TECNIACUSTICA
AVILA · 1999

RADIACIÓN ACÚSTICA: SOBRE ILUMINACIÓN SONORA DE SUPERFICIES

REFERENCIA PACS: 43.20 Wd

Andrés Lara Saenz
Sociedad Española de Acústica
Serrano 144
28006 Madrid

ABSTRACT

The directivity function for cone loudspeakers is related with main radiation parameters.

An analytic-geometrical analogy for symmetrical polar radiation diagrams is introduced and applied to the calculation of sound levels on irradiated surfaces from both horn and cone loudspeakers. Equal level contours are plotted on the illuminated surface.

The methodology relates the geometry of the illuminated area with basic radiation parameters.

RESUMEN

A partir de la Función de Directividad aplicables a radiadores de Diafragma, se establecen relaciones entre parámetros básicos de radiación.

Se introduce una analogía analítica-geométrica para diagramas polares de radiación simétrica, aplicable tanto a altavoces de Difusor como a Bocinas, que permite operar con la Función de Directividad.

La analogía se aplica a la radiación en campo libre, de bocinas y altavoces de Difusor simétrica, calculando los niveles sonoros sobre la superficie radiada, obteniendo líneas de nivel sonoro sobre el plano de radiación.

La metodología permite relacionar la geometría del área iluminada con parámetros de radiación y geometría de la situación de radiación.

1. PARÁMETROS Y RELACIONES BÁSICAS

Entre las variables que definen la radiación acústica de una fuente sonora, la Función de Directividad D (Φ, ϑ) , relaciona, en puntos del espacio, la amplitud de la presión acústica en la dirección (Φ, ϑ) , y la de mayor valor, que suele ser en la dirección la frontal o axial,

$$D(\Phi, \vartheta) = \frac{P(\Phi, \vartheta)}{P_{ax}}$$

En la mayoría de los casos, como cuando se trata de altavoces de cono o de Bocinas circulares, la radiación tiene simetría axial, por lo que basta definir la Función de Directividad en un plano axial, normalmente el plano vertical, en función del ángulo ϑ, con el eje.

La representación gráfica de la Función de Directividad en coordenadas polares, constituye el popular diagrama de radiación, expresado generalmente en escala logarítmica

Un parámetro importante en relación con la directividad, es el Factor de Directividad o de Concentración axial Q, relación entre la potencia radiada en la dirección frontal o axial y la potencia global radiada en todas direcciones

$$\mathbf{Q} = \frac{w_{ax}}{w_G} = \frac{p_{ax}^2 / Z_o}{\overline{p}^2 / Z_o} = \frac{I_{ax}}{I_G} \geq 1$$

Este factor es de gran utilidad en diseños de Refuerzos Sonoros, y es un dato que suelen incluir los catálogos técnicos de altavoces.

Siendo como es, un factor intrínseco del propio radiador, suele o puede ser influenciado por condiciones externas, tales como superficies reflectantes en sus proximidades.

En el caso de un radiador omnidireccional en el espacio libre, Q = 1, por definición. Si al radiador se le sitúa sobre una superficie reflectante de gran tamaño relativo, la misma energía radiada queda ahora confinada a un semiespacio por lo que Q = 2. Si se le sitúa en una arista de un diedro, el espacio radiado se vuelve a reducir otra mitad, por lo que Q = 4, y si se le sitúa en un vértice , Q = 8.

El Factor de Directividad expresado en dB, se denomina Indice de Directividad,

$$\mathrm{ID} = 10 \lg Q = 20 \lg \frac{p_{ax}}{\overline{p}_{dif}} \text{ dB} = L_{pax} - L_{p,omni}$$

En los casos anteriores ID valdría respectivamente 3, 6 y 9 dB

2. CÁLCULO DEL CAMPO ACÚSTICO RADIADO: OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE DIRECTIVIDAD

El estudio analítico del campo radiado por altavoces es un proceso complejo, en particular por el distinto comportamiento elástico del diafragma radiante con la frecuencia. A efectos cualitativos se recurre al estudio de la radiación de un pistón plano circular ideal (rígido).

Para ello se parte de una fuente ideal constituida por una esfera pulsante, cuyo radio al oscilar sinusoidalmente, expande y comprime la superficie S de la esfera, generando ondas esféricas.

En la interfase Esfera-Medio (aire en general), la continuidad de las ccomponentes normales de las velocidades de vibración de los puntos de la superficie de la esfera y de la onda permite obtener el valor de la amplitud de la onda de presión en función del radio de la esfera, su amplitud de velocidad de vibración,U_o, y de la impedancia de onda esférica, Z= p/u (**Ref.1**)

$$\mathbf{P} = \frac{\rho c k a^2 U_o}{r} = \frac{\rho c k\, 4\pi a^2 U_o}{4\pi r} = \frac{\rho c k}{4\pi r} H$$

siendo $H = 4\pi a^2 U_o$ la velocidad de desplazamiento de volumen, o Poder de la fuente

Este valor de la presión ha sido obtenido en base a una fuente esférica de pequeña dimensión respecto a la longitud de ondas radiadas, ($ka \leq 1$), lo que constituye una fuente simple esférica. independientemente de su forma, cualquier fuente que cumpla con esta condición, radia la misma presión, siempre que tenga el mismo Poder.

