de cualquier método de reducción del ruido; incluso en algunos casos se trata del más importante, ya que una vez localizada ésta, la solución puede ser inmediata. El método de intensidad mediante la realización de mapas aparece como una solución sencilla y a la vez bastante precisa a la hora de localizar las fuentes y/o los sumideros. En este sentido, habría innumerables aplicaciones en el campo de la ingeniería (automóvil, calderas, electrodomésticos, aire acondicionado, ...) o de la arquitectura (vías de paso, puentes acústicos, ...). Se presentan en primer lugar algunas características de la intensidad, para terminar planteando mediante un ejemplo (estudio de un taladro) las magníficas posibilidades que nos ofrece la realización de mapas de intensidad para la localización de fuentes. Las medidas presentadas se realizaron en una cámara semianecoica y con el apoyo de un posicionador de micrófonos de dos grados de libertad.

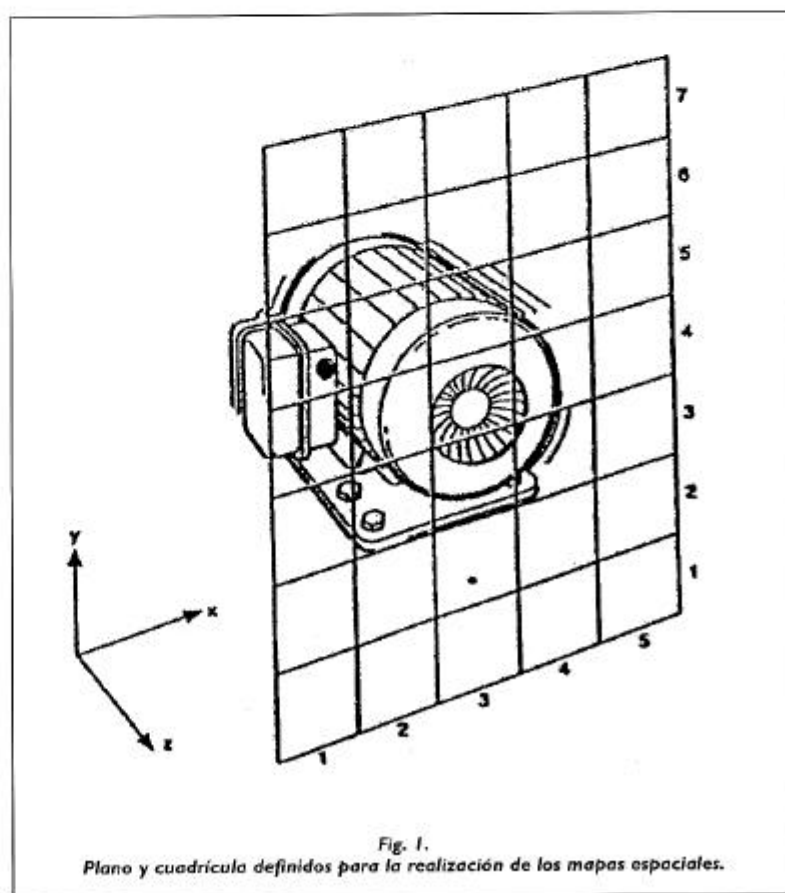
1. Caracterización del campo sonoro mediante la intensidad.

La intensidad acústica de una onda sonora se define como el valor medio

del flujo de energía que atraviesa un área unidad normal a la dirección de propagación de la onda. Su expresión en función de la presión (p) y la velocidad de la partícula (u) es:

$$\vec{I}(\vec{r},t) = p(\vec{r},t) \cdot \vec{u}(\vec{r},t)$$

Teniendo en cuenta que la presión (p) y la velocidad (u) normalmente no están en fase (sus valores máximos no



se alcanzan en el mismo instante), se hace conveniente el empleo de notación compleja para las variables acústicas. La presión se considerará igualmente como compleja, aunque únicamente tendrá sentido físico su parte real. Mientras que la velocidad expresada con notación compleja se divide en una Componente Activa (u_a), en fase con la presión, y una Componente Reactiva (u_r), en cuadratura:

