

## COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE DIRECTIVIDAD

PACS: 43.38.Tj

Ferri García, Marcelino; Redondo Pastor, F. Javier; Ramis Soriano, Jaime  
Departamento de Física Aplicada; Escuela Politécnica Superior de Gandía  
Universidad Politécnica de Valencia  
Carretera Nazaret-Oliva s/n  
Grao de Gandia 46730. Valencia  
Tel: 962 849 314 - 962 849 300  
Fax: 962 849 309  
E-mail :mferri@fis.upv.es; fredondo@fis.upv.es; jramis@fis.upv.es

### ABSTRACT

Usually, in acoustic sources design field, to estimate directivity factor value 'Q', approximated methods, based on horizontal and vertical covering angles, are used. In this work, a comparison is made of the values of this parameter obtained from four respective methods, given a set of different sources.

### RESUMEN

Habitualmente, en el ámbito del diseño de sistemas de refuerzo sonoro, se utilizan métodos aproximados para estimar el factor de directividad 'Q', a partir de los ángulos de cobertura horizontal y vertical. En el presente estudio, dada una serie de fuentes de muy distinta naturaleza (dimensiones, directividad y simetría), se realiza una comparativa entre los valores de este parámetro obtenidos por cuatro métodos diferentes.

### INTRODUCCIÓN

El índice de directividad de una fuente en una determinada dirección se define como 10 veces el logaritmo decimal de la intensidad radiada en la dirección considerada y la intensidad isotrópica. Es uno de los parámetros fundamentales a tener en cuenta a la hora de definir las características directivas de su radiación y de diseñar sistemas de refuerzo sonoro. Para el caso de la dirección en el eje, se tiene:

$$DI(0,0) = 10 \log Q = 10 \log \frac{I(0,0)}{I_{ISO}} = LI(0,0) - LI_{ISO}$$

La intensidad isotrópica se calcula integrando el valor de la intensidad sobre los  $4\pi$  Sr de radiación (o lo que es lo mismo, calculando la potencia de la fuente y dividiendo por la superficie de una esfera cuyo radio sea la distancia del centro acústico de la fuente al punto de medida)

$$I_{ISO} = \frac{1}{4\pi r^2} \iint I(\Omega) d\Omega \cong \frac{\sum_{i=1}^N I_i \Omega_i}{\sum_{i=1}^N \Omega_i} \quad I_{ISO} = \frac{W}{4\pi r^2}$$

Siendo N el número de medidas realizadas.

La obtención de la intensidad isotrópica a partir de una integración discreta de  $I(\mathbf{W})$ , es un proceso laborioso, cuyos resultados serán más fiables cuanto más fina sea la discretización de la esfera. En el presente estudio, se han efectuado medidas de nivel de intensidad para cada incremento de diez grados de  $\mathbf{j}$  y  $\mathbf{q}$  lo que conduce a un total de 650 medidas en fuentes asimétricas (344 si se da un plano de simetría).

Dada la complejidad de obtención del índice de directividad a partir de este tipo de mediciones, se suele optar por los métodos aproximados. En el presente trabajo se evalúan los resultados obtenidos a partir de los métodos más frecuentes y serán asimismo sometidos a evaluación otros dos, basados en la obtención de la potencia de la fuente según sendos métodos normalizados (ISO 3741, ISO 3744)

La medida de la intensidad en el eje acústico  $I(0)$ , necesaria en todos los procedimientos citados, se ha llevado a cabo de igual modo en todos ellos.

## MÉTODOS EVALUADOS

A continuación se presentan las características distintivas fundamentales de cada uno de los procesos llevados a cabo en las fuentes sometidas a estudio. Como se ha comentado, en todos ellos se necesita de una medida del nivel de presión en el eje acústico realizada en campo libre, o cámara anecoica.

### M0.- Integración Discreta

Este es el método más laborioso y que aporta los resultados más fiables, de modo que juzgaremos el resto en función de la similitud de los resultados respecto a éste.

### M1.- Cámara Reverberante

La potencia se mide según método de precisión en cámara reverberante (ISO 3741). Se precisa, asimismo de la medida de  $I(0)$  en cámara anecoica; por lo que presenta el inconveniente de la necesidad de disponer de ambos tipos de entornos. Evidentemente debe conocerse la distancia fuente micrófono en cámara anecoica y poderse reproducir la misma señal en la medida de  $I(0)$  y de la potencia.