Si una tal fuente simple se sitúa sobre un plano de dimensiones mayores que las longitudes de onda radiadas (Bafle o pantalla acústica), la amplitud de la presión se duplicará, (Q=2). Si elegimos como fuente simple un elemento diferencial de superficie ds, del pistón radiante, estamos en el caso de una fuente simple sobre pantalla acústica, con un Poder $dH = ds \cdot U_o$, luego la amplitud de la onda radiada será,

$$\mathbf{dP} = \frac{\rho c k}{2\pi r} U_o \cdot ds$$

Integrando en toda la superficie del pistón, se obtiene finalmente para la amplitud de la onda radiada,

$$P(r, \vartheta) = \frac{\rho c k}{2\pi r} H \left[\frac{2 J_1 (ka \operatorname{sen} \vartheta)}{ka \operatorname{sen} \vartheta} \right]$$

siendo $H = \pi a^2 U_o$, el Poder del pistón, $k = \omega / c$ el número de onda, a el radio del pistón, U_o la amplitud de la velocidad de vibración del pistón, y J_1 la función de Bessel de 1ª clase y orden uno.

La parte fuera de corchetes, coincide con la radiación omnidireccional de una fuente simple de poder H. La expresión entre corchetes define la Función de Directividad $D(\vartheta)$, que por tener varios ceros da lugar a la aparición de lóbulos en el diagrama polar de radiación

Otras características cualitativas, incluyen la mayor o menor anchura de los lóbulos, según el valor del producto ka, es decir la frecuencia y las dimensiones del radiador, o lo que es lo mismo la relación a/λ, ya que $k = 2\pi f/c = 2\pi/\lambda$

Para valores pequeños de a/λ, (radiadores de poco diámetro, o frecuencias bajas),la función de directividad es prácticamente la unidad, independiente del ángulo de radiación, por lo que el altavoz radia ondas esféricas, o circunferencias en el diagrama polar plano, como una fuente simple.

Al aumentar la frecuencia o el tamaño del altavoz, la función $D(\vartheta)$ deforma los círculos hasta llegar la aparición de lóbulos.

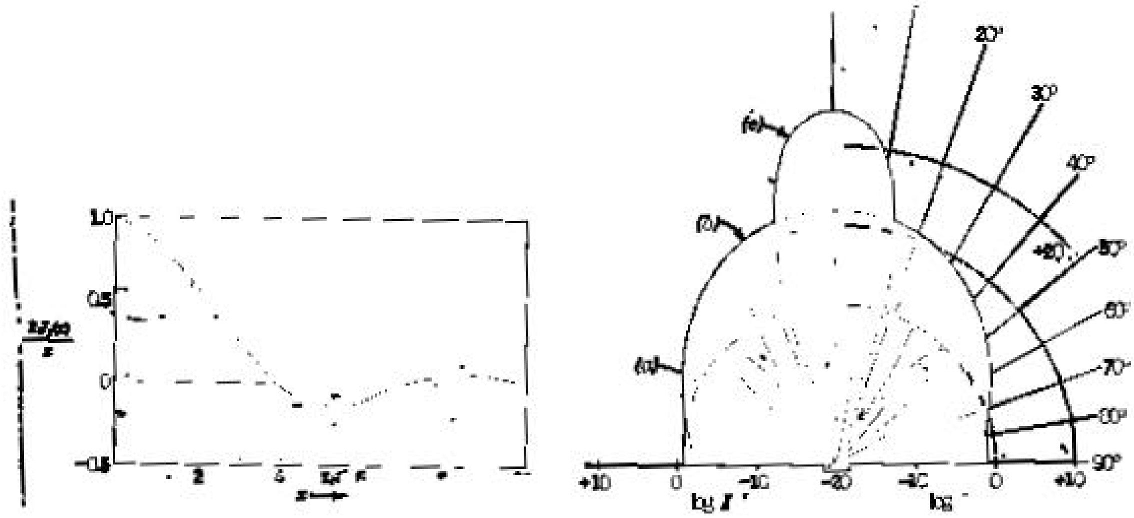


Figura 1. Radiación de un pistón ideal: a) Función de Directividad; b) Diagrama polar a 3 frecuencias.

La literatura técnica-comercial, suele incluir curvas para determinados valores de frecuencias en bajas, medias y altas , y los correspondientes valores aproximados del factor de concentración axial o frontal Q.

3. ANGULO DE COBERTURA $\hat{C}$ Y SU RELACIÓN CON EL FACTOR DE DIRECTIVIDAD Q

En el diagrama polar de radiación, D(ϑ), generalmente simétrico respecto al eje, se define el ángulo de cobertura. $\overset{\frown}{C}$, como aquel para el cual la función de directividad disminuye en una determinada proporción. Comúnmente se refiere a una reducción a la mitad de su valor, o lo que es lo mismo -6 dB en escala logarítmica, (a veces se incluyen a -3 y -9 dB).

El ángulo de cobertura y el factor de directividad Q, están relacionados, si bien no es fácil su deducción.