$$u(\vec{r},t) = u_a(\vec{r},t) + ju_r(\vec{r},t)$$

De esta forma la intensidad instantánea tendrá las componentes Activa y Reactiva respectivamente:

$$I(\vec{r},t) = I_a(\vec{r},t) + jI_r(\vec{r},t)$$

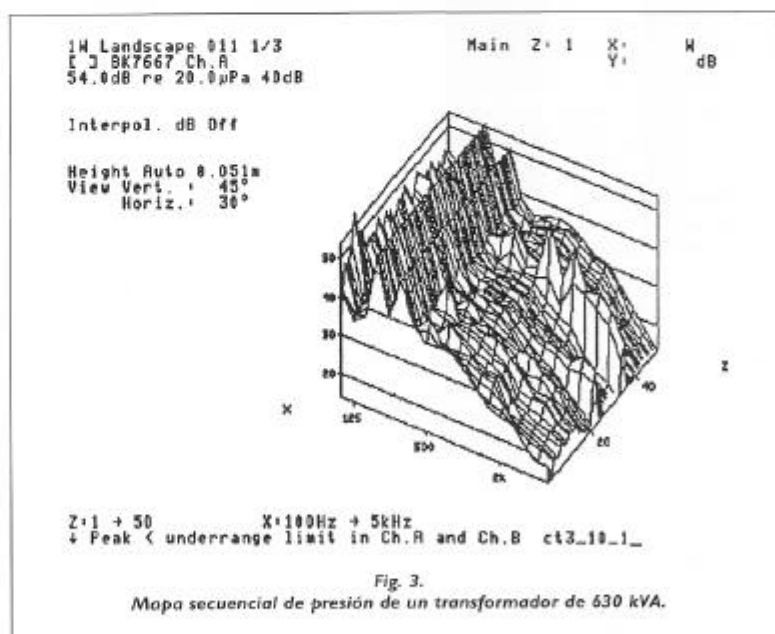
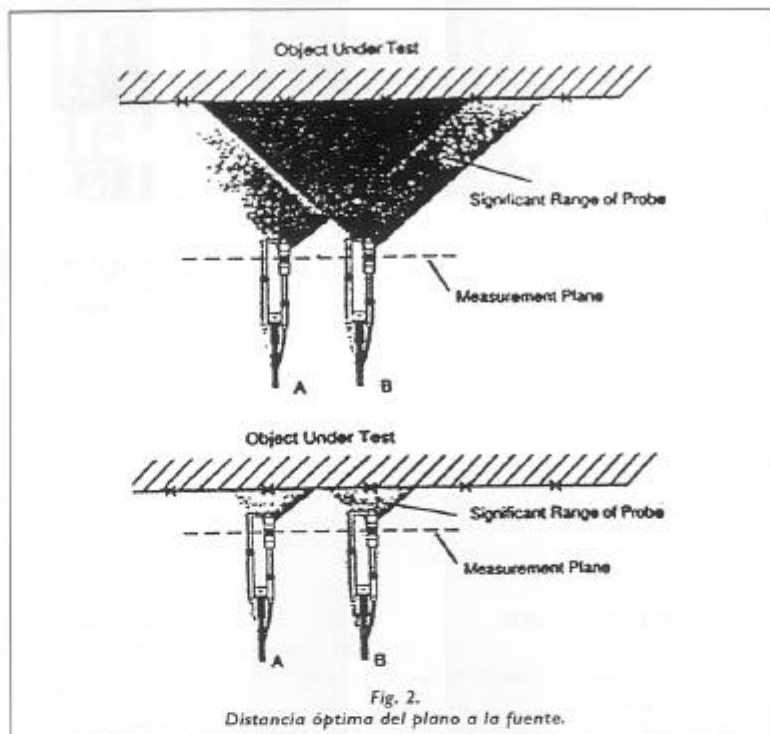
La componente Activa de la Intensidad (I_a) refleja el transporte de energía sonora local neto, mientras que la Reactiva (I_r) refleja el transporte de energía local oscilatorio⁽¹⁾. En lo que resta trabajaremos únicamente con la Componente Activa de la Intensidad, ya que inicialmente para la localización de fuentes sólo nos vamos a fijar en ésta, aunque por simplicidad se denominará intensidad.