### M2.- Superficie Imaginaria De 24 Puntos

La medida de la potencia se efectúa según método de peritaje normalizado de la esfera imaginaria de veinticuatro puntos (ISO 3744).

### M3.- Ángulo De Cobertura -6db

En este caso, el Índice de directividad se estima con la siguiente expresión:

$$DI = 10 \log \frac{P}{\arcsin \left( \sin \frac{\mathbf{q}_H}{2} \cdot \sin \frac{\mathbf{q}_V}{2} \right)}$$

en ella se está suponiendo que toda la energía se radia a través de una ventana definida por los ángulos de cobertura  $\mathbf{q}_H$  y  $\mathbf{q}_V$ , que son aquellos, en los planos horizontal y vertical, en los que el nivel de presión es seis decibelios inferior al nivel en el eje acústico.

### M4.- Ejes Horizontal Y Vertical

Se trata de una simplificación del método de integración discreta. Partimos de que la intensidad radiada depende en gran medida del valor del ángulo  $\mathbf{q}$  pero es prácticamente independiente del valor de  $\mathbf{j}$ . De este modo, la discretización de la esfera se efectúa de un modo heterogéneo, fijando los incrementos de la componente  $\mathbf{j}$  en valores de  $90^\circ$ , lo cual da lugar a circunferencias correspondientes a los planos perpendiculares (horizontal y vertical). En nuestro caso los incrementos de  $\mathbf{q}$  serán de  $10^\circ$ .

La referencia a los valores del índice de directividad obtenidos por cada uno de los métodos, se hará, en adelante, con la siguiente notación: DI, DI (Rev), DI (Sup24), DI (-6dB), DI (HV) respectivamente.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### Fuentes Estudiadas

Se ha hecho uso de dos fuentes de muy distinta geometría, ambas con simetría respecto a sus mitades izquierda y derecha. La primera de ellas es un recinto acústico tipo bass-reflex convencional con forma paralelepípeda (Fuente 1); mientras que la segunda consiste en un dispositivo formado por dos motores adaptados a sus correspondientes bocinas, compartiendo su eje acústico (Fuente 2).

### Toma De Medidas

Todas las mediciones se han realizado en las cámaras anecoica y reverberante<sup>4</sup> de la Escuela Politécnica Superior de Gandía; utilizando equipo (anализador y micrófonos) de clase 1.

Como se ha comentado, ambas fuentes presentan simetría respecto a un plano; por lo que, para el cálculo de DI, se han realizado medidas en media esfera. Éstas se efectúan simultáneamente con dos micrófonos, el primero de ellos sondeando los dos octantes anteriores, y el segundo los posteriores. Los citados micrófonos se sitúan fijos y equidistantes del centro de la fuente, y ésta experimenta movimientos de rotación controlados por un autómata programable manipulado desde PC.

Para el cálculo de DI(Sup24) se hace uso del mismo dispositivo, tomando medidas en doce posiciones diferentes.

El cálculo de DI(-6dB) y DI (HV) se realiza a partir de un conjunto reducido de medidas seleccionadas entre las necesarias para la obtención de DI.

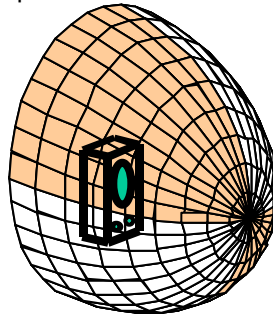


Fig1.- Los nodos de los octantes sombreados representan los puntos de medida del micrófono 1

En cuanto al equipo de apoyo, controlador de la posición de la fuente, destacar:

- Mínimo incremento por paso: 1°
- Ejes de rotación no coincidentes con  $j, q$  error adicional máximo por redondeo a múltiplos de un grado (ver fig 1) menor de 0'71°.

## RESULTADOS

### Diagramas Polares

De los diez diagramas polares obtenidos para cada una de las bandas de frecuencia entre 100 Hz y 10 kHz, se muestra el diagrama en el plano vertical ( $j=90^\circ$ ) para los casos más destacables. (Fig. 2)

Se observa, en general, un aumento de la omnidireccionalidad de la fuente conforme disminuye la frecuencia, no obstante existen rangos frecuenciales en los que se da el fenómeno inverso; por ejemplo entre 1 y 2 kHz en la "fuente 2". Esto se debe a que se trata, en realidad, de dos fuentes,

una para bajas frecuencias y otra para altas y medias, de menores dimensiones y por ello menos directiva. En la "fuente 1" la directividad a 4kHz es mayor que en frecuencias superiores y a 2'5kHz es notablemente baja. (Véase también Fig. 3).