En el caso teórico que toda la energía pasase por la superficie delimitada por el ángulo de cobertura espacial $\overset{\frown}{C}(\Phi, \vartheta)$, es decir por la superficie intersección de los dos segmentos esféricos correspondientes, la ecuación siguiente debida a **Molloy** (Ref. 2), da el valor de Q en función de los ángulos de cobertura horizontal y vertical:

$$Q = \frac{180}{\text{arc sen}\left[(\text{sen}\,\Phi/2)\cdot(\text{sen}\,\vartheta/2)\right]} = \frac{\text{area de esfera unidad}}{\text{area del sector}} = \frac{1}{\text{area del sector}}$$

Si hay simetría espacial de radiación, (Altavoces de Cono o Bocinas de sección circular), $\vartheta = \Phi = \alpha$ y

$$Q = \frac{180}{\arcsin(\mathrm{sen}^2 \alpha / 2)}$$

.

Inversamente, el sector esférico de formato cuadrado correspondiente a una determinada Q, viene dado por:

$$\alpha = 2 \text{ arc sen } \sqrt{\mathrm{sen}\,180/Q}$$

Para radiación esférica, Φ = 360º y ϑ = 180º, y para la hemiesférica $\Phi = \vartheta = 180^o$ o en nuestra nomenclatura $\widehat{C}$ (360, 180), respectivamente .

. Un Nomograma**,** permite calcular tanto Q como ID a partir de los ángulos de cobertura Φ y ϑ, (en el caso ideal de que toda la energía radiada pase por la superficie delimitada por los ángulos que definen la cobertura).

Las fórmulas anteriores sirven para relacionar aproximadamente la Q y el ángulo de cobertura, en situaciones no muy alejadas del caso ideal, i.e. cuando no hay lóbulos secundarios de radiación y además el lóbulo principal cae rápidamente a partir del ángulo de cobertura.

Existen distintos procedimientos basados en técnicas geométricas para determinar con variada precisión, esta relación.. El método clásico consiste en dividir la esfera en superficies de áreas iguales y medir en sus puntos centrales el nivel sonoro L_{Pi} radiado por la fuente situada en el centro de la esfera, o semiesfera. Si n es el número de puntos, el valor medio de L_p será:

$\overline{L}_p = 10 \lg \dfrac{\Sigma_1^n 10^{L_{pi}/10}}{n}$ dB, y el valor de Q , por definición, $10 \lg Q = L_{p,ax} - \overline{L}_p$

E el caso de altavoces unitarios o simples, el diagrama de radiación suele tener simetría axial de revolución, por lo que basta conocer el diagrama polar en un plano axial, para frecuencias bajas, medias y altas.

Cuando se trata de altavoces sin simetría esférica, "Alineaciones" (Arrays), o "Conglomerados" (Clusters) de altavoces, se requieren al menos dos diagramas, uno en el plano vertical y otro en el horizontal. En algunos casos mas complejos es conveniente disponer además de diagramas en planos diagonales.

4. "TRANSPARENCIAS DE ISOCOCOBERTURA ANGULAR". (OVERLAYS)

Una técnica relativamente reciente en relación con la directividad para casos complejos, es incluir entre los datos de sistemas radiantes, los llamados "Overlays", o "Transparencias de superposición de Isocobertura", que contienen contornos de iguales ángulos de cobertura espacial, correspondientes a, -3; -6 e incluso -9 dB.(Figura 2)

En realidad de trata de las intersecciones de esferas concéntricas, de radios, -3; -6 y -9 dB, con los conoides coaxiales respectivos.

Constituyen una ayuda en el diseño de sistemas de distribución sonora, en particular para aquellos sistemas radiantes que no tienen simetría axial de radiación.