2. La medida de la intensidad

Para poder determinar la intensidad instantánea en un punto, será preciso disponer de un sistema de medida que incorpore dos transductores que evalúen los parámetros presión y velocidad; al conjunto de los dos transductores se denomina sonda de intensidad. Normalmente se utilizan dos tipos de sonda: una de ellas combina un transductor de presión y uno de velocidad (sonda p-u); la otra contiene dos transductores, teóricamente idénticos, de presión (sonda p-p).

En las medidas presentadas se utilizó una sonda p-p, empleada habitualmente debido al alto costo de la p-u y su excesiva sensibilidad a las turbulencias del aire.

Con ella, mediante la medida de la presión sonora en dos puntos próximos, se obtiene la componente de la



Intensidad en la dirección de la sonda mediante la aproximación de diferencias finitas⁽²⁾.

$$\hat{I}_a = \frac{1}{2\rho_0\Delta r} (p_A - p_B) \int (p_B(\tau) - p_A(\tau)) d\tau$$

donde:

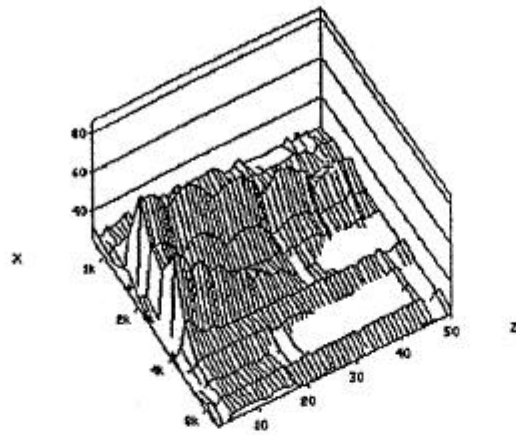
- p_A y p_B son las presiones medidas en ambos micrófonos
- ρ_0 es la densidad de equilibrio del fluido
- Δr es la distancia entre los micrófonos (longitud del espaciador)

1W Landscape Buffer 1/3
 [] Ch.R
 85.0dB re 20.0µPa 60dB

Main Z: 44 X: 1.6kHz
 Y: 37.5dB
 Total: 77.1dB

Interpol. dB Off

Height Auto 0.036m
 View Vert.: 60°
 Horiz.: 60°



Z: 1 → 50 X: 800Hz → 10kHz
 ↓ Next accept in: 51

n4

Fig. 4.

Mapa secuencial de presión de una campana.

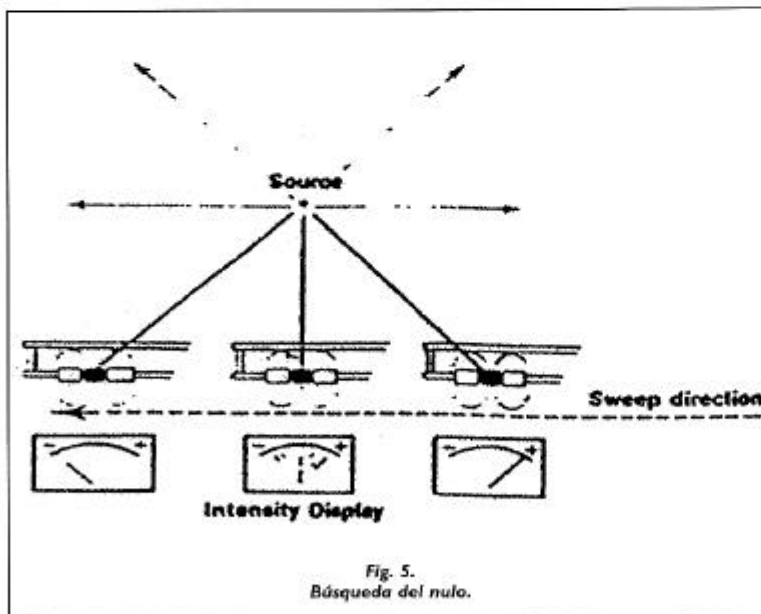


Fig. 5.

