

Diseño científico de reproductores acústicos

Resumen

Encararemos en este trabajo el estudio de las nuevas teorías sobre el comportamiento electroacústico de gabinetes reflectores de graves. Analizaremos el concepto de sistema de cuatro grados de libertad y las soluciones propuestas por Thiele para estos sistemas, en reemplazo de la teoría clásica de Beranek. Veremos asimismo varias sugerencias y mejoras realizadas en los últimos cinco años en las técnicas de medición de parámetros mecano-acústicos. En todos los casos presentaremos los resultados de estas teorías, sin internarnos en su detallado análisis. Daremos asimismo un ejemplo concreto de su aplicación en la medición y proyecto de un sistema reproductor. El criterio de síntesis que preside este trabajo. compagina, sin embargo, con el propósito didáctico que lo motiva.

Introducción

Cuando decidimos, hace dos años, intentar la producción, en la Argentina, de un reproductor acústico profesional destinado a estudios de grabación y radiodifusión, nos encontramos con el siguiente panorama. Por un lado, varios fabricantes de altavoces cuya performance era deficientemente especificada, no sirviendo como base a un proyecto serio. En algunos casos la calidad de sus productos era buena; en otros las muestras presentaron graves anomalías, aun proveniendo de fabricantes serios. Por el lado de los fabricantes de conjuntos acústicos el panorama era todavía más desalentador; cada uno poseía su propia receta para lograr el sonido perfecto. Cada uno tenía su propio proveedor de parlantes y su propio diseño, pero casi nadie podía justificar satisfactoriamente las razones de su preferencia. Aun la gente que trabajaba seriamente (y que producía sistemas de muy buena calidad), llegado el momento de difundir sus productos, acudía a conceptos contradictorios que evidenciaban un desconocimiento de la teoría en que se sustentaban. Ante este panorama, creímos necesario comenzar un programa sistemático de trabajo que incluyera:

a) Mediciones de altavoces de distintas marcas y modelos para evaluar no sólo su respuesta sino sus parámetros mecano-acústicos;

b) Estudio y evaluación de distintos tipos de gabinetes;

c) Estudio de redes divisoras de frecuencias;

d) Implementación de técnicas de medición avanzadas para los sistemas terminados.

Como paso previo a este plan, era evidente que debíamos actualizar nuestros conocimientos sobre el tema, pues la teoría clásica de Beranek había sido considerablemente ampliada. Decimos ampliada y no superada, pues seguimos basándonos en el impecable análisis realizado por Beranek, para arribar a nuevas conclusiones que, sin contradecir las anteriores, las convierten en un caso particular de un amplio sistema de soluciones.

También aparecieron a lo largo de nuestro estudio muchas sugerencias que nos permitieron mejorar considerablemente las técnicas de medición de los parámetros. Recordemos que en las técnicas clásicas, la masa del diafragma, por ejemplo, era medida mediante pesas que se agregaban al cono variando su frecuencia de resonancia. La compliancia era medida en forma estática, por la desviación en una regla graduada. En forma parecida, mediante una corriente que atravesaba la bobina móvil, obteníamos el valor del producto $B \times l$.

Todos estos sistemas eran tediosos y conducían a resultados de exigua precisión. Hasta la medición de la frecuencia de resonancia, por el método de la impedancia máxima, conducía a resultados diferentes entre distintos operadores, aun con el mismo instrumental.

El trabajo de desarrollo aún no ha terminado. El perfeccionamiento de un sistema reproductor acústico es una labor permanente. Es por otro lado una tarea de conjunto entre el fabricante de los parlantes y el proyectista del sistema. Sin embargo, los primeros frutos de nuestra tarea han sido muy satisfactorios, y la construcción, en pequeñas partidas, de nuestro proyecto, denominado Studio 1503, ha comenzado. Es por esta razón que decidimos la publicación de este trabajo, a fin de compartir conocimientos y experiencias con los distintos grupos que están actualmente desarrollando sistemas reproductores de sonido o fabricando altavoces. Estamos firmemente convencidos que la difusión de trabajos teóricos sobre este tema evitará (como también nos evitó a nosotros) caer en la tentación de "descubrir" cosas ya inventadas.

Gabinetes reflectores de graves

Desde un principio la elección del sistema recayó en el reflector de graves (bass reflex). Esto es debido a que en un gabinete profesional debe hacerse el menor número posible de concesiones, siendo este sistema el que posee el mayor número de puntos a su favor. El gabinete de suspensión acústica o de caja cerrada (closed box), a veces mal llamado baffle infinito, tiene en su favor su reducido tamaño, aun alcanzando el extremo grave del espectro. Para lograrlo, sin embargo, el fabricante del parlante debe: a) aumentar su compliancia al máximo compatible con la sustentación del cono; b) aumentar la masa del cono + bobina móvil; esto último para que la frecuencia de resonancia una vez puesto en la caja, sea la deseada como extremo inferior de la respuesta. Esto es debido a que en este tipo de gabinete la compliancia del aire encerrado eleva considerablemente la frecuencia de resonancia del altavoz, por lo que debe ser reducida aumentando la masa. Este aumento tiene por efecto reducir el rendimiento del parlante.

Como el rendimiento del altavoz de baja frecuencia es el que limita el de todo el conjunto, los sistemas de suspensión acústica poseen rendimientos bajos. Por otro lado el desplazamiento del diafragma se cuadriplica cada vez que descendemos una octava. Esto obliga a grandes desplazamientos del cono con el consiguiente aumento en la deformación (pese a que para corregir esto se apela al recurso de aumentar la longitud de la bobina, lo que nuevamente conspira contra su rendimiento).

El reflector de graves, en cambio, cuando la frecuencia desciende hasta cerca de la de resonancia comienza a radiar energía la ventana, dejando de radiarla el diafragma. En el caso ideal, a la frecuencia de resonancia, el cono casi no se desplaza, radiando energía exclusivamente a través de la ventana. Por lo tanto la distorsión es mínima. Esto puede verse en la Fig. 1 en que se grafica el nivel de presión sonora producido por el diafragma (cono del altavoz) y por la radiación de la ventana.

En la Fig. 2 podemos analizar los desplazamientos relativos de un altavoz montado en un reflector de graves o en un gabinete infinito. Es interesante observar que desde un valor de $0,7 f/f_0$, el primer sistema exige menor excursión al cono, con lo que lograremos menores

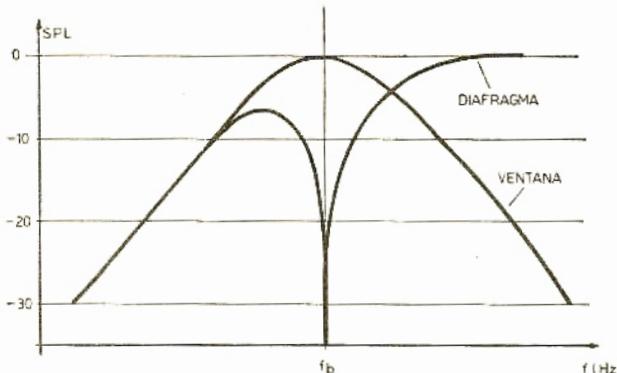


Fig. 1 — Contribución a la presión sonora del diafragma y la ventana.

cifras de distorsión. Por debajo de esta cifra la situación se invierte debido a que la pendiente de caída de un reflector de bajos es de 24 dB/octava por debajo de su frecuencia de corte; mientras que en el caso del gabinete infinito es de 12 dB/octava. Sin embargo, la distorsión en esta región no interesa en nuestro proyecto pues cae en la zona casi subsónica. Puede ser importante, en cambio, cuando se proyectan pequeños reproductores para uso doméstico.

En este punto será necesario aclarar que el análisis precedente, así como los próximos, han sido realizados desde el punto de vista de lograr una óptima calidad aceptando un mínimo de puntos de compromiso. Por lo tanto las conclusiones obtenidas no tienen por qué ser necesariamente válidas para el proyecto de reproductores acústicos destinados al hogar. Las conclusiones de índole teórica, en cambio, tienen validez general y servirán para la mejor comprensión de los fenómenos involucrados en todo tipo de conjuntos acústicos.