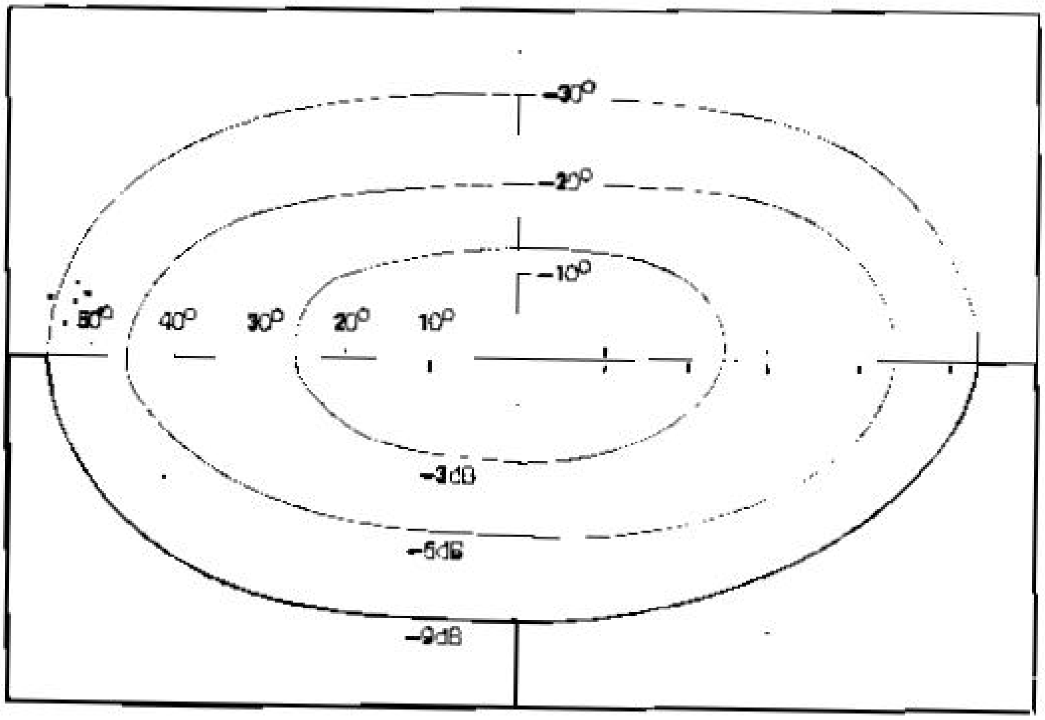


Figura 2. Transparencia de contornos de ángulos de cobertura de -3, -6 y -9 dB

5. POTENCIA ELÉCTRICA DE PROGRAMA

La Potencia Eléctrica de Programa, se refiere al valor medio de la potencia de discurso hablado o de programa musical, ampliado en un margen, normalmente de 10 dB, para reproducción de picos propios de ambos tipos de señales. No hay que confundir este margen, con el margen dinámico, que se refiere, a la diferencia en dB entre los niveles de los pasajes débiles y fuertes.

Para la palabra, la relación de pico a valor eficaz es del orden de 10 dB para intervalos de tiempo de 1/8 de segundo (tiempo medio silábico). Pero teniendo en cuenta que la probabilidad de aparición de picos de hasta 12 dB en la palabra es del 1%, se puede aplicar como suficiente un margen de 13 dB para la palabra, lo cual sigue siendo válido para la música en general. Ahora bien , como la relación entre valores de pico y eficaz en señales armónicas es de 3dB, es razonable, excepto para exigencias de alta fidelidad, el disponer en total de un margen de 10 dB sobre el valor medio de potencia, es decir un factor de 10

6. RENDIMIENTO ELECTROACÚSTICO η Y RELACIÓN CON LA SENSIBILIDAD L_{P1} Y Q

Se entiende por rendimiento electroacústico el cociente entre la potencia acústica radiada y la potencia eléctrica total consumida por el altavoz,

$$\eta = \frac{w_a}{w_e}$$

El rendimiento electroacústico depende fundamentalmente del tipo de altavoz. En general es bastante bajo, difícil de pasar del 25%, siendo valores corrientes los comprendidos entre 1 y 5 % para altavoces normales de cono y valores mas altos para los de tipo bocina. Naturalmente, al igual que las otras características de altavoces, el rendimiento varia también con la frecuencia.

Como no es fácil medir la potencia acústica radiada, y el rendimiento electroacústico η está directamente relacionado con otras características, en concreto con el Nivel normalizado de sensibilidad L_{p1} y el factor de Directividad Q, conocidos dos de estos parámetros se puede deducir el tercero.

En efecto, por definición, $Q = \frac{I_{ax}}{I_{omn}}$ y $L_{p1} = 10 \lg \frac{p_1^2}{4 \cdot 10^{-10}}$

siendo p_1 la presión acústica en el eje referida a 1 m de distancia, para una potencia eléctrica de 1 w.

Refiriendo también las intensidades acústicas para 1 w eléctrico y 1 m,

$$I_{ax} = \frac{p_1^2}{Z_0} = I_{omn} \cdot Q = \frac{w_a}{4\pi} Q = \frac{\eta \cdot 1w \cdot Q}{4\pi} \quad \text{y por tanto} \quad Q = \frac{4\pi\, p_1^2}{400 \cdot \eta}$$

pero, $p_1^2 = 4 \cdot 10^{-10} \cdot \text{anti}\lg L_{p1}/10 = 4 \cdot 10^{-10}\ \ 10^{Lp1/10}$

luego, $Q = 12{,}26 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{10^{Lp1/10}}{\eta}$.

Expresión que relaciona los tres parámetros, η, Q y L_{p1}, de la que se puede deducir, por ejemplo, el rendimiento electroacústico a partir de los datos de Q y L_{p1},

$\eta = k_0/Q \cdot 10^{L_{p1}/10}$ siendo $k_0 = 12{,}26 \cdot 10^{-12}$

Así, para un altavoz con, Q = 6 y L_{p1} = 100 dB, su rendimiento electroacústico es,

$$\eta = \frac{12{,}26 \cdot 10^{-12}}{6} 10^{100/10} = 2{,}04 \cdot 10^{-2} \approx 0{,}02 = 2\ \%$$

lo cual permite obtener la potencia acústica radiada a partir de la potencia de Programa.
Análogamente, se obtendrían los otros dos parámetros.

