

Distorsión acústica de un arreglo en línea

Originalmente una bocina se utilizaba para incrementar la salida acústica de un transductor aportando una carga apropiada al mismo en vez de hacerlo emitir directamente al ambiente abierto (en este último caso, las impedancias de salida y de carga serían tan diferentes que no se entregaría la energía a esta última, sino que regresaría al generador reflejándose sucesivamente).

Como enunció Harry Olsen en su libro "*Acoustical Engineering*", "La principal virtud de una bocina reside en la posibilidad de presentar prácticamente cualquier valor de impedancia acústica al generador de sonido."

Como beneficio "lateral" se mejora el control de la directividad para controlar la dispersión de la energía acústica.

Las *guías de onda* son bocinas cuyas características direccionales son el objetivo primordial de su diseño por sobre cargar óptimamente a los drivers. Esto se debe a que los transductores actuales son mucho más eficientes y poseen una mayor potencia que diseños de décadas pasadas.

Para diseñar acústicamente un transductor o analizar sistemas de radiación, se deben tener en cuenta algunos parámetros acústicos, entre ellos la distorsión. Este fenómeno es claramente audible en bocinas o en sistemas de bajas frecuencias debido a los tubos de sintonía que estos últimos poseen.

Refiriéndonos a las bocinas y en particular a las guías de onda de los arreglos en línea (pues eso es lo que son, un ejemplo de bocinas que confieren cierto tipo de radiación sonora por su "boca" al flujo de energía acústica que ingresa por su "garganta"), éstas poseen en su interior un muy alto SPL debido a que deben convertir una radiación esférica en una de apertura vertical mínima y gran amplitud horizontal.

La teoría física clásica dice que si aumenta la longitud de una bocina, se incrementan su distorsión y el control sobre su directividad. El mecanismo por el cual se genera la distorsión son las alinealidades del aire asociadas con altos niveles de presión sonora que atraviesan dicha bocina. Mientras mayor sea la longitud del dispositivo (bocina) más fácil se obtendrán los patrones de radiación necesarios. Esto significa que es muy difícil (no imposible) obtener baja distorsión y gran control de radiación simultáneamente.

Distorsión No Lineal: es el agregado de componentes armónicas dada una fundamental con el incremento excesivo del nivel de presión sonora dentro de la guía de onda.

A continuación se encuentra el análisis sobre una simple guía de onda cilíndrica (un "tubo") que hace el Dr. **Leo Beranek** en su libro llamado "*Acoustics*".

Una onda sonora produce una expansión y una compresión del fluido a través del que se propaga en cada uno de sus trayectos. Se encontró halló que la relación entre la presión y el volumen rectangular virtual del aire a 20° C por el cual la onda está transitando es:

$$P = \frac{0.726}{V^{1.4}}$$

Donde V : volumen específico del aire en $\frac{m^3}{kg} = \frac{1}{\rho_0}$

P : presión absoluta en bars, donde 1 bar = 10^5 newtons/m²

Mediante esta ecuación se grafica la siguiente curva AB:

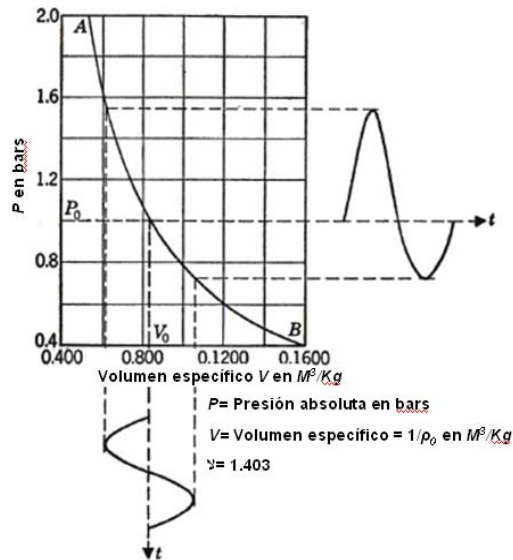


Fig 1. Gráfica de ecuación de gas $PV^\gamma = 1.26 \times 10^4$, válido a 20°C . Presión atmosférica normal (0,76 m Hg) es mostrada como $P_0=1$ bar.