Teoría de los gabinetes reflectores de graves

Los fenómenos involucrados en este tipo de gabinetes son, por su naturaleza considerablemente más complejos que en los gabinetes cerrados. Tal vez por eso existe una cantidad notable de réflex mal diseñados, por lo que algunos llegaron a suponer que su proyecto tenía algo de empírico. Nada más lejos de la verdad. Para su estudio comenzaremos con la teoría clásica.

El circuito electromecanoacústico completo para un altavoz montado en gabinete reflector de bajos, ha sido dado por Beranek [Ref. 1] (ver Fig. 3). En donde

e_g = tensión de circuito abierto del amplificador [volt]
 B = densidad de flujo en el entrehielro [weber/m²]

l = longitud del alambre de la bobina [metro]

R_g = resistencia del amplificador [ohms]

R_e = resistencia a la CC de la bobina móvil

R_{AS} = resistencia acústica de la suspensión [ohms MKS]

R_{AD} = resistencia de radiación acústica de la cara frontal del diafragma [ohms MKS]

R_{AR1} = resistencia de radiación acústica de la ventana

R_{AP} = resistencia acústica del aire en la ventana

R_{AB} = resistencia acústica de la caja

M_{AD} = masa acústica del diafragma y bobina móvil [$\frac{Kg}{m^4}$]

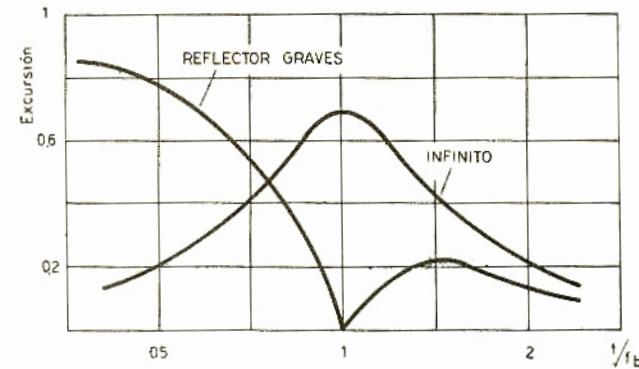


Fig. 2 — Comparación de los desplazamientos del diafragma en un gabinete infinito y en un reflector de graves.

M_{AI} = masa de radiación acústica del frente del diafragma

M_{AV} = masa de radiación acústica de la ventana

M_{AB} = masa acústica del aire en la parte posterior del diafragma

M_{AP} = masa acústica del aire en la ventana

C_{AS} = compliancia acústica de la suspensión del diafragma

C_{AB} = compliancia acústica de la caja

El circuito equivalente clásico puede reducirse a uno más sencillo, sin pérdida de exactitud para los fines prácticos. Para ello nos apartaremos aquí del análisis clásico de Beranek y realizaremos las siguientes simplificaciones:

a) Las tres masas acústicas M_{AD} , M_{AI} , M_{AB} , serán consideradas equivalentes a una única masa ficticia M_{ss} .

b) R_{ARI} y R_{AR2} serán despreciadas, aun teniendo en cuenta que son responsables de la salida acústica del parlante.

c) M_{AB} y M_{AP} serán consideradas equivalentes a M_{ss} .

d) R_{AB} y R_{AP} serán despreciadas, pues se demuestra que el valor Q que producen es muy alto comparado con el Q_T del parlante.

Con estas consideraciones arribamos al circuito equivalente de Thiele [Ref. 2]; Fig. 4.

Si realizamos un análisis completo del circuito, estudiando su trasferencia $T_{(p)}$, llegaremos finalmente a la expresión:

$$T_{(p)} = \frac{\frac{\omega_n^2 \omega_s^2}{p^4} + \frac{\omega_n^2 \omega_s}{Q_T p^3} + \frac{1}{p^2}}{[\omega_b^2 + \omega_s^2 + \omega_n^2 C_{ss}/C_{ab}]} + \frac{1}{\frac{\omega_s}{Q_T p} + 1} \quad (1)$$

en donde:

$$p = \frac{d}{dt}; \omega = 2\pi f; Q_T = \frac{\sqrt{M_{ss} C_{ss}}}{R_{ss}}$$

C_{ss} = compliancia acústica de la suspensión [$\frac{m^3}{newton}$]

$$R_{ss} = R_{as} + [B^2 l^2 / (R_e + R_g) S_D^2]$$

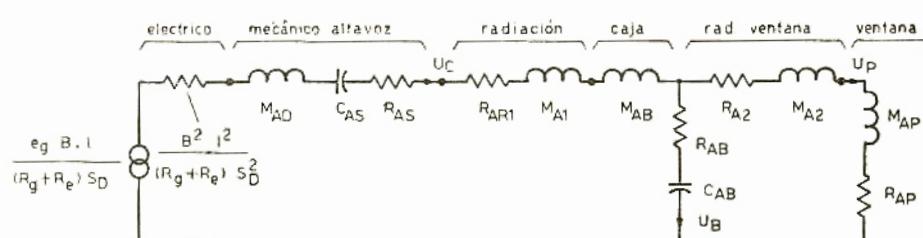


Fig. 3 — Circuito electromecanoacústico para un altavoz montado en gabinete reflector de bajos (Beranek).

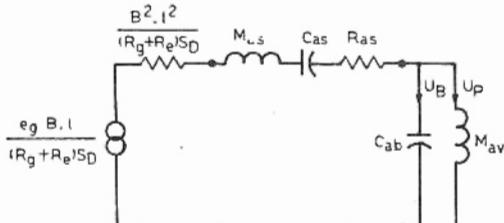


Fig. 4 — Circuito equivalente simplificado.

$$C_{ab} = \text{compliance acústica de la caja} \left[\frac{m^5}{\text{newton}} \right]$$

f_s = frecuencia de resonancia del altavoz

f_o = frecuencia de resonancia del sistema

f_b = frecuencia de resonancia de la caja

La Ec. [1] es una función filtro pasa-altos de cuarto orden, con asíntota de pendiente 24 dB/octava. Su forma general es:

$$T_{(p)} = \frac{1}{\frac{\omega_n^4}{p^4} + \frac{X_3 \omega_o^3}{p^3} + \frac{X_2 \omega_o^2}{p^2} + \frac{X_1 \omega_o}{p} + 1}$$

Puede verse que hemos reducido un problema acústico a otro eléctrico, perfectamente conocido: el cálculo de un filtro pasa-altos de cuarto orden. Para ello podemos emplear las técnicas de la moderna teoría de circuitos. Dispondremos de cuatro variables que nos darán distintas soluciones, según empleemos las funciones de Butterworth o de Chebyshev. Las variables, que configuran cu-

tro grados de libertad, son: f_s , f_b , Q_t , $\frac{C_{ab}}{C_{ab}}$

Esta conclusión es importante ya que sobre el tema hay bastante confusión. A veces se habla de dos variables y hasta de una. Aclararemos, entonces, que un gabinete cerrado es un sistema de dos grados o modos de libertad y que por ello tiene una pendiente de caída de 12 dB/octava. Un reflector de graves siempre es un sistema de cuatro grados de libertad⁽¹⁾. Esto es válido aunque se lo sintonice en la forma clásica en que la frecuencia de resonancia del altavoz coincide con la del gabinete. Los grados de libertad de un sistema son inherentes a su condición física de entorno y no a los valores que nosotros podamos darle a sus parámetros. Por ser un sistema de cuatro grados su asíntota es, como vimos, de 24 dB/octava. Este hecho físico es nuevamente independiente del buen o mal diseño del sistema.