7. ALTAVOCES DE RADIACIÓN DIRECTA, DE DIFUSOR O CONO

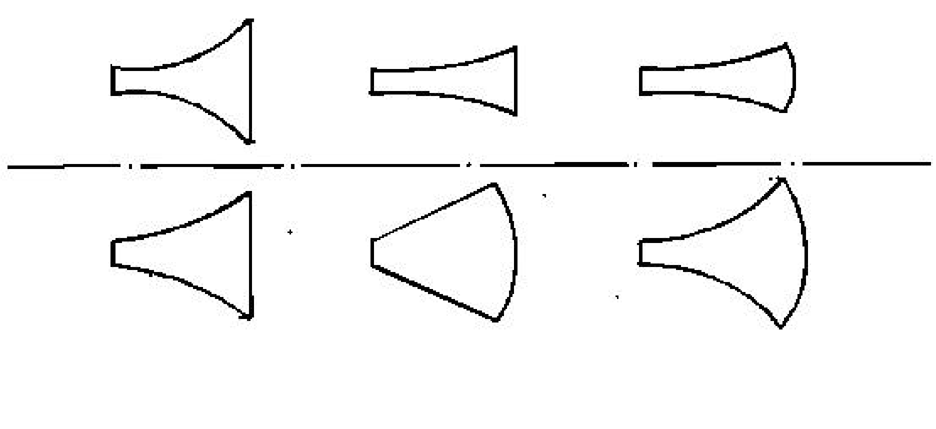
A efectos de directividad y diagrama polar de radiación, se recurre a la analogía con la radiación de simetría espacial axial, de un pistón ideal, referido en párrafos anteriores. Una aproximación analítica se obtiene, como veremos a continuación de las Bocinas, por equiparación a un elipsoide de revolución truncado.

8. ALTAVOCES TIPO BOCINA

Los diagramas de radiación dependen del tipo de bocina. Dentro de las de expansión exponencial, la bocina puede ser Circular, con radiación de simetría axial, o bien "Rectangular" con igual o distinta apertura en los planos horizontal y vertical., con lo que se consiguen distintos ángulos de cobertura en ambos planos.

La boca de la bocina puede ser Plana o del tipo Radial, llamados así por estar formados por un sector del sólido de revolución generado por un perfil exponencial girando radialmente alrededor de un eje que pasa por el centro acústico de la bocina

Las superficies laterales del Sector son planas con perfiles exponenciales. Una variante lo constituyen los llamados Birradiales, en los que las secciones laterales del sector en lugar de ser planas son también superficies exponenciales (**fig. 3**).



a) **b)** **c)**

Figura 3. Tipos de Bocinas**: a)** Simétrica; **b)** Radial ; **c)** Birradial.

Una manera de presentar la directividad es dando la variación del ángulo de cobertura (generalmente a –6 dB) en función de la frecuencia. La **figura 4 a, b y c** corresponden a bocinas típicas, simétricas, radiales y birradiales En ellas se observa la mayor constancia de cobertura, con la frecuencia, de las bocinas birradiales.

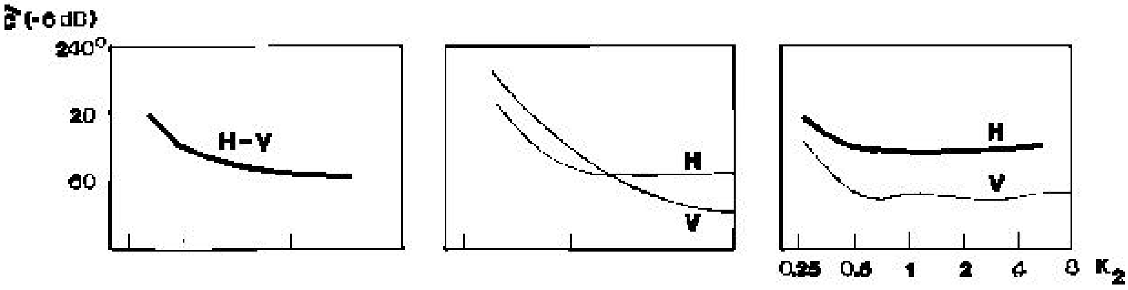


Figura 4. Bocinas. Espectro en función de Cobertura: **a)** Simétricas; **b)** Radiales; c**)** Birradiales

9. APROXIMACIÓN ANALÍTICA – GEOMÉTRICA DE LOS DIAGRAMAS DE RADIACIÓN

El diagrama polar de radiación de una bocina exponencial de sección circular, se aproxima a un elipsoide de revolución, coaxil, con origen en el centro acústico, y con excentricidad e = c/a del orden de 0,9 en que c y a son las semilongitudes focal y axial de la sección elíptica (**Fig 5**)

La ecuación del radio vector desde el centro acústico a puntos de la elipse, se deduce ser, (Ref. 3)

$$r \approx \frac{2a\ \cos\vartheta(1-e^2)}{1-e^2\ \cos^2\vartheta}$$

expresión que dividida por la longitud axial, 2a, corresponde, por definición, con la función de directividad

$$D(\theta) = \frac{r}{2a} \approx \frac{\cos\vartheta(1-e^2)}{1-e^2\cos^2\vartheta}$$

A menor excentricidad, por ejemplo 0,85 la elipse se ensancha aumentando el área del plano horizontal cubierto, o intersección del elipsoide con el plano donde se sitúa la audiencia.