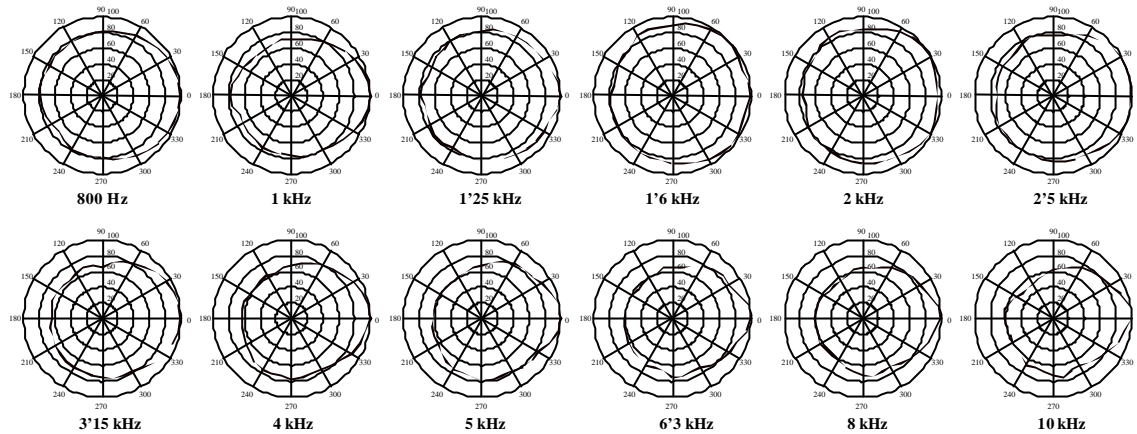


Fig. 2a.- Diagramas polares en el plano vertical ( $\phi=90^\circ$ ) de la "fuente 2" en bandas de tercio de octava. Nótese que la directividad disminuye entre las bandas de frecuencia de 1kHz y 2 kHz (en esta última banda se observa interferencia destructiva en el eje acústico)

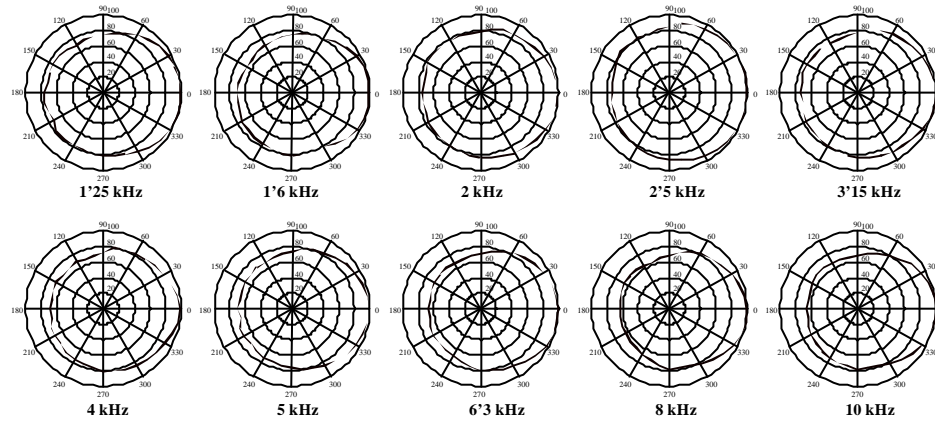


Fig. 2b.- Diagramas polares en el plano vertical ( $\phi=90^\circ$ ) de la "fuente 1" en bandas de tercio de octava. Nótese que la directividad a 4 kHz es mayor que la de frecuencias superiores; mientras que a 2'5 kHz es notablemente baja.

### Índice de Directividad

A partir de las mediciones efectuadas se obtienen los resultados que se presentan a continuación en forma de gráfica (Fig. 3); los valores de DI (HV) no se incluyen en ésta y se presentan en la tabla posterior comparados con DI (Tab. 2).