También es posible, y de hecho algunos fabricantes lo hacen, agregarle al sistema dos modos adicionales de libertad (totalizando seis), en la forma de un filtro de acentuación de graves de dos polos. Este filtro, generalmente un doble T, estará ubicado dentro del amplificador de audio permitiendo, a costa de una mayor potencia y generalmente distorsión, prolongar la respuesta de un sistema acústico cuyas pequeñas dimensiones no hubieran permitido lograrlo de otro modo. Este método es muy interesante para conjuntos integrados de amplificadores y parlantes, pero tiene el inconveniente de eliminar la posibilidad de intercambio entre equipos. Veremos más adelante los valores de sintonización de estos filtros, sin entrar en su análisis detallado.

(1) Esto, inevitablemente, nos recuerda al célebre M. Jourdain, personaje de Moliere, que un buen día descubre que había estado hablando en prosa toda su vida, sin haberse percatado de ello.

T A B L A I
Modos de alineación de reflectores de graves

Detalles de alineación				Diseño de la caja				Circuitos auxiliares				Cantidades aproximad. constantes		
Nº	Tipo	k	Ripple (dB)	f_s/f_s	f_s/f_b	$\frac{C_{ab}}{C_{ab}}$	Q_t	f_{aux}/f_s	y_{aux}	Elev. pico (dB)	f_{pk}/f_s	$\frac{C_{ab} f_s^2}{C_{ab} f_s^2}$	$Q_t f_b / f_s$	
Casi 3er. Orden	1	QB ₃	—	—	2,68	1,34	10,48	0,180	—	—	—	—	1,47	0,360
	2	QB ₃	—	—	2,28	1,32	7,48	0,209	—	—	—	—	1,44	0,362
	3	QB ₃	—	—	1,77	1,25	4,46	0,259	—	—	—	—	1,43	0,367
	4	QB ₃	—	—	1,45	1,18	2,95	0,303	—	—	—	—	1,41	0,371
4º Orden	5	B ₄	1,6	—	1,000	1,000	1,414	0,383	—	—	—	—	1,41	0,383
	6	C ₄	0,8	—	0,867	0,935	1,055	0,415	—	—	—	—	1,41	0,384
	7	C ₄	0,6	0,2	0,729	0,879	0,729	4,466	—	—	—	—	1,37	0,386
	8	C ₄	—	0,9	0,641	0,847	0,559	0,518	—	—	—	—	1,36	0,392
	9	C ₄	—	1,8	0,600	0,838	0,485	0,557	—	—	—	—	1,35	0,398
5º Orden	10	B ₅	1,0	—	1,000	1,000	1,000	0,447	1,00	—	—	—	—	—
	11	C ₅	0,7	—	0,852	0,934	0,583	0,545	1,43	—	—	—	—	—
	12	C ₅	0,4	0,25	0,724	0,889	0,273	0,810	2,50	—	—	—	—	—
	13	C ₅	0,355	0,5	0,704	0,882	0,227	0,924	2,93	—	—	—	—	—
	14	C ₅	0,278	1,0	0,685	0,877	0,191	1,102	3,60	—	—	—	—	—
6º Orden Clase I	15	B ₆	1,0	—	1,000	1,000	2,73	0,299	1,00	— 1,732	+ 6,0	1,07	—	—
	16	C ₆	0,8	—	0,850	0,868	2,33	0,317	1,01	— 1,824	+ 7,7	1,06	—	—
	17	C ₆	0,6	—	0,698	0,750	1,81	0,348	1,02	— 1,899	+ 10,1	1,05	—	—
	18	C ₆	0,5	—	0,620	0,698	1,51	0,371	1,03	— 1,930	+ 11,6	1,05	—	—
	19	C ₆	0,414	0,1	0,554	0,659	1,25	0,399	1,04	— 1,951	+ 13,2	1,04	—	—
6º Orden Clase II	20	B ₆	1,0	—	1,000	1,000	1,000	1,408	1,00	0	—	—	—	—
	21	C ₆	0,8	—	0,844	0,954	0,722	0,431	1,10	— 0,438	+ 0,2	2,36	—	—
	22	C ₆	0,6	—	0,677	0,917	0,500	0,461	1,21	— 0,941	+ 1,1	1,77	—	—
	23	C ₆	0,5	—	0,592	0,902	0,414	0,481	1,27	— 1,200	+ 1,9	1,63	—	—
	24	C ₆	0,414	0,1	0,520	0,890	0,353	0,513	1,31	— 1,414	+ 3,0	1,55	—	—
6º Orden Clase III	25	C ₆	0,268	0,6	0,404	0,876	0,276	0,616	1,37	— 1,732	+ 6,0	1,47	—	—
	26	B ₆	1,0	—	1,000	1,000	0,732	0,518	1,00	+ 1,732	—	—	—	—
	27	C ₆	0,268	0,6	0,778	0,911	0,110	1,503	2,73	0	—	—	—	—
	28	QB ₆	—	—	0,952	0,980	1,89	0,328	1,08	—	6,0	0	—	—

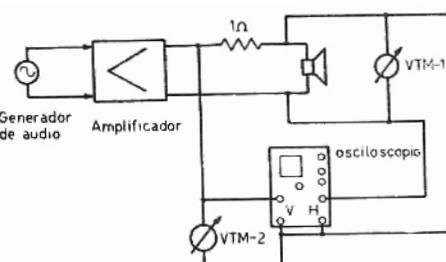


Fig. 5 — Disposición de los elementos necesarios para la medición de los parámetros.

Las distintas formas en que conjuguemos estas variables nos darán distintas respuestas del sistema. En la Tabla I vemos los 28 modos de alineación. Los cuatro primeros, denominados cuasi-Butterworth, se caracterizan por emplear frecuencias de resonancia del recinto mayores que la del altavoz. Por lo tanto podremos emplear gabinetes más pequeños, pero requeriremos menores valores de Q_t . Notaremos que el tamaño del gabinete queda perfectamente definido por la relación:

$$\frac{C_{as}}{C_{ab}} = \frac{V_{as}}{V_b}$$

es decir, entre el volumen equivalente de aire de la compliancia de la suspensión y el volumen real del interior del gabinete, V_b . Cuanto menor sea esta relación, mayor será el gabinete. El siguiente grupo de alineamientos es el de cuarto orden, iniciado por el N° 5, que es el ajuste clásico propuesto por Beranek, en el que la frecuencia de corte, la del gabinete y la del altavoz coinciden. Sin embargo, este ajuste (y aquí aparece la novedad), también está caracterizado por un determinado volumen de aire del gabinete: $C_{as}/C_{ab} = 1,414$ y también por un determinado $Q_t = 0,383$. Si ambas condiciones no son satisfechas, el conjunto acústico será inevitablemente deficiente.

Los ajustes 6 al 9 son funciones Chebyshev, denominadas de igual ripple, caracterizadas porque la frecuencia de resonancia del gabinete está ahora por debajo de la del altavoz. Esto permite, a costa de gabinetes de mayor tamaño, lograr frecuencias de corte mucho más bajas. En el caso del ajuste N° 9 podemos descender casi una octava, pero al precio de emplear un gabinete tres veces mayor. A partir de este ajuste, los siguientes exigen una compensación auxiliar en el amplificador. En algunos casos, como en el N° 10, se busca reducir la excursión del cono y por lo tanto la distorsión del sistema, a costa de agrandar el gabinete⁽²⁾. En los otros casos, en cambio, se logra extender la respuesta de pequeños gabinetes empleando el principio de que el volumen de la caja puede ser intercambiado por potencia. Existen tres penalidades:

a) Recalentamiento adicional de la bobina móvil en regiones próximas a la frecuencia de corte.

(2) Esto, comercialmente, puede lucir como un suicidio.

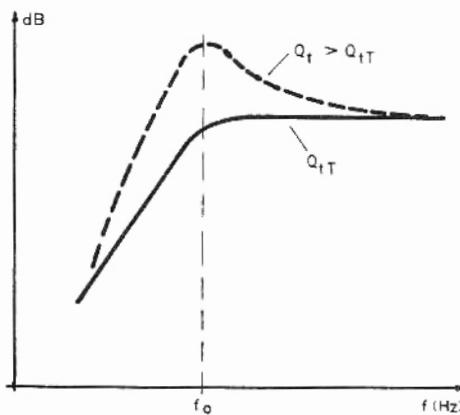


Fig. 7 — Comparación de la respuesta correspondiente al valor de Q_t .

