

ACUSTICA DE LAS AULAS DE LA ESCUELA DE INGENIEROS DE CAMINOS DE MADRID(*)

Por JAIME PFRETZSCHNER
JOSE PONS ESPI
MANUEL ELICES
CARLOS BARBA

Un concierto barroco interpretado en la catedral de Toledo y en el aula magna de la Escuela de Ingenieros tendría distinta sonoridad debido a que las características acústicas de los dos recintos son distintas. En la primera parte de este artículo se comentan cuáles son los factores principales que establecen la "calidad" de una sala de conferencias o de un aula. Utilizando estos criterios se analiza, en la segunda parte, el comportamiento acústico de varias aulas de la Escuela.

Para el proyecto acústico de aulas y auditorios se debe prestar principal atención a la acústica del "interior", mientras que en otros casos (viviendas, por ejemplo) el "aislamiento" acústico debe ser el principal factor a considerar. Una acústica interior deficiente es tolerable en aquellas habitaciones ruidosas por su cometido (discotecas), pero no es admisible en aquellos recintos destinados a la audición de la palabra o música. La acústica de un edificio debe planearse correctamente desde el momento de la concepción estructural y nunca cuando el edificio esté terminado, ya que entonces las soluciones o "parches acústicos" son mucho más difíciles de realizar y siempre mucho más caros.

I. Principales factores a considerar en el comportamiento acústico de las aulas.

Tiempo de reverberación.

Aunque ya desde antiguo se había comprobado cualitativamente que las reflexiones sonoras en el interior de una sala tienen una profunda influencia sobre la inteligibilidad de la palabra y la calidad de la música fue en el año 1895 cuando el trabajo experimental de Sabine, con datos cuantitativos, sentaba los principios científicos de la acústica de recintos, acabando con la serie de supersticiones que existían sobre el tema.

A través de exhaustivos estudios y comprobaciones experimentales de las propiedades acústicas de un recinto, Sabine (1) llegó a una relación empírica entre sus características de reverberación, tamaño y cantidad de material acústico absorbente. El tiempo de reverberación de un recinto cerrado ofrece una medida cuantitativa del amortiguamiento del sonido en su interior en función de su volumen y del grado de reflexión de las superficies que lo

definen (paredes, suelo y techo). Debe existir una relación entre el tiempo de reverberación de una sala y su adecuación a un tipo de utilización específica; una sala destinada a conferencias debe poseer un tiempo de reverberación bajo para conseguir una mejor inteligibilidad; por el contrario, si se desea destinar esta sala a audiciones de música barroca, el tiempo de reverberación debe ser muy alto por su mayor brillantez.

Se define el tiempo de reverberación como el tiempo necesario para que una vez cesada la emisión de energía sonora, ésta decrezca en un millón de veces su valor, lo que en términos de presión acústica significa que ésta disminuya desde su valor estacionario hasta otro situado 60 dB por debajo de aquél. La ecuación empírica de Sabine relaciona el tiempo de reverberación T (seg.), con el volumen V (m^3) del recinto y la absorción a , a través de la expresión:

$$T = \frac{0,161 V}{a}$$

donde $a = \sum S_i \alpha_i$, siendo α_i el coeficiente de absorción (coeficiente de Sabine) de la superficie S_i (m^2) (paredes, techos, etc.).

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 31 de mayo de 1976.