Esta analogía analítica-geométrica, permite calcular para distintas excentricidades los valores numéricos de la directividad a distintos ángulos, y por tanto la cobertura para distintos valores de atenuación (- 3 dB, -6 dB, o incluso -9 dB),lo cual supone información importante a la hora de proyectar la iluminación sonora de distintas áreas.

El cuadro adjunto, da los valores del módulo del vector que representa la función de directividad para distintos ángulos, en base a diagramas polares elípticos con excentricidades de 0,85 y 0,90.

ϑ º	D(ϑ)	
	ε =0,85	ε = 0,90
20	0.78	0.63
30	0.53	0.42
40	0.37	0.3
50	0.28	0.2
60	0.17	0.05
70	0.05	0.0225

Para ε = 0,85 el ángulo de cobertura de –6 dB (D=0,5) corresponde a un ángulo de 31º; y para ε = 0,9 el ángulo de cobertura seria de 26, como corresponde a una elipse mas alargada.

10. RADIACIÓN EN CAMPO LIBRE; ILUMINACIÓN SONORA DE UNA SUPERFICIE

Presentamos a continuación el modo de utilizar las características direccionales (diagrama polar) de los altavoces para mejor cubrir (Iluminar) con nivel sonoro uniforme (dentro de una aceptable variación en dB) un determinado espacio, analizando el caso simple de radiación directa de un solo Altavoz, con simetría axial, sobre una superficie plana, **a)** Bocina correspondiente a los datos del caso anterior, (**fig. 5),** y **b)** Altavoz de difusor.

a) Altavoz de Bocina. La Función de Directividad en un plano axial, (dentro de un determinado margen de frecuencias),viene dada, para cualquier forma del diagrama de radiación, por

$$D(\vartheta) = \left.\frac{p_\vartheta}{p_{ax}}\right]_r = \frac{r_\vartheta}{r_{ax}}$$

Es decir la presión en <u>puntos a la distancia r</u> (circunferencias en un plano axial) en la dirección del ángulo ϑ, viene dada por la relación <u>directa</u> entre los módulos del radio vector correspondiente del diagrama polar, r_ϑ y el radio vector máximo o axial, r_{ax}

Admitiendo, en la hipótesis acústica, ondas esféricas, la presión en campo libre variará, para todo ángulo, inversamente con la distancia al origen , luego la presión en puntos del espacio correspondientes a la distancia r_ϑ del diagrama, estarán con respecto a la presión máxima o axial, precisamente, en relación <u>inversa</u> de los radios vectores correspondientes, es decir, los puntos espaciales sobre el diagrama polar son puntos <u>isóbaros</u>. y por tanto los puntos de intersección A,B, de la línea del plano, a iluminar, con el diagrama de directividad, tienen la misma presión máxima,o axial.

Los diagramas de Directividad son, en cuanto geometría espacial, líneas isobaras y por tanto los <u>puntos</u> de intercesión con una linea secante tienen el mismo nivel de presión, aunque estén, necesariamente, a distancias distintas de la fuente.

La presión en puntos x de la superficie a iluminar, será: $p_x = p_{ax} \cdot \frac{r_\vartheta}{r_x}$

Ahora bien, r_ϑ coincide con r_x en los puntos en los que el diagrama de radiación corta a la superficie a iluminar. La presión en esos puntos coincide con la presión en el punto mas alejado, que en nuestro ejemplo corresponde a un ángulo $\vartheta \cong$ 31º, para el cual la directividad o relación de presiones se reduce a la mitad, (- 6dB), reducción que se compensa exactamente con el aumento de presión por razón de estar ese punto a la mitad de distancia de la fuente.

La variación de nivel en la línea de iluminación viene dada en dB por el cociente r_ϑ / r_x , positivo entre A y B, y negativo fuera de ambos extremos; $\Delta L = \pm\, 20 \lg r_\vartheta / r_x$