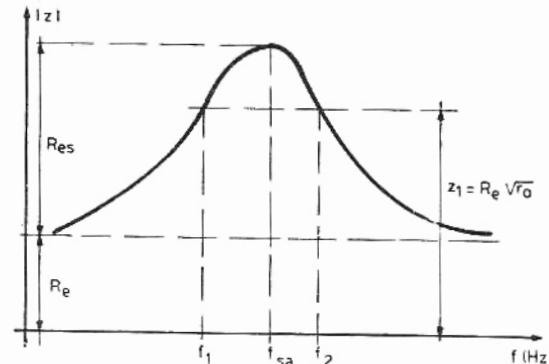


Fig. 6 — Representación gráfica de Z.

b) Requerir menores valores de Q_t a medida que disminuimos el tamaño de la caja.

c) Los reproductores acústicos y los amplificadores deben formar un conjunto, no siendo intercambiables.

En nuestra opinión es el último punto el que más pesa para desechar este tipo de soluciones en reproductores acústicos de nivel profesional. Existe una excepción, y es el caso de sistemas de bi y tri-amplificación en que los amplificadores, sus redes activas y los conjuntos acústicos forman una unidad.

Procedimientos de medición de los parámetros

Todo lo estudiado no tendría valor desde el punto de vista de la ingeniería, si no fuera aplicable a sistemas reales. Para ello debemos conocer todos los parámetros involucrados, cosa posible de lograr siguiendo cuidadosamente las técnicas que veremos a continuación.

El esquema de medición será el de la Fig. 5.

a) Medición del altavoz en aire libre

Se colocará el altavoz lejos de superficies grandes (paredes, mesas, etc.), pudiendo estar suspendido de una cuerda en el centro del laboratorio. Las mediciones se realizarán para 1 volt eficaz a fin de asegurar el comportamiento lineal de la suspensión. La frecuencia de resonancia en el aire, f_{sa} , quedará exactamente evidenciada por la condición de fase nula, vista en el osciloscopio como una recta, en reemplazo de la elipse. Este método [Ref. 3] asegura una mejor exactitud que el originalmente propuesto por Thiele, de encontrar el máximo en la curva de $|Z|$, pues la forma plana de esta curva dificulta la medición.

Para la condición de resonancia f_{sa} , medimos tensiones en ambos voltímetros y aplicando la ley de Ohm calculamos:

$$|Z| = R_{es} + R_e$$

Hallamos ahora

$$r_o = \frac{R_{es} + R_e}{R_e}$$

siendo R_e la resistencia a la CC de la bobina móvil, medida previamente con un puente.

Calculamos una impedancia ficticia $|Z_1| = R_e \sqrt{r_o}$ (Fig. 6); y para ese valor de $|Z_1|$, hallamos las dos frecuencias laterales f_1 y f_2 . Con estas frecuencias podemos calcular [Ref. 2]:

$$Q_a = \sqrt{r_o} \frac{f_{sa}}{f_2 - f_1} \quad (2)$$

$$Q_e = \frac{Q_a}{r_o - 1} \quad (3)$$

El valor de Q_t con el que podemos entrar en la Tabla de alineaciones, está dado por:

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_a} + \frac{1}{Q_e \left(1 + \frac{R_e}{R_o} \right)} \quad (4)$$

En donde R_o es la resistencia de salida del amplificador, vinculada con el coeficiente de amortiguamiento A , por:

$$R_o = \frac{R_{nominal}}{A}$$

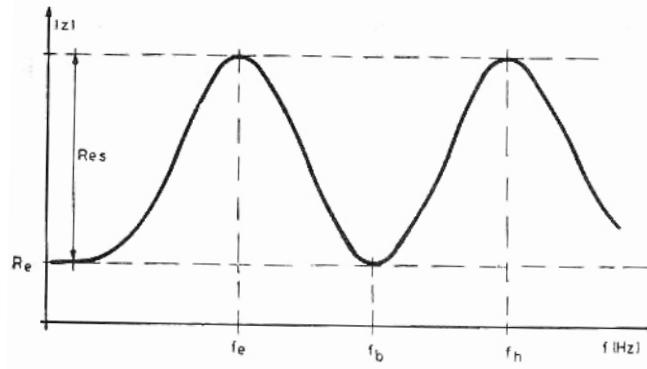


Fig. 8 — Gráfico de Z.

Para amplificadores de estado sólido, en que $A > 50$ será $R_g \approx 0$, tendremos

$$Q_t \approx \frac{Q_a Q_e}{Q_a + Q_e}$$

La influencia de Q_t en la respuesta del altavoz puede verse en la Fig. 7, en donde comparamos la respuesta para el valor de Q_t dado en la Tabla de Thiele, con la que produce un valor mayor. El empleo de valores inadecuados de Q_t es el responsable de la mala calidad de muchos reflectores de graves de deficiente diseño, cuya respuesta presenta una fuerte resonancia. Esto es particularmente notable con parlantes de baja calidad, pues cuanto más económico es el altavoz, mayor será Q_t y por lo tanto Q_t . Valores de Q_t típicos para altavoces de alta calidad son: 0.2 a 0.5, mientras que asciende hasta 1 en unidades de mediana calidad.

La Ec. 4 nos permite reducir el valor de Q_t mediante el expediente de emplear amplificadores con resistencia negativa de salida. Como es sabido, ello puede lograrse mediante la combinación de realimentación negativa de tensión y positiva de corriente. También podemos ver que si el altavoz posee el valor correcto de Q_t exigido por la alineación elegida, nada ganaremos con emplear amplificadores con resistencia negativa de salida.

Finalmente, los valores de Q_a y Q_e dados por [2] y [3] corresponden a las siguientes definiciones surgidas del circuito equivalente antes visto.

$$Q_a = \omega_s M_{as} / R_{as}$$

$$Q_e = \omega_s M_{as} R_e S_D^2 / B^2 l^2$$

Por lo tanto será, de acuerdo a [4]

$$Q_t = \omega_s M_{as} / R_{at}$$

b) Mediciones del altavoz en gabinete reflector de graves

Para este ensayo se empleará el mismo circuito de la Fig. 5. El gabinete se colocará en el piso del laboratorio, con el altavoz dirigido hacia arriba para lograr las condiciones de radiación acústica en un semiplano.

El generador de audio deberá tener una calibración en frecuencia muy exacta, o bien se empleará un frecuencímetro digital. La frecuencia de resonancia del gabinete f_b , podrá estar próxima a la del altavoz, pero no es imprescindible que esto ocurra.

Si graficáramos $|Z|$ encontraríamos que al colocar el parlante en la caja se producen dos puntos de alta impedancia (Fig. 8). También encontramos un punto de mínima Z que corresponde a la resonancia de la caja f_b . Como lo demostraron Ashley y Swan [Ref. 3], estos tres puntos se caracterizan por tener fase nula, por lo que su determinación exacta será sencilla. Con los tres valores hallados podemos calcular:

$$f_{sb} = \frac{f_h - f_1}{f_b} \quad (5)$$

$$\frac{C_{as}}{C_{ab}} = \frac{V_{as}}{V_b} = \frac{(f_h^2 - f_b^2)(f_b^2 - f_1^2)}{f_h^2 \cdot f_1^2} \quad (6)$$

El valor de f_{sb} dado por la Ec. (5) es la frecuencia de resonancia del altavoz dentro del gabinete. Esta frecuencia es menor que la correspondiente al aire libre debido a la carga adicional de una masa de aire que forma

parte de la impedancia de radiación. Este efecto no debe ser confundido con la elevación de la frecuencia de resonancia de un parlante cuando es colocado en un gabinete cerrado pues en este caso es el fenómeno de compliencia el que priva sobre la masa de aire, dando un resultado opuesto. Volveremos sobre el tema más adelante.