La deducción de esta expresión se basa en la acústica de rayos (o geométrica), donde se supone que la energía sonora emitida por una fuente se propaga en el espacio en forma de rayos, ignorando los fenómenos de difracción. En cada reflexión con las superficies límites los rayos son parcialmente reflejados y parcialmente absorbidos; después de un gran número de reflexiones sucesivas se supone que en el recinto se establece un campo acústico difuso, es decir, que la densidad de energía sonora es la misma en todo el volumen del recinto y que las direcciones de propagación son igualmente probables. Esta teoría es una simplificación enorme del comportamiento real, ya que la difusión no será perfecta, especialmente a bajas frecuencias donde aparecerá difracción (al ser las longitudes de onda del tamaño de los objetos sobre los que inciden), tampoco tiene en cuenta los modos propios de vibración del recinto, la posición en el espacio de los materiales absorbentes, y los posibles ecos focalizados (como los que se producen en el interior de una cúpula o recinto abovedado). A pesar de ello, cuando los volúmenes no son excesivos y la absorción media no es muy elevada, la aplicación de la expresión de Sabine proporciona una buena primera aproximación del comportamiento acústico del recinto, según expresiones matemáticas más elaboradas, como las obtenidas por Eyring (2) (año 1930), Sette (3) (año 1932), Millington (4) (año 1932), Young (8) (año 1959), y otros.

Para determinar el tiempo de reverberación óptimo de un recinto destinado a la audición de palabra se deben tener en cuenta su geometría, las características de los materiales y el grado de inteligibilidad deseado. En efecto, si se considera una fuente puntual que radia energía acústica en un espacio cerrado, gran parte de esta energía es reflejada por las superficies límites, de forma que a la onda directa se le superponen un gran número de ondas reflejadas. Suponiendo que las fases y amplitudes de estas ondas de presión estén repartidas al azar (de modo que las probabilidades de anulación por interferencia sean despreciables y que la fuente sonora radia de forma continua) la intensidad acústica en cualquier punto tomará valores mayores que los que se obtendrían para el mismo punto en el espacio libre. La ganancia en intensidad acústica en tales circunstancias suele ser del orden de diez y, en primera aproxima-

ción, se puede suponer que varía proporcionalmente con el tiempo de reverberación. Como consecuencia de este fenómeno, parece lógico, a primera vista, aumentar el tiempo de reverberación de un local al máximo posible para conseguir hacer audible cualquier sonido emitido con poca energía.

Si la emisión de la fuente sonora cesa repentinamente, la recepción de la radiación directa en el punto de medida cesará al cabo de un tiempo $t = r/c$ (r = distancia separación emisor-receptor, c = velocidad del sonido); sin embargo, en el punto de observación se seguirá recibiendo energía acústica procedente de las reflexiones en forma de una rápida sucesión de ondas con intensidad gradualmente decreciente. La presencia de esta energía acústica reverberada tiende a enmascarar la localización y la inteligibilidad de una nueva fuente sonora durante el tiempo en que esta energía ha decrecido desde su valor inicial a otro situado de 5 a 10 dB por debajo de aquél. Puesto que el tiempo de reverberación T está ligado directamente con la persistencia del sonido, está claro que a efectos de inteligibilidad, es deseable que este tiempo sea mínimo.

La elección de un tiempo de reverberación adecuado para cada recinto será un compromiso entre las dos situaciones extremas en función del uso a que se vaya a destinar el mismo.

Inteligibilidad.

Una medida de la inteligibilidad de la palabra está dado por el llamado "porcentaje de articulación silábica", o simplemente "porcentaje de articulación", que consiste en el número de palabras monosilábicas sin significado correctamente entendidas por un auditorio de cada 100 emitidas. Este porcentaje depende de las condiciones en que se realizan tanto la emisión como la recepción, tales como el nivel sonoro de emisión de la palabra, el ruido de fondo existente, la distancia entre emisor y receptor y, en el caso de situación en un recinto cerrado, las condiciones acústicas del mismo (volumen, forma, difusión y tiempo de reverberación). Se considera óptimo un porcentaje de articulación silábica del 85 por 100, y como poco aceptable uno del 65 por 100, que equivale a decir que 10 palabras de cada 100 no se entenderán, lo que fatigará a los oyentes debido

al grado de atención a que se verán sometidos para lograr una buena comprensión.