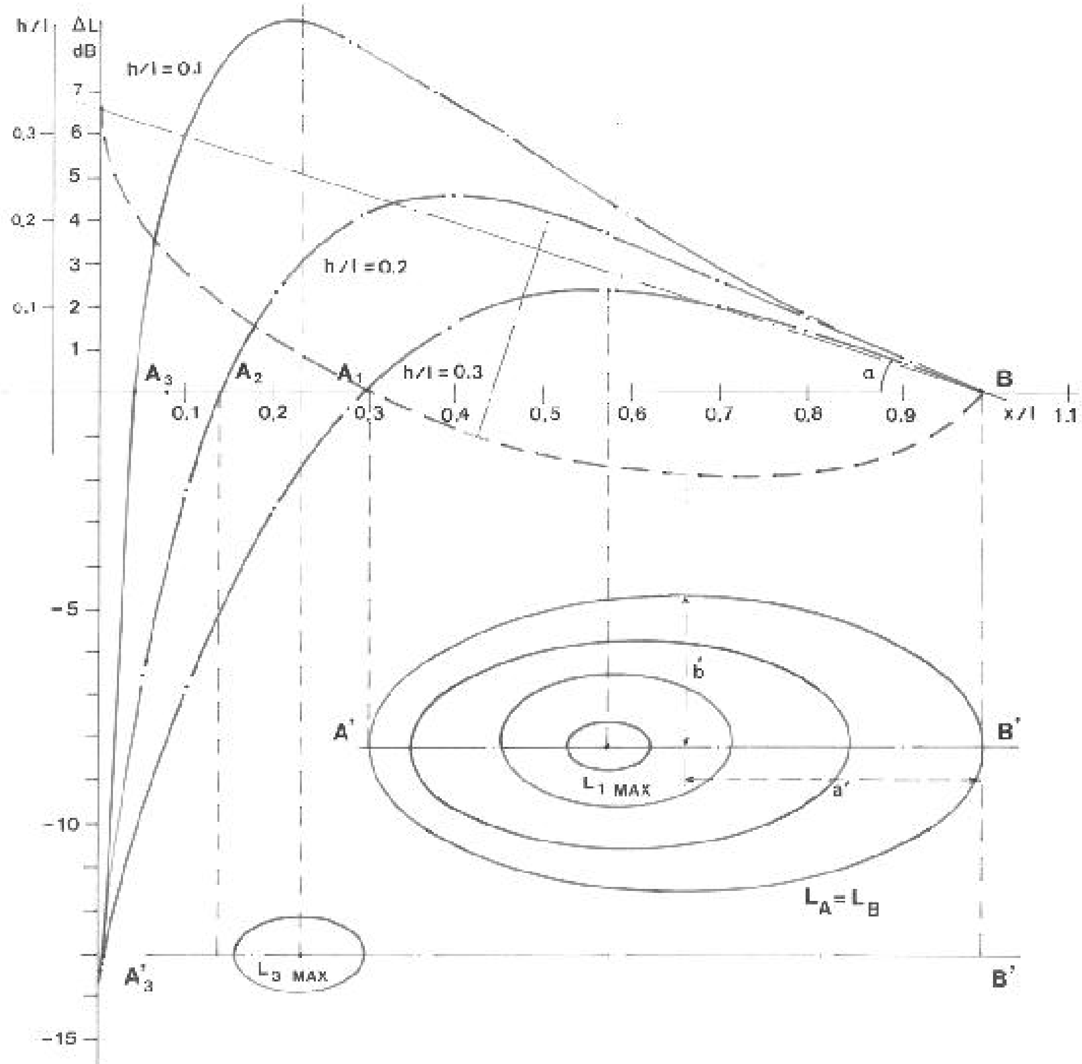


Figura 5. Iluminación, de una superficie plana por altavoz de Bocina**,** en campo libre.

La relación h/l, y por tanto la inclinación α del diagrama, juega un papel importante a la hora de ajustar la línea o área útil de iluminación. En general a menor inclinación, mayor área iluminada (A veces es más cómodo referirse al ángulo que forma el altavoz con la vertical)

La inclinación puede elegirse de modo que el punto A coincida con el origen de distancias (x_A = 0), o bien valores positivos o negativos.

Para tener en cuenta el ángulo de inclinación α, basta incluir las relaciones,

r_{ax} = h/sen α y rx= h/sen ($(\alpha+\vartheta)$, con lo que

$$p_x = p_{ax}\,\frac{\mathrm{sen}(\alpha+\vartheta)}{\mathrm{sen}\,\vartheta}\,D\,(\vartheta),$$

expresión que permite calcular directamente las presiones en la zona de iluminación y definir sus límites, a partir del conocimiento de la función de directividad

Para altavoces de bocina, una aproximación analítica de la función de directividad se corresponde (Párrafo anterior) con una elipse coaxial a partir del centro acústico de la bocina, con excentricidad, ε = c/a, del orden de 0,9, con lo que se tendrá para la relación de la variación de la presión a lo largo de la línea de iluminación con respecto a la presión axial (máxima)

$$\phi(x) = p_x / p_{ax} = \frac{\mathrm{sen}(\alpha+\vartheta)}{\mathrm{sen}\,\vartheta}\,\frac{(1-\varepsilon^2)\cos\vartheta}{1-\varepsilon^2\cos^2\vartheta}$$

Desarrollando sen($\alpha+\vartheta$) y usando las relaciones trigonométricas apropiadas se obtiene finalmente la expresión

$$\phi(x) = \frac{(1-\varepsilon^2)\,(1+\cot\alpha\ \mathrm{tg}\,\vartheta)}{(1-\varepsilon^2)+\mathrm{tg}^2\,\vartheta}$$

Esta función tiene un máximo para

$$\mathrm{tg}\ \vartheta = \frac{-1+\sqrt{1+\cot g^2\alpha\,(1-\varepsilon^2)}}{\cot g\,\alpha}$$

Para distintos valores de cotg α = *l*/h se obtienen los valores de ϑ correspondientes a los puntos de máxima desviación de nivel de presión $\phi(x)$ a lo largo de la línea de iluminación, $\Delta L = 20\ \lg\phi\,(x)$, lo que permite definir la inclinación apropiada a la máxima desviación de nivel que se admita en el proyecto.