Búsqueda del nulo.

Dicha aproximación impone un límite superior de frecuencia para asegurar una fiabilidad en la estimación de la intensidad. En nuestro caso, para un espaciador de 12 mm y con un error en la estimación de ± 1

dB, el límite superior en frecuencia es de 5 kHz.

Además, con este método, la principal fuente de error en la estimación es la existencia de un desfase entre canales, por lo que para asegurar unas

condiciones óptimas de precisión en la medida se debe realizar una calibración, tanto en amplitud como en fase, de toda la cadena de medida, empleando para ello el calibrador de intensidad BK 3541⁽⁹⁾.

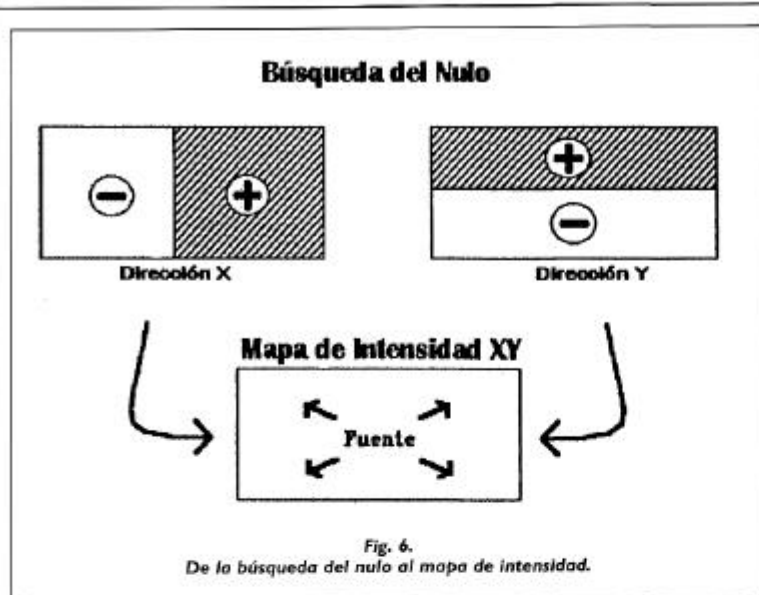
3. Mapas de intensidad

Para conocer el comportamiento del campo sonoro se emplean los llamados mapas. Existen dos tipos de mapas: los mapas espaciales, que son una representación del campo sonoro en una determinada superficie del espacio, y los mapas secuenciales, que representan cómo varía este campo en un punto del espacio a lo largo del tiempo. Las magnitudes que se pueden representar, tanto en un caso como en otro, son la presión y la intensidad.

3.1. MAPAS ESPACIALES

Para realizarlos, se define un plano próximo a la fuente (normalmente paralelo a una de sus superficies), y sobre él una cuadrícula (Fig. 1). Se miden una o varias componentes de la intensidad (en las direcciones x e y de la superficie, o normal a la misma) en cada uno de los nudos de esta cuadrícula. Estos valores se almacenan en una matriz tridimensional (fila, columna, dirección), de manera que cada elemento de la matriz nos defina el vector intensidad en un punto. Con posterioridad y merced a las distintas representaciones de estos valores podremos detectar la localización de las fuentes o sumideros⁽⁹⁾.

Se puede utilizar una técnica semejante para representar niveles de presión, aunque la ventaja que tiene la intensidad es que sus medidas se pueden hacer en la zona de campo próximo de la fuente, logrando así una mayor resolución. La realización de estos mapas será factible con aquellas fuentes cuyo comportamiento sea estacionario, de forma que los resultados obtenidos sean coherentes, debido a que la medida en cada nodo se hace en instantes distintos. Si el carácter acústico de la fuente es periódico, se deberá tomar como variable el tiempo de promediación empleado para cada medida, de forma que se



cumplan las condiciones de estacionariedad precisas²³. En la elección de la cuadrícula de medida se debe tener en cuenta la pérdida de información por un "aliasing espacial", por lo que la onda sonora de una determinada frecuencia debe estar muestreada al menos en dos puntos de su longitud de onda; esto significa que la distancia máxima (d_{max}) entre dos puntos de medida debe cumplir:

donde (f_u) es la máxima frecuencia en el rango de interés.