La Ec. (6) nos da la relación C_{as}/C_{ab} , siendo este valor fundamental para entrar en la Tabla de alineaciones de Thiele. Por otro lado, de (6) vemos que $C_{as}/C_{ab} = V_{as}/V_b$, siendo V_b el volumen real de aire del gabinete y V_{as} el equivalente en aire de la compliencia del altavoz. Por lo tanto, cuanto mayor sea el gabinete, menor será la relación C_{as}/C_{ab} .

La medición del altavoz en el gabinete reflector de graves nos permite calcular también los correspondientes valores de Q_a y Q_e en la caja:

$$Q_{ab} = Q_a \frac{f_{sa}}{f_{sb}} \quad (7)$$

$$Q_{eb} = Q_e \frac{f_{sa}}{f_{sb}} \quad (8)$$

c) Rendimiento

Thiele propone como cifra de eficiencia de un altavoz montado en un gabinete reflector de graves:

$$\eta_{ob} = 4,88 \times 10^{-7} \frac{f_s^3 \cdot V_{as}}{Q_e} \quad (9)$$

Con V_{as} en m^3 . Esta ecuación nos permite calcular el rendimiento en base a los mismos datos que ya hemos medido e independientemente de las mediciones acústicas.

La fórmula propuesta para el rendimiento difiere de la de Beranek en algunos puntos. En primer lugar, Thiele, con criterio moderno, considera la potencia de referencia como la entregada por el amplificador sobre carga nominal, en lugar de usar la máxima transferencia de potencia que ocurre cuando $R_k = R_s$. Aun cuando hiciéramos coincidir ambas fórmulas en este punto seguiría siendo el valor de Beranek cuatro veces mayor que el de Thiele. Esto se explica por:

a) El rendimiento de Beranek es para ambas caras del diafragma; el de Thiele para una.

b) La resistencia de radiación del parlante en un reflector de bajos es de la mitad de la de un gabinete infinito. Hacemos notar aquí nuevamente que hablamos de un gabinete infinito, verdadero, y no de los denominados de suspensión acústica.

Por lo tanto, para aplicar la (9) emplearemos $f_s = f_{sb}$ cuando debamos caracterizar al altavoz en su propio gabinete, mientras que podremos emplear $f_s = f_{sa}$ para tener el rendimiento de referencia del altavoz independiente de su caja. También debemos recordar que si consideramos al parlante operando en un gabinete infinito y además suponemos aprovechada la energía radiada en ambas caras (altavoz montado en una pared), será

$$\eta = \eta_{ob} \times 4 \quad [\eta \text{ de Beranek}]$$

El valor V_{as} de la (9) se halla conociendo $\frac{V_{as}}{V_b}$ y el volumen del gabinete V_b , en m^3 .

d) Medición del altavoz en caja de prueba

Este método puede considerarse una alternativa del descrito en b). En líneas generales, su exactitud es menor pero presenta la ventaja de poder ser usado para la rápida determinación de los parámetros del altavoz antes de la construcción del gabinete reflector de bajos definitivo.

Se emplea una caja herméticamente cerrada y de volumen V_{tb} , conocido. El altavoz a medir es montado externamente (Fig. 9), cuidando que el cierre sea perfecto. Para lograr buena precisión en las mediciones, el volumen de la caja debe ser pequeño, usualmente menor que V_{as} .

Debido a la compliencia del aire de la caja cerrada, la frecuencia de resonancia del altavoz será mayor que la obtenida en el aire. Esta frecuencia, que denominamos f_{tb} , será medida para la condición de fase nula empleando el circuito antes utilizado (Fig. 5). Asimismo será conveniente disponer la caja sobre el piso para asemejar un plano infinito.

Esto se vincula con el factor F_s , relación de masas del diafragma en la caja a la correspondiente al aire

libre. Esta diferencia proviene del hecho de comportarse el altavoz como un disco en el espacio, cuando está al aire libre, mientras que en la caja de prueba tiende a hacerlo como un pistón en un plano infinito.

e) Cálculo de la compliancia y masa mecánica del diafragma

Con el valor de f_{tb} , recién medido en una caja de prueba (o en el mismo reflector de bajos, con la ventana herméticamente cerrada), calculamos:

$$C_{MS} = \left[F_a \left(\frac{f_{tb}}{f_{sa}} \right)^2 - 1 \right] C_{MB} \quad (10)$$

donde:

C_{MS} = compliancia mecánica de la suspensión, en m/newton

$$F_a = \frac{\text{masa del diafragma en el gabinete}}{\text{masa del diafragma en el aire}}$$

$$F_a = \frac{M_{MD} + 3,15 a^3 + 371 \cdot B \cdot a^3}{M_{MD} + 3,15 a^3} \quad (11)$$

Siendo: M_{MD} = masa del diafragma y bobina móvil en kg

B = factor de corrección de extremo, es función de S_D/L^2 y está dado en la Tabla 8.6 de Beranek (Ref. 1)

a = radio efectivo del diafragma, en metros

S_D = superficie efectiva del diafragma = $= \pi a^2$

El valor de la compliancia mecánica de la caja, C_{MB} , está dado por:

$$C_{MB} = \frac{V_{tb}}{S_D^2 \gamma Q_0} \quad (12)$$

donde:

$\gamma = 1,4$ (compresión adiabática)

Q_0 = presión atmosférica $\approx 10^5$ newton/m²

La masa mecánica, M_{MD} , estará dada por:

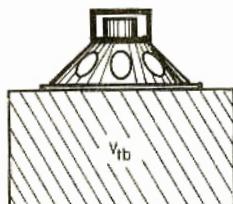


Fig. 9 — Ubicación del altavoz sobre la caja de prueba.

$$M_{MD} = \frac{1}{(2\pi f_{sa})^2 C_{MS}} - 3,15 a^3 \quad [\text{kg}] \quad (12)$$

El cálculo de C_{MS} y M_{MD} deberá hacerse en dos aproximaciones, pues desconocemos el valor de F_a , y hasta no obtener el de M_{MD} , tampoco podremos calcularlo. Por lo tanto estimaremos $F_a = 1,15$, y con (10) y (12) obtendremos un primer valor. Luego calculamos F_a , con la Ec. (11), para entonces, con la (10) y (12), obtener el definitivo de C_{MS} y M_{MD} .

También podemos calcular en forma directa el equivalente en aire de la compliancia:

$$V_{as} = \gamma Q_0 S_D^2 C_{MS} \quad [\text{m}^3] \quad (13)$$

Con este valor podemos calcular $\frac{V_{as}}{V_b}$ para entrar en la Tabla de Thiele con un gabinete determinado.

f) Cálculo del producto $B \cdot I$

Del análisis del circuito equivalente, ya visto, surge:

$$Q_0 = \frac{\omega_s \cdot M_{as} \cdot S_D^2 \cdot R_e}{(Bl)^2}$$

y teniendo en cuenta que

$$M_{as} = \frac{M_{MD} + 3,15 a^3}{S_D^2}$$

reemplazando y despejando:

$$Bl = \sqrt{\frac{\omega_s R_e (M_{MD} + 3,15 a^3)}{Q_0}} \quad (14)$$

En donde Bl aparece dado en Weber-metro y $\omega_s = 2\pi f_{sa}$; siendo R_e , como ya vimos, la resistencia a la corriente continua de la bobina móvil.