Asumiendo que el desplazamiento del diafragma de la unidad de driver es senoidal, dicho diafragma actúa sobre el aire inmediato para cambiar su volumen senoidalmente. En la Fig. 1 se observa que para grandes cambios en el volumen, el aumento de la presión que se produce en la garganta de la bocina ya no es senoidal.

Si la bocina fuera simplemente una “pipa” larga y cilíndrica, la distorsión se incrementaría tanto como el recorrido que obtuvo la onda de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\gamma + 1}{\sqrt{2\gamma}} k \frac{P_1}{p_0} x = 1.21k \frac{P_1}{p_0} x$$

Donde P_1 = presión sonora rms de una frecuencia fundamental en newtons/m².

P_2 = presión sonora rms del segundo armónico en newtons/m².

P_0 = presión atmosférica en newtons/m².

$k = \omega / c = 2\pi / \lambda =$ número de onda en m⁻¹.

$\gamma = 1.4$ para el aire.

$x =$ distancia del trayecto de la onda a lo largo del tubo cilíndrico en m.

Refiriéndonos en particular a una *bocina exponencial*, la amplitud de la fundamental disminuye a medida que los trayectos de la onda se alejan de la garganta, es por esto que, en este caso, la armónica de distorsión de segundo orden no se incrementa linealmente con la distancia. Cerca de la garganta la misma aumenta tal cual como lo indica la ecuación en la medida que posea algún recorrido de sección constante (cilíndrico), pero cerca de la boca la amplitud de la presión de la fundamental es usualmente tan baja que aparece una distorsión adicional muy pequeña.

Bocina exponencial:
Son aquellas en que su longitud está relacionada exponencialmente con el área de la bocina. La expresión matemática que las gobierna es:

$$S = S_1 \cdot e^{\frac{x}{l}}$$

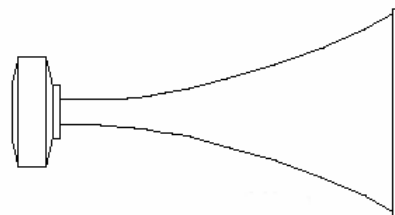
Siendo:

S : área de la boca de la bocina.

S_1 : área de la sección de la garganta de la bocina.

x : distancia desde la garganta hacia la boca.

l : distancia en la que el área crece e veces.



Bocina exponencial

Una de las grandes conclusiones que podemos extraer de lo antes expuesto es que si la longitud de esta simple guía de onda cilíndrica se duplica (para tener un mejor control de la directividad), el valor rms de la segunda armónica de distorsión se duplica.

Directividad

Los arreglos lineales hoy en día están de moda en el mercado del audio, no todos son iguales y existen algunas ideas confusas acerca de su funcionamiento. Es muy importante conocer a ciencia cierta el comportamiento de estos dispositivos ya que no están configurados de la misma manera, por lo tanto la directividad y las áreas de cobertura no son iguales para todos. Un método real para mejorar estos aspectos es el de tomar medidas acústicas bajo condiciones controladas y aplicar principios científicos para interpretar los datos resultantes de dichas mediciones.

El uso y la operación de un arreglo en línea son afectados por variables como el tamaño del arreglo, los ángulos de inclinación de cada gabinete y el procesamiento de la señal del conjunto de unidades.

Los arreglos en línea de altavoces son utilizados por diseñadores de sistemas de sonido para obtener un patrón de directividad angosto, generalmente en el plano vertical. Dicho patrón provee un incremento en la ganancia (que es útil en lugares de “*tiro largo*”) y mejora la relación entre sonido el directo y el reverberante (consecuentemente mejorándose la *inteligibilidad de la palabra*). En el pasado los arreglos lineales fueron construidos sin bocinas y trabajaban un poco mejor cuando la guía de onda era larga respecto de la longitud de la altura del arreglo. Cuando se utilizaban guías de onda más cortas, cada elemento del arreglo aportaba características direccionales individuales. Obtener en ese momento un arreglo lineal perfecto no era posible (hoy tampoco es posible, pero los diseños han mejorado considerablemente).