$$d_{max} = 0.5 \lambda_s = 0.5 \frac{c}{f_n}$$

Además, la distancia entre el plano de medida y la fuente debe ser aproximadamente la mitad de la distancia entre dos puntos adyacentes, debido a las características de directividad de la sonda. De otra forma se correría el riesgo de que la información contenida en puntos adyacentes fuera prácticamente la misma. Fig. 2.

3.2. MAPAS SECUENCIALES.

Para realizarlos, se miden distintos espectros consecutivos en un único punto y se almacenan en un multiespectro del analizador. Es importante que el tiempo entre un espectro y el siguiente sea constante de manera que, en condiciones normales, las

medidas se controlen a través de la función "trigger" del analizador. Son muy útiles para identificar componentes constantes, armónicas o periódicas del espectro.

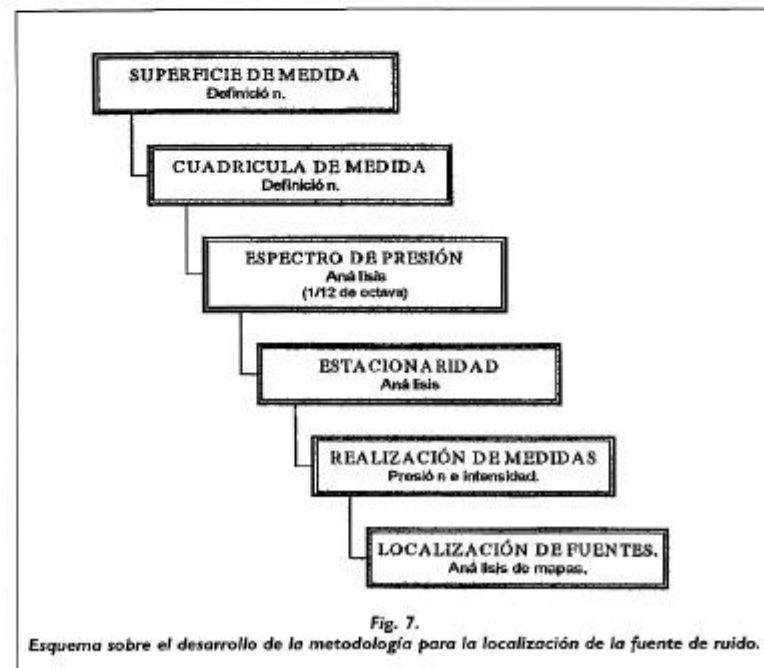
Así, por ejemplo, podemos ver en la Fig. 3, un mapa secuencial de presión medido frente a un transformador de 630 KVA. El tiempo entre medida es de 0,25 segundos y se

empleó para su realización un analizador portátil en tiempo real, el BK 2144. Se puede observar la presencia de unas frecuencias características en 100 Hz y en sus armónicos 200 y 300 Hz, donde los niveles de presión permanecen constantes. En la Fig. 4, se observa el mapa secuencial de presión medido en una campana; se comprueba la existencia del efecto de modulación en sus frecuencias fundamentales.

4. El método de búsqueda del nulo como primera aproximación.

Este método aprovecha las características direccionales que tiene la sonda, lo que permite detectar un cambio de signo en la intensidad para una variación muy pequeña del ángulo de incidencia. Así, un sonido que incide en una dirección que forma, por ejemplo, un ángulo de 85° con el eje de la sonda se interpreta como una intensidad negativa, mientras que el que incide con 95° se interpretaría como una intensidad positiva.