Altavoz: LEEA de 15", modelo especial:
 $a = 0,16 \text{ m}$; $S_D = \pi a^2 = 0,0804 \text{ m}^2$

a) Medición al aire libre; ver diagrama de circuito empleado en Fig. 5

$$\text{Valores medidos} \quad \begin{cases} R_e = 6,2 \Omega \\ f_1 = 17 \text{ Hz} \\ f_{sa} = 25 \text{ Hz} \\ f_2 = 36 \text{ Hz} \\ R_e + R_{es} = 83,3 \Omega \end{cases}$$

Calculamos:

$$r_o = \frac{83,3}{6,2} = 13,4$$

$$Q_a = \sqrt{r_o} \cdot \frac{f_{sa}}{f_2 - f_1} = 3,66 \cdot \frac{25}{36 - 17} = 4,81$$

$$Q_0 = \frac{Q_a}{r_o - 1} = 0,38$$

Si hacemos $R_g = 0$ será

$$Q_t = \frac{1}{Q_a} + \frac{1}{Q_0} = 0,352$$

b) Medición en reflector de bajos

$$V_b = 0,170 \text{ m}^3 \quad (\text{volumen eficaz}).$$

$$\text{Valores medidos} \quad \begin{cases} f_1 = 12,2 \text{ Hz} \\ f_b = 27,5 \text{ Hz} \\ f_h = 53,6 \text{ Hz} \end{cases}$$

Calculamos:

$$f_{sb} = \frac{f_h \cdot f_1}{f_b} = 23,7 \text{ Hz}$$

$$\frac{V_{as}}{V_b} = \frac{C_{as}}{C_{ab}} = \frac{(f_{hb} - f_b^2) (f_b^2 - f_1^2)}{f_{hb}^2 \cdot f_1^2} = 3,00$$

Teniendo en cuenta este valor entramos en la tabla de alineación y encontramos el valor más próximo de $C_{as}/C_{ab} = 2,95$, que corresponde al ajuste N° 4. Para este valor, será:

$$f_3/f_s = 1,45; f_s/f_b = 1,18$$

$$Q_t = 0,303$$

Por lo tanto:

$$f_3 = 1,45 \cdot f_{sa} = 36 \text{ Hz}$$

$$f_b = \frac{36}{1,18} = 30,5 \text{ Hz}$$

En consecuencia, deberemos corregir el diseño de la ventana para subir f_b hasta 30,5 Hz; es decir, para este caso la frecuencia de resonancia de la caja estará por arriba de la del parlante. La frecuencia de corte del con-

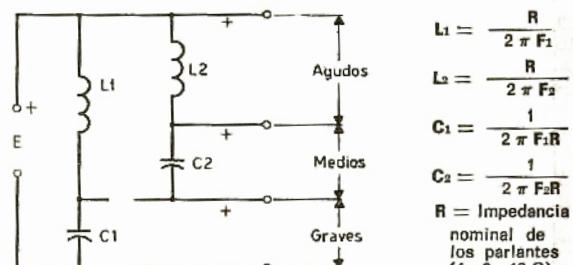


Fig. 10 — Red de causi-segundo orden (6/12 dB/octava)

TABLA II

Altavoz LEEA de 15", modelo especial		
Parámetro	Valor	Unidad
f_{sa}	25	Hz
Q_a	4,81	—
Q_e	0,38	—
C_{MS}	$6,39 \times 10^{-4}$	m/newton
M_{MD}	50,5	gramos
V_{as}	0,578	m^3
η (Beranek)	4,08	%
$B \cdot l$	12,75	weber · metro

junto será de 36 Hz ⁽¹⁾. La resistencia de salida del amplificador podrá calcularse por medio de la Ec. [4], anticipándose que deberá ser negativa para reducir $Q_e = -0,352$ hasta el valor 0,303, solicitado en la Tabla. Esto implica emplear un amplificador especial para ese gabinete. Otra solución, que resultó la finalmente adoptada, fue corregir el diseño del altavoz para reducir Q_e , e incluso tolerar una leve diferencia que estará afectada con una ligera cresta en la curva de respuesta.

c) Medición en caja cerrada

Tapando la ventana del reflector de bajos, se obtuvo:

$$f_{tb} = 49 \text{ Hz}$$

Se calcula:

$$C_{MS} = \frac{V_{tb}}{S_0^2 \gamma \rho_0} = \frac{0,17}{(0,0804)^2 \times 1,4 \times 10^6} = \\ = 1,88 \times 10^{-4} \text{ m/newton}$$

Tomando para f_a el valor tentativo $f_a = 1,15$ calculamos:

$$C_{MS} = \left[f_a \left(\frac{f_{tb}}{f_{sa}} \right)^2 - 1 \right] C_{MS} \\ = \left[1,15 \left(\frac{49}{25} \right)^2 - 1 \right] 1,88 \times 10^{-4} = 6,43 \times 10^{-4}$$

lo que nos permite calcular la Ec. [12]

$$M_{MD} = \frac{1}{(2\pi 25)^2 \times 6,43 \times 10^{-4}} - 3,15(0,16)^3 = 0,0501 \text{ kg}$$

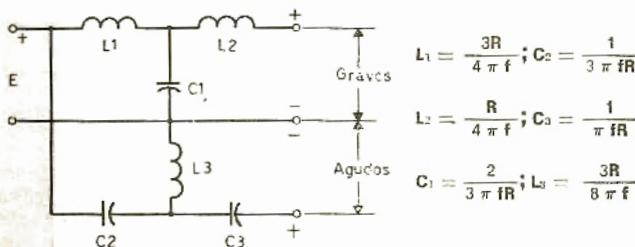
Con estos valores calculamos la 2^a aproximación. Para ello hallamos el valor verdadero de f_a , con la Ec. [11]

$$f_a = \frac{0,0501 + 3,15(0,16)^3 + 3,71 \times 0,6 \times (0,16)^3}{0,0501 + 3,15(0,16)^3} \\ f_a = 1,145$$

Si con este valor calculamos nuevamente, aplicando la [10] y [12], tendremos finalmente:

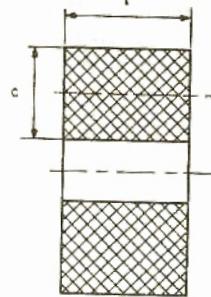
$$M_{MD} = 50,5 \text{ gramos} \quad C_{MS} = 6,39 \times 10^{-4} [\text{m/newton}]$$

⁽¹⁾ Este valor podrá parecer modesto para un parlante de 15" montado en gabinete de 170 litros, comparado con algunas especificaciones comerciales. Debemos recordar que se trata de un sistema de baja distorsión y que los 36 Hz son reales para -3 dB. Invitamos, asimismo, a meditar que están garantizados por ingenieros y no por el jefe de ventas...



Nota: Para 3 canales deben ponerse en cascada dos redes como la dibujada.

Fig. 11 — Red Butterworth de 3er. orden (18 dB/octava)



$$L = \frac{0,0315 a^2 N^2}{6a + 9l + 10c} [\mu\text{H}] \quad [17]$$

con a ; l ; c (en milímetros)

N = número de espiras

L = inductancia en μH

Fig. 12 — Fórmula de Wheeler

Con el valor de la compliencia de la suspensión, podemos calcular el equivalente en aire del altavoz aplicando la [13]

$$V_{as} = 1,4 \times 10^5 \times (0,0804)^2 \cdot 6,39 \times 10^{-4} = 0,578 \text{ m}^3$$

Con este valor podemos verificar la relación $\frac{V_{as}}{V_b}$ antes hallada por otro método. En efecto; siendo $V_b = 0,170$, será $\frac{V_{as}}{V_b} = \frac{0,578}{0,170} = 3,40$, mientras que la calculada en b) era de 3,00.

La discrepancia entre ambos es del orden del 10 %, valor muy aceptable para mediciones en electroacústica.

El producto Bl será calculado con la [14]

$$Bl = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot 6,2 \cdot [0,0505 + 3,15(0,16)^3]}{0,38}} = \\ = 12,75 \text{ weber · metro}$$

El rendimiento será calculado con la [9]:

$$\eta_{ob} = 4,88 \times 10^{-7} \frac{(25)^3 \cdot 0,51}{0,38} = 0,0102$$

Si expresamos el rendimiento de referencia dado por Beranek, en forma porcentual, tendremos:

$$\eta_B (\%) = 4 \times \eta_{ob} \times 100 = 4,08 \%$$

Podremos ahora resumir en la Tabla II los valores calculados del altavoz. Contrario a lo generalmente supuesto, no resultó necesario para estas mediciones disponer de una cámara anechoica ni de instrumental especializado.