En base al margen de desviación de nivel admitido, se puede extender el área de iluminación por ambos puntos extremos, teniendo en cuenta que la función $\phi(x)$, cae mas abruptamente para valores negativos antes del punto A que después del B.

En la **figura 5.** están representadas tres curvas de la función $\phi(x)$ para elípses con excentricidad de 0,9 y tres valores de la inclinación h/*l*, (0,1; 0,2 y 0,33). (Es de notar la coincidencia de las tres curvas a partir del punto B), de acuerdo con los valores puntuales obtenidos utilizando las expresiones anteriormente deducidas, incluidos los valores máximos de las desviaciones de nivel sonoro.

En cuanto al área de iluminación sonora o “sonorización”, al tratarse de altavoces con simetría axial, el diagrama de radiación en el plano horizontal es análogo que en el vertical. En realidad se trata, en el espacio, de un elipsoide de revolución, cuya sección por el plano de la superficie a iluminar son también elipses, con una excentricidad $\varepsilon' = \varepsilon \cos\alpha$ (más anchas), que para diferentes inclinaciones forman líneas isobaras, a modo de plano topográfico, a partir de los niveles máximos correspondientes a las proyecciones de los distintos máximos de $\phi(x)$.

b**)** En el caso de **Radiadores de difusor o Cono**, el proceso es el mismo, pero la aproximación analítica al diagrama de radiación corresponde a una elipse coaxial con el eje del altavoz, con origen de coordenadas, coincidentes, en este caso, con su centro acústico.,(**Fig. 6**)

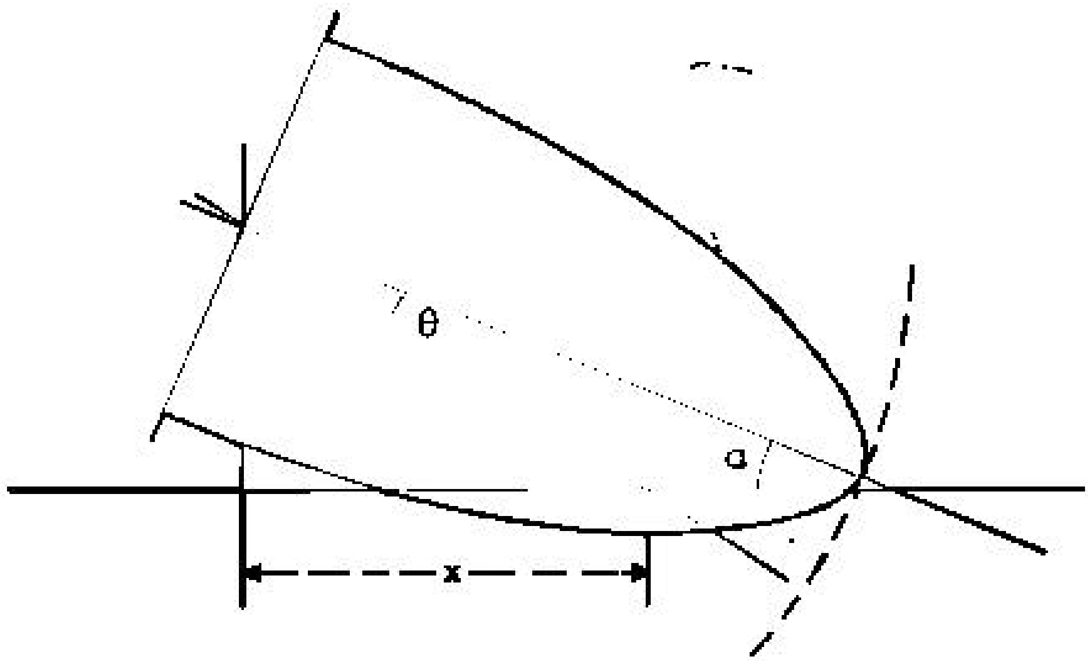


Figura 6. Iluminación Sonora de una Superficie, en campo libre, por altavoz tipo Difusor

En este caso la expresión analítica de la elipse en coordenadas polares referidas a su centro, y en función de la excentricidad ε = c/a, da para el radio vector en la dirección ϑ

$$r_\vartheta = \sqrt{\frac{a^2(1-\varepsilon^2)}{1-\varepsilon^2\cos^2\vartheta}}$$

con lo que la función de directividad viene dada en este caso por $D(\vartheta) = r_\vartheta / a$ i.e.

$$D(\vartheta) = \sqrt{\frac{1-\varepsilon^2}{1-\varepsilon^2 \cos^2\vartheta}}$$

El valor de la excentricidad será el que más se adapte a los diagramas de radiación del altavoz o sistema de altavoces correspondientes. En general estará en las proximidades de 0,9.

El resto del cálculo de iluminación sigue un proceso paralelo al caso anterior de las bocinas.

REFERENCIAS

1. Kinsler L.E. & Frey A.R. Fundamental of Acoustics, Chapman & Hall New York
2. Molley T.C. Calculation of the Directivity Index for various types of Radiators. JASA, Vol. 20,
3. Lara Saenz A. y Fuchs L.G. Acústica Aplicada (En prensa)