El método consiste en tomar una dirección paralela al plano en que se quiere localizar la fuente, colocar la



sonda con su eje en esta dirección e ir avanzando a la vez que se observa en la pantalla del analizador el valor de la intensidad. Cuando se produce un cambio en el signo de la intensidad significará que se está en una dirección perpendicular a la fuente. Fig. 5. Este método es útil fundamentalmente cuando sólo domina una fuente, ya que de otro modo los resultados podrían ser alterados. Sin embargo, es un método sencillo e intuitivo que facilita la comprensión de otros más complejos. Así, en la Fig. 6 se observa como a partir de la aplicación del método de la búsqueda del nulo en dos direcciones perpendiculares se podría localizar una fuente de ruido con una disposición próxima a la que se tiene para un mapa espacial de intensidad.

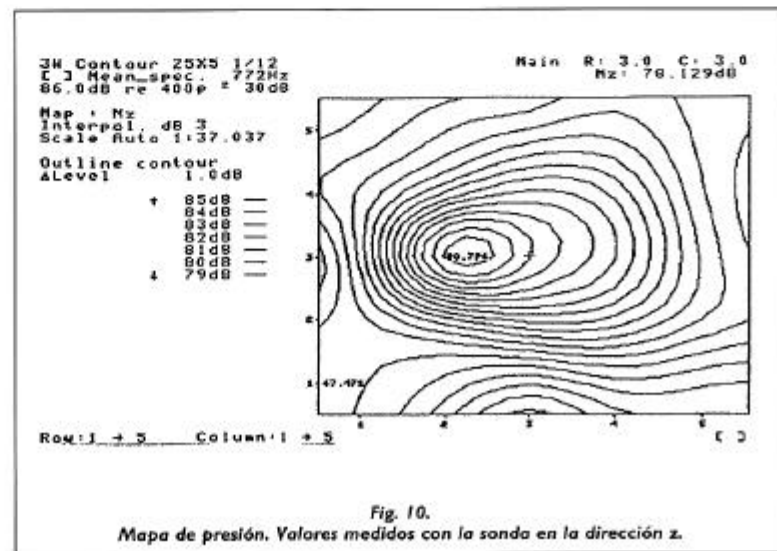
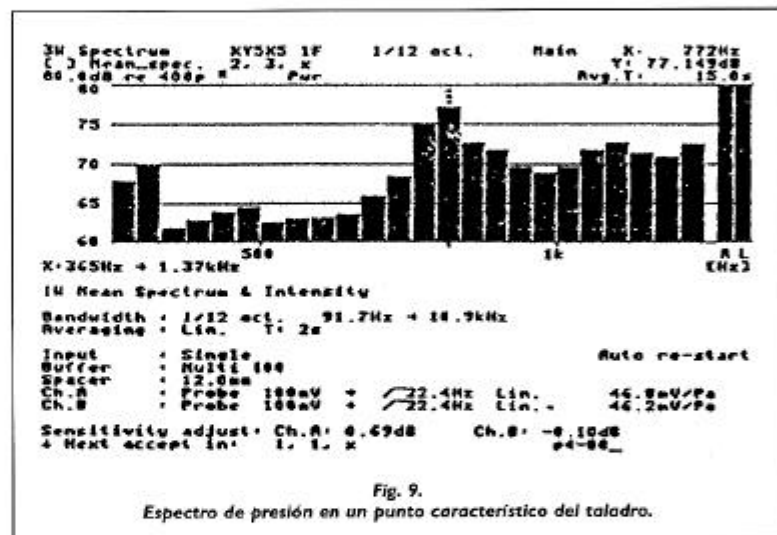
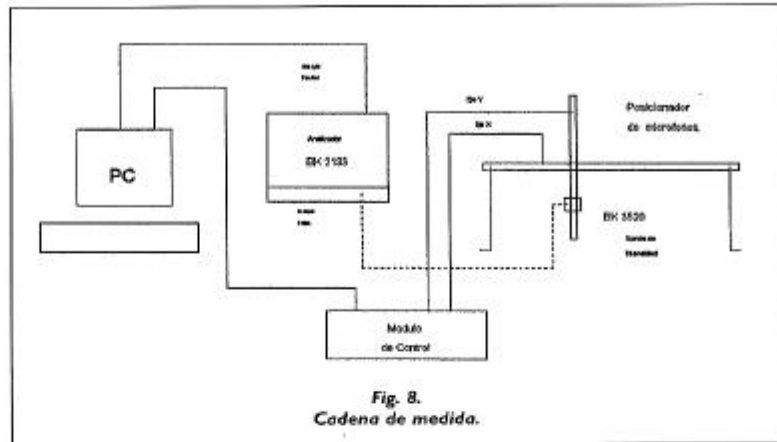
5. Localización de fuentes mediante mapas espaciales de intensidad