Proyecto del gabinete y del divisor de frecuencias

a) Dimensiones

Para el dimensionamiento del reflector de bajos será necesario tener en cuenta: a) el volumen eficaz, es decir, el total del recinto menos el ocupado por los parlantes, divisores de frecuencia y conducto de la ventana; b) el área de la ventana y longitud del conducto.

Para el cálculo del volumen es conveniente recordar que el ocupado por los altavoces está dado aproximadamente por $V = 0,4 D^4$, siendo D el diámetro comercial, en metros.

Para el cálculo de la ventana emplearemos la siguiente fórmula:

$$f_b^2 = \frac{30 \cdot A}{V_b(L + \sqrt{A})} [\text{Hz}] \quad [15]$$

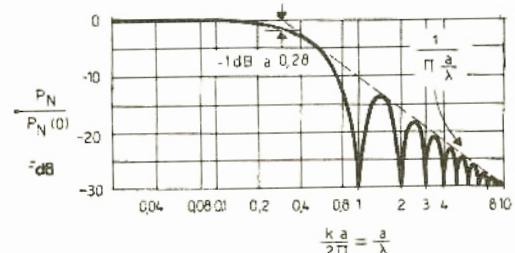


Fig. 13 — Presión sonora de campo cercano.

dondere:

f_b = frecuencia de resonancia del gabinete

A = superficie de la abertura [cm^2]

V_b = volumen eficaz [m^3]

L = longitud del conductor (o espesor de la madera, si no lo hubiere); [cm]

Para el cálculo inverso despejaremos A , obteniendo finalmente:

$$A = \frac{V_b^2 f_b^4}{3600} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{120 \cdot L}{V_b f_b^2}} \right)^2 [\text{cm}^2] \quad [16]$$

Esta última fórmula será la que emplearemos para calcular la superficie de la abertura. Además, la forma de la misma carece de importancia siempre que su circunferencia sea menor que media longitud de onda, pues se comporta como una fuente simple radiando la misma energía independientemente de su tamaño.

b) Divisores de frecuencia

Daremos dos tipos de divisores, aunque por supuesto el tema es muy amplio. El primero de ellos es el de cuasi segundo orden, también llamado "divisor de voltaje constante", aludiendo a su propiedad de que la suma de los vectores trasferencia de tensión es igual a la unidad.

Puede verse en la Fig. 10 un divisor de este tipo con sus fórmulas de cálculo [Ref. 4]. La principal ventaja es la sencillez y economía de diseño. Su trasferencia de fase es buena, así como también su tolerancia frente a errores en los valores de L y C . Las desventajas son a nuestro juicio dos; la pendiente de corte demasiado suave y el hecho de no ser redes de impedancia constante, sino que en las frecuencias de transición ésta baja considerablemente.

El próximo divisor de frecuencias sería, en orden creciente, el popular 12 dB/octava, también denominado de segundo orden. Lamentablemente este divisor adolece del problema de entregar sus salidas en contrafase en la frecuencia de transición. Esto es perfectamente audible, como lo demostrara Ashley [Ref. 7]. Algunos fabricantes optan por conectar con fase invertida uno de los parlantes, para evitar este "aguja" en la respuesta. Con esto caemos en otro problema: una singular respuesta de fase que conspira contra la naturalidad del sonido. Por esta razón este tipo de red, antes muy popular, está dejando de usarse en sistemas de alta calidad. Debido a esto, la obviaremos en nuestro estudio.

El divisor de frecuencias Butterworth, de tercer orden, es indudablemente la mejor red pasiva. Tiene una excelente característica de fase y una pendiente de 18 dB/octava que permite lograr una neta separación de canales. Su impedancia es constante en toda la gama. Sus únicos inconvenientes son: el alto costo y la necesidad

trolíticos si se usan dos en serie, con polaridades opuestas.

Los inductores serán con núcleo de aire para asegurar linealidad. Una fórmula de cálculo muy exacta y cómoda de usar es la dada por Wheeler (Fig. 12). Esta fórmula es válida para valores de $a \approx l \approx c$, que es justamente el formato típico de los inductores empleados en divisores de frecuencia. Los valores de la fórmula han sido adaptados a milímetros.

c) Mediciones de campo cercano

Para las mediciones finales del sistema, el método clásico es emplear una cámara anechoica. Como en general es difícil disponer de este tipo de cámaras, construidas con todos los cuidados y precauciones para asegurar la ausencia de reflexiones, se han intentado diversos métodos para obviar este problema. El de más rápida aplicación es el propuesto por Keele [Ref. 6; 1974], que describiremos sumariamente.

Si analizamos matemáticamente la presión sonora en las proximidades de un pistón circular rígido, ideal, radiando en un semiespacio de aire libre, encontramos la dependencia de la frecuencia ilustrada en la Fig. 13.

Vemos que para valores de $K_a < 1$ la presión de campo cercano P_N es independiente de la frecuencia. Del mismo análisis surge:

$$P_N = \frac{2r}{a} \cdot P_F \quad [18]$$

Siendo P_N = presión sonora de campo cercano

P_F = presión sonora de campo lejano

a = radio del diafragma

r = distancia a la que medimos P_F

La Ec. [18] es válida para $K_a < 1$; siendo

$$K = \frac{\omega}{C} = \frac{2\pi f}{340}$$

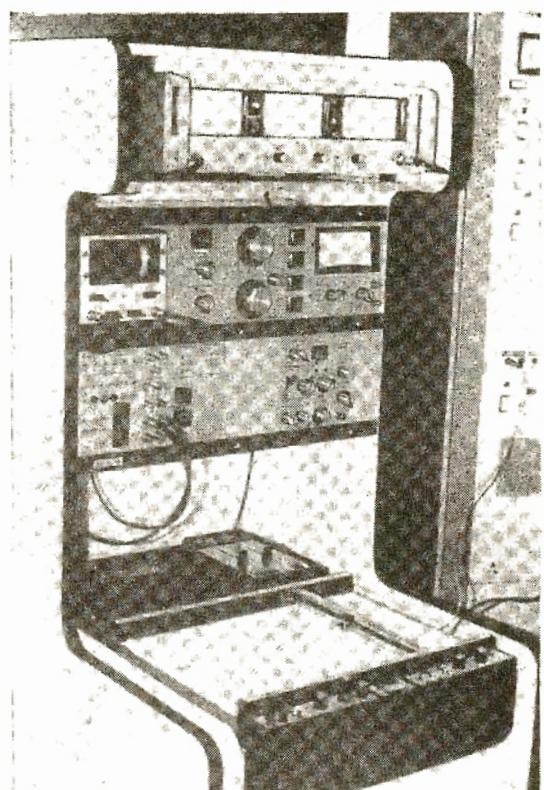


Foto 2: Vista general del equipo empleado en las mediciones finales del nivel sonoro. Puede verse el registrador X-Y de doble canal; el medidor digital de fase Brüel y Kjaer; el analizador Radiometer BKF-10, así como la interfase y unidad de programación con cassette, desarrolladas y construidas en Solidyne.

El valor de campo cercano P_N es, por otro lado, independiente de su distancia al altavoz, pues en esa zona puede considerarse que la onda es plana y por lo tanto no es válida la ley de las distancias inversas. Sin embargo, si deseamos que el error sea menor de 1 dB, el micrófono deberá colocarse a una distancia no mayor de 0,11 a . Esto, para un altavoz de 15", significa colo-

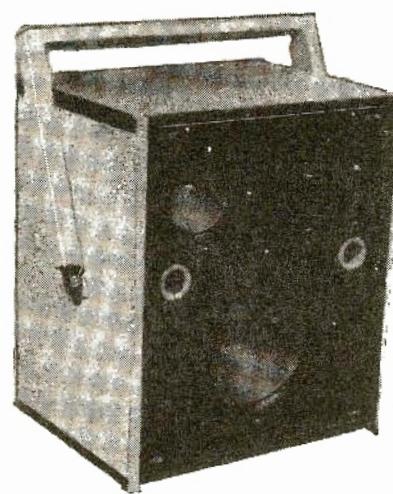


Foto 1: Vista del reproductor acústico de tres vías proyectado por el autor.

de emplear elementos reactivos de estrecha tolerancia, lo que al fin de cuentas también es una razón de costo. El circuito y las fórmulas de cálculo de esta red, pueden verse en la Fig. 11.