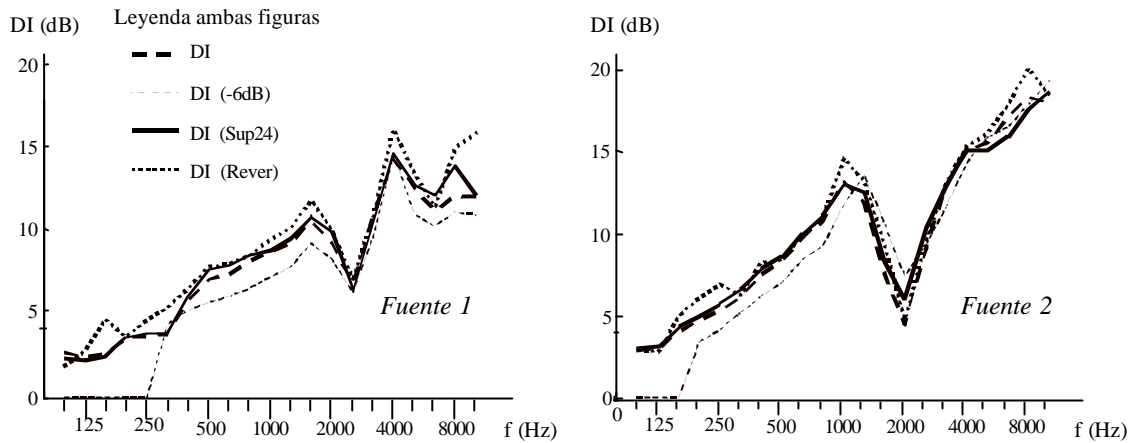


Fig. 3.- Índices de directividad por banda de tercio de octava según cuatro de los métodos evaluados. No se representa DI(HV) por su gran similitud con DI

f(Hz)	Fuente 1		Fuente 2	
	DI	DI (HV)	DI	DI (HV)
100	2.7	2.7	2.9	2.9
125	2.4	2.4	3	2.7
160	2.6	2.6	4.1	3.8
200	3.6	3.5	4.7	4.4
250	3.7	3.6	5.3	4.9
315	3.8	3.9	6.2	6
400	5.9	5.7	7.5	7.4
500	7.1	7.1	8.3	8.1
630	7.5	7.5	9.7	9.8
800	8.3	8.2	10.8	10.7
1000	8.8	8.3	13.2	12.8

F(Hz)	Fuente 1		Fuente 2	
	DI	DI (HV)	DI	DI (HV)
1260	9.4	9.2	11.9	10.4
1600	10.6	10.1	7.6	8.3
2000	9.4	9.1	4.5	6
2500	6.9	6.9	9.2	10.1
3150	10.9	10.4	13	13.1
4000	14.5	14.1	15.1	14.9
5000	12.7	12	15.5	15.2
6300	11.3	10.8	17.1	16.8
8000	12.3	12.1	18.3	17.2
10000	12.1	11.8	18	17

Tab. 2.- Índices DI y DI(HV) de ambas fuentes

Se observa una mayor directividad de la "fuente 2" en prácticamente todas las bandas de frecuencia, en particular en aquellas en que trabaja el altavoz de graves, de grandes dimensiones ( $f_c < 1 \text{ kHz}$ ). En la "fuente 1" se da un fenómeno inusual y aparentemente injustificable, que es la dependencia inversa de DI con la frecuencia en ciertas regiones del espectro. La observación detallada de los diagramas polares para cada ángulo de inclinación (Fig.- 2) y la concordancia de todos los resultados, nos conducen a aceptar esta aparente incongruencia, si bien justificarla no es objeto del presente trabajo.

Hagamos notar que, independientemente de la fuente de que se trate, se observan una serie de particularidades relacionadas con cada uno de los métodos de cálculo de DI. En concreto, destacamos las siguientes evidencias (ver Fig. 4):

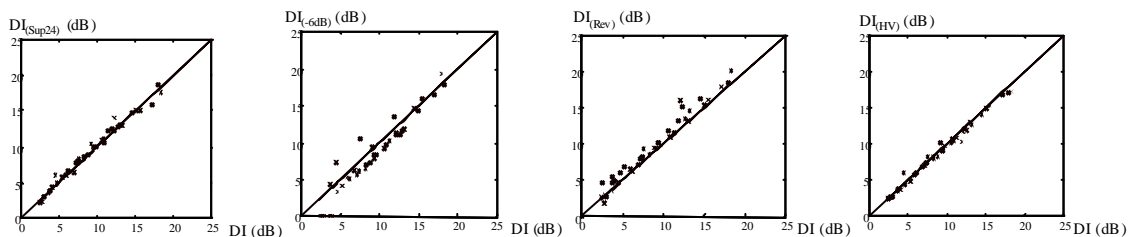


Fig 4.- Comparativa entre los índices de directividad obtenidos por integración discreta y los determinados por cada uno de los restantes métodos (Ambas fuentes).