Vamos a presentar la metodología estudiando un taladro eléctrico montado sobre un soporte-guía vertical. Buscamos en qué zonas del taladro se encuentran las principales fuentes del ruido. De forma esquemática se puede ver el desarrollo de este tipo de ensayos en la Fig. 7.

El desarrollo del ensayo se realiza en el interior de una cámara semianecoica, para eliminar la influencia de ruidos externos ajenos a nuestro objeto de estudio, y se emplea para la toma de medidas un posicionador de micrófonos de dos grados de libertad. Se denomina posicionador a un mecanismo automatizado, robot, que permite una precisión de ± 1 mm en la localización de los puntos elegidos, y que permite la realización de distintas medidas manteniendo una referencia constante.

La cadena de medida empleada se presenta en la Fig. 8, formada por una sonda p-p de intensidad (BK 3520) y un analizador en tiempo real de dos canales (BK 2133). Mediante un PC se gobierna tanto el analizador como el posicionador; éste a través de un módulo de control.

Se determina la superficie en la cual vamos a realizar las medidas así como la cuadrícula, teniendo en cuenta las



condiciones ya señaladas (con una distancia entre nodos de 15 cm se tiene $f_{\text{max}} > 1200$ Hz). Se analiza el espectro de presión del ruido generado por el taladro con la mayor resolución posible en frecuencia (1/12 de octava), comprobándose la existencia de un máximo en la banda de 772 Hz. (Fig. 9), en la que se centrará el estudio.

A continuación se comprueba la estacionaridad en las medidas mediante la realización de un mapa secuencial en un punto característico, obteniéndose valores válidos con un tiempo de promediación de 8 segundos.

Una vez resueltos los preámbulos, se mide en cada nodo tanto la presión como la intensidad. Al tratarse de una magnitud vectorial, se miden las componentes de esta última en las tres direcciones del espacio, en x e y que forman el plano de medida, y en z, dirección normal a este plano.

Una vez finalizadas las medidas, se procede a su estudio mediante la representación de mapas de distintas magnitudes (Mapping and sound power analysis software BZ 7021 para el BK 2133). Comenzamos observando los niveles de presión obtenidos en la medida realizada en la dirección z para la banda de 772 Hz, (Fig. 10), detectándose inmediatamente la existencia de un foco, así como el módulo de la intensidad en esa misma dirección (Fig. 11), donde ese foco está ligeramente desplazado hacia la derecha.

Si a continuación representamos la presión obtenida en el plano xy, se vuelve a observar la existencia de un foco, así como de una perturbación en la parte inferior del campo acústico. Cuando representamos superpuestos este mapa y el dibujo a escala del taladro, (Fig. 12), observamos que la perturbación es debida a la presencia de la superficie de apoyo del propio taladro, que origina una reflexión del sonido.

Por último, si representamos el mapa de intensidad del plano xy mediante vectores, se observa el predominio en la banda de 772 Hz de una fuente prácticamente puntual y, superpuesto al dibujo a escala, se comprueba que ésta se localiza en la zona de ventilación del motor eléctrico. (Fig. 13).