Recientemente se han diseñado sistemas de altavoces apropiados para utilizarlos en arreglos lineales; tienen un patrón de directividad más parecido al de una fuente lineal perfecta que los diseños antiguos, pero *tampoco se comportan como fuentes lineales continuas perfectas en todas las frecuencias* ya que se presentan “agujeros de no irradiación” entre los gabinetes. Para que estas zonas no radiantes estén cubiertas los elementos de un sistema deben irradiar frentes de onda “radiales”.



Fig 2. 8 gabinetes formando un arreglo.

Arreglos lineales – modelo continuo

El primer paso en la obtención de una función de directividad de un arreglo lineal es desarrollar una expresión para la presión sonora irradiada. Una fuente lineal puede ser modelada idealmente como segmentos lineales pequeños, infinitos y continuos distribuidos a lo largo de una línea.

La presión acústica que irradia una fuente lineal es:

$$presión = \int_0^l \frac{A(x)}{r(x)} e^{-j(kr(x)+\phi(x))} dx$$

Donde l es la longitud de una fuente lineal, $A(x)$ es la función de amplitud a lo largo de la línea, k es el número de onda, $\phi(x)$ es la función de fase a lo largo de la línea y $r(x)$ es la distancia desde algún segmento a lo largo de la línea hasta el punto de observación **P**.

La evaluación de esta expresión se simplifica si se asume que el punto de observación **P** se encuentra lejos, a una distancia mucho mayor que la longitud del arreglo y que las distancias desde **P** hasta cualquier segmento del arreglo son aproximadamente iguales. Esto permite llevar el término $1/r(x)$ en frente de la integral desde

$$\frac{1}{r(x)} \approx \frac{1}{r(0)} \approx \frac{1}{r(l)} \approx \frac{1}{r}$$

Opuestamente, el término $r(x)$ en la exponencial debe ser tratado porque las pequeñas diferencias de distancia desde **P** hasta desde alguno de los segmentos no lo son comparadas con una guía de onda. La **fig. 3** muestra que $r(x)$ en el exponente puede ser expresado como:

$$r(x) = x \sin(\alpha)$$

Donde α es el ángulo entre una línea normal al eje de la fuente y una línea desde la fuente hasta **P**.

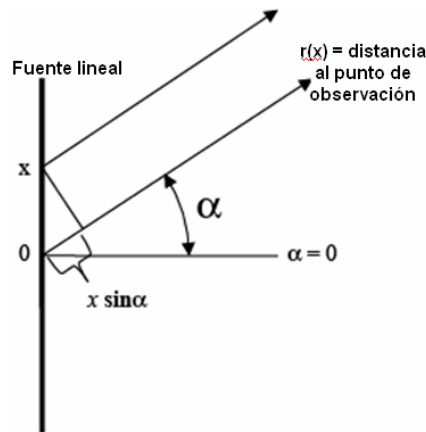


Fig. 3. Construcción geométrica de la función de distancia relativa.

Sustituyendo, la presión de campo lejano en el ángulo α de una fuente lineal continua es:

$$presión(\alpha) = \frac{1}{r} \int_0^l A(x) e^{-j(kx \sin \alpha + \phi(x))} dx$$

La función de directividad $R(\alpha)$ de una fuente lineal está definida como la magnitud de la presión en un ángulo α sobre la magnitud de la presión máxima que puede ser obtenida sin importar la dirección. Esta es:

$$R(\alpha) = \frac{|presión(\alpha)|}{|presión_{max}|}$$

La presión irradiada máxima es obtenida cuando todos los segmentos a lo largo de la línea irradiada en fase, por ejemplo cuando la función exponencial es igual a 1. Ésta está dada como:

$$presión_{\max} = \frac{1}{r} \int_0^l A(x) dx$$

Por lo tanto la forma general de la función de directividad $r(x)$ de una fuente lineal es:

$$R(\alpha) = \frac{\left| \int_0^l A(x) e^{-j(kx \sin \alpha + \phi(x))} dx \right|}{\left| \int_0^l A(x) dx \right|} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Bibliografía

“Line Arrays: Theory and Applications”. **Mark S. Ureda**, JBL Professional. Nothridge, CA USA.

“Acústica”. Leo Beranek.

¡Hasta la próxima!

Ing. María Isabel Arango G.
mariaisabel@ingenieriadesonido.com