- En todos los casos: la disparidad entre los valores obtenidos por cualquier método respecto al método de integración discreta no depende del tipo de fuente, ni directamente de la frecuencia, sino del propio valor de DI
- Método de la superficie imaginaria: Existe una buena correlación entre los valores obtenidos

de DI(Sup24) y los valores de DI. Los errores se cometen de forma aleatoria y no sistemáticamente por exceso o defecto, y su magnitud es prácticamente independiente del valor de DI, si bien puede intuirse que en situaciones muy directivas, éste error tiende a ser ligeramente superior

- Método del ángulo de cobertura: De la comparación se desprende que, pese a ser un método estimativo, los resultados son bastante aceptables. En todo caso, se cometen errores de forma sistemática por defecto, tanto mayores cuanto menos directiva es la fuente (no en vano, cuando el mínimo valor de la función de directividad es mayor de 0'5, el método es inaplicable). Asimismo la magnitud del error cometido es muy variable, no pudiéndose aplicar ningún tipo de corrección predeterminada.
- Método de la cámara reverberante: Se observa que, en el presente estudio se cometen errores por defecto; sin embargo, no se puede atribuir a una deficiencia del método de cálculo, sino a su alta dependencia de algunas variables tales como la medida exacta de la distancia entre el micrófono y el centro acústico de la fuente, o la determinación de los parámetros propios de la cámara reverberante (Volumen, superficie y tiempos de reverberación).
- Método HV: Se observa una muy buena correlación de sus resultados con los obtenidos por el método de la integración discreta, para las fuentes simétricas estudiadas.

## CONCLUSIONES

Comenzaremos haciendo mención a los dos métodos alternativos propuestos por los autores. Cabe en este sentido destacar la buena adecuación de los resultados obtenidos a partir del método de la superficie imaginaria. Creemos que es una alternativa razonable al procedimiento DI(HV) en los casos en los que la fuente no tenga una simetría claramente definida. Se ha estudiado asimismo la dependencia del valor de DI(Sup24) con la exactitud en la localización de los 24 puntos, y se observa que el método es sólido en este sentido; de modo que resulta fácilmente aplicable.

En cuanto al método de la cámara reverberante, que para la medida de la potencia es un método de precisión, el procedimiento resulta "frágil", por facilitar la comisión de errores considerables en el resultado final, si no se determinan exactamente las variables implicadas. Además, se debe garantizar que la señal emitida por la fuente en el recinto anecoico sea de idénticas características a la emitida en el recinto reverberante. Con todo, si se dispone de ambos recintos y se toman las precauciones pertinentes, es un método rápido que garantiza resultados bastante aceptables.

Respecto al método del ángulo de cobertura, se constata las limitaciones evidentes del mismo; principalmente en bandas de frecuencia en las que la fuente es poco directiva; pero, asimismo, hacer notar que los resultados esperados en el resto de situaciones en más que satisfactorio para un método de estas características. Además, curiosamente, ofrece resultados tanto mejores cuanto más directiva es la fuente; al contrario que el resto de métodos.

Y por último, referente al método de los ejes horizontal y vertical, comentar que los buenos resultados obtenidos son evidentemente predecibles en el caso de fuentes simétricas, que es el caso habitualmente encontrado; por lo que podría ser evaluado, en el caso de fuentes con asimetrías considerables.

Los resultados del presente trabajo permiten cuestionar la necesidad de efectuar medidas en toda la esfera de radiación con incrementos de sendos ángulos  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{q}$  de cinco en cinco grados, tal y como, sin embargo, parece estar imponiéndose en ciertos ámbitos, para determinar el índice de directividad.

## REFERENCIAS

- [1] UNE-EN ISO 3741, "Determinación de los niveles de Potencia acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de precisión en cámaras reverberantes", AENOR, (2000)
- [2] UNE-EN ISO 3744, "Determinación de los niveles de Potencia acústica de las fuentes sonoras a partir de la presión acústica. Métodos de peritaje en condiciones de campo libre sobre un plano"

---

*reflectante*", AENOR, (2000)

[3] Davis D., Davis C., "*Ingeniería de sistemas acústicos*", Marcombo (1983)

[4] Ramis J., Martínez J., Alba J. and Redondo J. "*Characterisation and Adjustment of the Reverberation Chamber at the Escuela Politécnica Superior de Gandia*" International Congress of Acoustics, Roma (2001)