Los capacitores empleados en las redes deberán ser de tipo no-polarizado. Podrán emplearse capacitores elec-

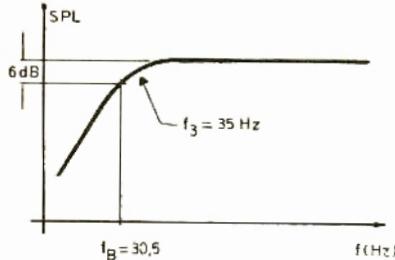


Fig. 14 — Respuesta en bajas frecuencias medida con el método de Keele.

carlo a menos de 2 cm.

Mediante este método es posible medir con gran exactitud gabinetes acústicos en el rango grave, en cualquier habitación, sin necesidad de tratamiento acústico. Luego, por aplicación de la [18], reduciremos esa medición a la de campo distante deseada. En el caso de los gabinetes reflectores de bajos, el método se torna algo más laborioso pues deben medirse en forma independiente, el altavoz y la radiación de la ventana. Luego ambas curvas se sumarán vectorialmente adicionando un factor de corrección dado por:

$$\Delta SPL = 20 \log \frac{a_p}{a_v} \quad [19]$$

donde a_p = radio del diafragma; a_v = radio equivalente de ventana. Esto quiere decir que si la ventana tiene la mitad del diámetro del diafragma, al sumar las curvas, deberá agregarse 6 dB a los valores obtenidos para este último.

Este método de medición no reemplaza, por supuesto, a la cámara anecoica o las mediciones al aire libre; pero brinda una verificación del comportamiento del sistema en las frecuencias muy bajas, en donde aún las buenas cámaras suelen presentar deficiencias en sus características. Deberá tenerse en cuenta, empero, que debido a la interacción entre el diafragma y la ventana (particularmente con ventanas pequeñas), las curvas sólo serán exactas hasta 1,6 f_b . Igualmente ha de recordarse que como la curva es vectorial, deberemos emplear las tablas correspondientes a curva de dos potencias sonoras expresadas en dB; o bien si empleáramos calculadoras, pasar de dB a potencia, realizar la curva, y luego expresarla nuevamente en dB.

Por todo lo visto creemos que este método puede emplearse ampliamente con gabinetes cerrados y de suspensión acústica, pero deberá ser tomado con precauciones para el caso de reflectores de graves. Daremos un ejemplo de una utilización en este último caso.

Ejemplo: El método será empleado para verificar la frecuencia de corte del sistema reproductor acústico antes calculado. Para ello tendremos en cuenta, como ya hemos visto, que a la frecuencia de resonancia de la caja, f_b , el diafragma radia un mínimo de energía, siendo la ventana la encargada de aportarla en su casi totalidad. Emplearemos ese punto característico para realizar las mediciones de campo cercano, obteniendo:

$$[P_N]_v = +84 \text{ dB} \text{ (medido a } f_b)$$

A su vez, aplicando la [19] obtenemos:

$$\Delta SPL = 10 \text{ dB}$$

Por otro lado, el nivel promedio de presión sonora medido sobre el cono del altavoz es de 80 dB, entre 100 y 300 Hz. Consideramos este valor como asintota horizontal. Además, conocemos que la caída de la respuesta será a un régimen de 24 dB/octava. Por lo tanto, definiendo el punto singular f_b , tendremos el resto de la curva. La respuesta a f_b , con respecto a la asintota será:

$$\Delta P = [P_N]_D + \Delta SPL - [P_N]_v = 80 + 10 - 84 = 6 \text{ dB}$$

A partir de este valor, trazaremos la curva sabiendo que

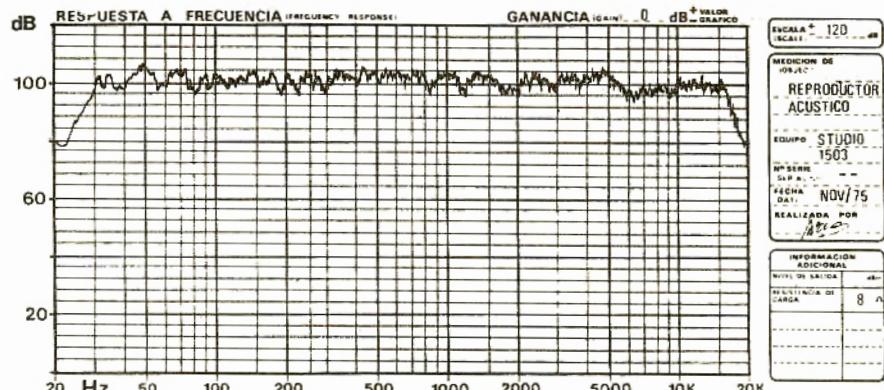


Fig. 15 — Respuesta a frecuencia del conjunto acústico, medida con micrófono Brüel y Kjaer. $f_b = 30.5$ Hz (Fig. 14).

Para encontrar el punto de 3 dB, puede hacerse en forma gráfica o bien a partir de la expresión analítica de la respuesta de un filtro de 24 dB/octava:

$$T = -10 \log \left[1 + \left(\frac{f_3}{f} \right)^8 \right]$$

De donde despejando f_3 , y teniendo en cuenta que $T = \Delta P$, para $f = f_b$, será:

$$f_3 = f_b \sqrt[8]{\log_{10} \left[\frac{\Delta P}{10} \right] - 1} \quad [20]$$

En nuestro caso aplicando la [20] obtendremos $f_3 = 35$ Hz, que es muy aproximado a los 36 Hz calculados anteriormente. La disminución de frecuencia puede explicarse, como también habíamos previsto, por el hecho de emplear un valor de Q_t algo mayor que el óptimo.

Conclusión

Con los principios expuestos ha sido desarrollada la versión definitiva de un gabinete de 3 vías que emplea divisores de frecuencia de 18 dB/octava. Esto implica la utilización de 6 inductores y 6 capacitores de precisión. Los resultados logrados, entendemos que justifican esa complejidad. La extrema limpieza del sonido y la reducida intermodulación son debidas en buena parte a este divisor. Las tareas de medición de nuevos altavoces y mejoras en los existentes continúan. Puede verse en la foto 2 una vista del sistema de medición empleado, que permite graficar respuesta a frecuencias, distorsión armónica y respuesta en fase. Este conjunto representa una formidable herramienta de trabajo y ha sido proyectado y construido en los laboratorios "Solidyne", excepto naturalmente, aquellos instrumentos asequibles en el mercado internacional, como el registrador X-Y y el analizador automático Radiometer BKF-10, así como el micrófono de condensador y unidades de amplificación, que son Brüel & Kjaer.

Reconocimiento

Deseamos dejar constancia de nuestro reconocimiento al Ing. Ladislao Hnilo, de la firma LEEA, por su paciente colaboración para lograr la fabricación de parlantes de características especiales de calidad. Así también a nuestro colaborador directo, Ing. David Wald, quien tuvo la responsabilidad de llevar adelante el programa de mediciones electroacústicas.

Referencias

- 1) Acústica; Leo Beranek; Edit. H.A.S.A.
- 2) Loudspeakers-Vented Boxes; A. N. Thiele; J. Audio Engineering Society, Vol. 19; Nos 5 y 6.
- 3) Improved measurement of loudspeaker parameters. Preprint AES N° 803 by J. R. Ashley and M. Swan.
- 4) Constant-voltage crossover network design by R. Small; AES, Vol. 19/1.
- 5) Active and passive filters as loudspeaker crossover networks by J. R. Ashley and A. Kaminsky; J. AES, Vol. 19, N° 6.
- 6) Low frequency loudspeaker assessment by nearfield sound-pressure measurement; D. B. Keele; J. AES, Vol. 22, N° 3.
- 7) On the transient response of ideal crossover networks; J. R. Ashley, J. AES, Vol. 10, pág. 241.