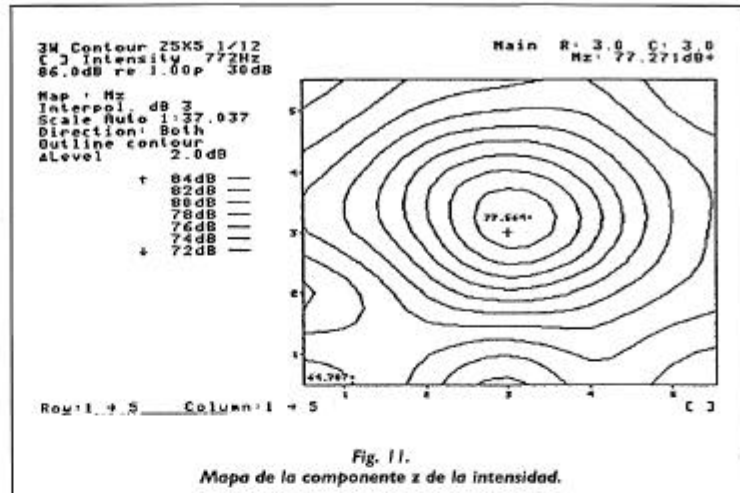


Fig. 11.
Mapa de la componente z de la intensidad.

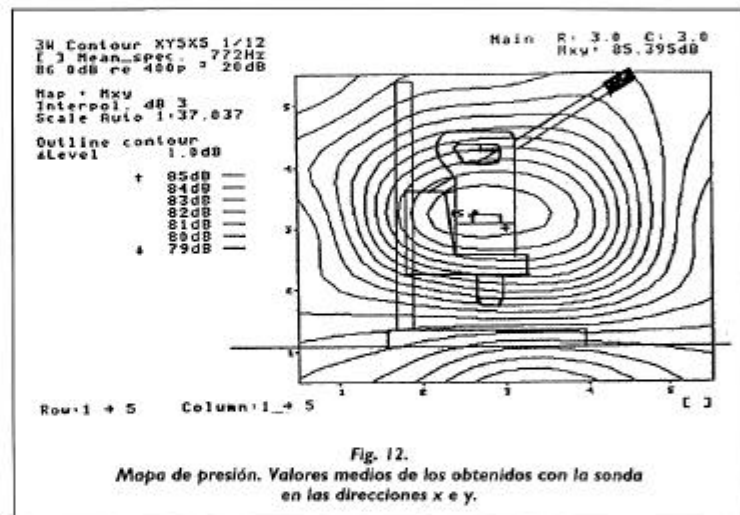


Fig. 12.
Mapa de presión. Valores medios de los obtenidos con la sonda en las direcciones x e y.

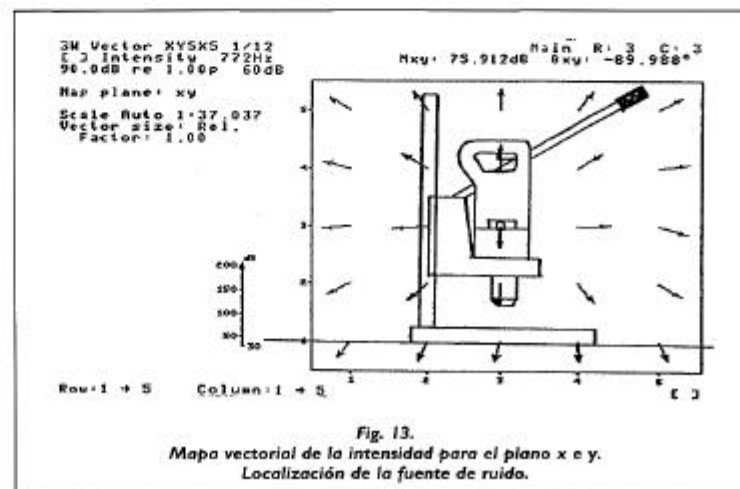


Fig. 13.
Mapa vectorial de la intensidad para el plano x e y.
Localización de la fuente de ruido.

6. Bibliografia

- (1) FAHY, F.J.: Sound Intensity, Elsevier Applied Science, 1989.
- (2) GADE, S.: "Sound Intensity (Part II. Instrumentation and Application)". BK. Technical Review, 4-82.
- (3) GINN, K.B.: "Noise Control survey on a pump using the gated technique". BK Application Note. BO 0388 II.
- (4) GINN, K.B.: "Sound Field description using complex sound intensity instrumentation". BK Application Note. BO 0390 II
- (5) JACOBSEN, T.: "Calibration of Sound Intensity Measurements". BK Application Notes.
- (6) NORTON, M.P.: Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers. Cambridge University Press, 1989