En la figura 1 se representan los porcentajes de articulación en función del nivel sonoro de la palabra emitida, para un ruido de fondo ambiental de 0 dB (el 0 dB de la escala de abscisas

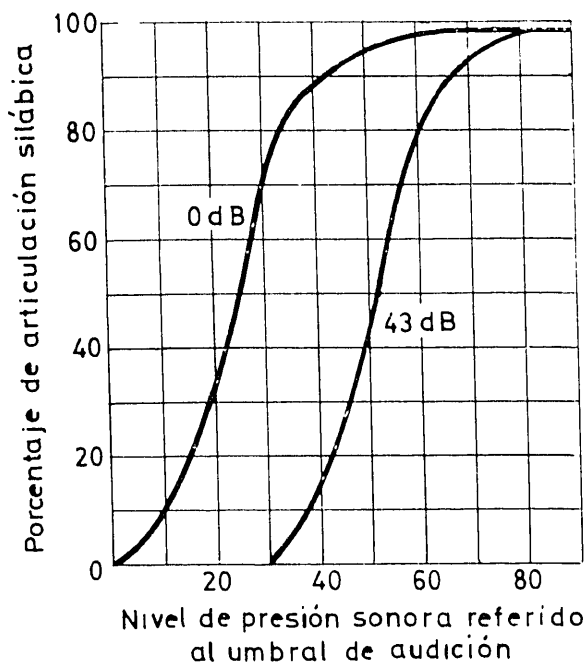


Fig. 1. — Curvas de porcentaje de articulación silábica en función del nivel sonoro de emisión de palabra para las siguientes situaciones de ruido: ruido de fondo ambiental de 0 dB y ruido de fondo típico de habitación de 43 dB.

corresponde al umbral de audición) y para el típico de una habitación con 43 dB. Estos gráficos se han realizado en condiciones de campo libre, es decir, en cámara anecoica ($T \approx 0$ segundos) y con un auditorio típico. Es fácil deducir de los mismos, que cuando el ruido de fondo es de 0 dB se obtiene una articulación del 88 por 100 para un nivel de emisión de palabra de 40 dB. Sin embargo, si el ruido de fondo existente es de 43 dB, al nivel de emisión de 40 dB le corresponden 17 por 100 de articulación. Hay que añadir que el proceso es mucho más complejo de lo que aquí se explica (5), puesto que el índice de articulación depende no sólo de los niveles, sino también de los espectros de emisión y fundamentalmente del tipo de ruido de fondo, ya que el mayor o menor poder enmascarante del mismo es función de su composición espectral.

Tiempo de reverberación óptimo.

Ya se ha indicado que la reverberación afecta a la inteligibilidad de dos maneras distintas: aumentando la reverberación de un local, aumentará el nivel sonoro, y por tanto, el índice de articulación; pero si el tiempo de reverberación aumenta demasiado, este efecto beneficioso se convierte en contraproducente, ya que las reflexiones se percibirán en forma de ecos, al sobrepasar el tiempo de integración del oído (*), con lo que el índice de articulación disminuirá. Si se disminuye el T de reverberación para conseguir el mismo índice de articulación, será necesario aumentar el nivel de emisión.

Es deseable que en el recinto no existan grandes variaciones del tiempo de reverberación en función de la frecuencia, ya que los niveles sonoros a aquellas frecuencias en las que T es mayor, se realzarían e inversamente para las frecuencias a las que corresponden T más pequeños, lo que tendría como consecuencia una pérdida de inteligibilidad. El tiempo óptimo de reverberación en función de la frecuencia no debe tener grandes variaciones dentro del espectro de la palabra. Para obtener una buena inteligibilidad, el tiempo de reverberación a 500 Hz debe ser menor de un segundo para habitaciones pequeñas, debiendo aumentar a medida que lo hace el volumen de la sala. En todos los casos, para frecuencias inferiores a 500 Hz, los tiempos de reverberación deben incrementarse; este aumento está fundado en consideraciones sobre aspectos psicofisiológicos de la emisión y audición de la palabra.

El tiempo óptimo de reverberación de una sala se determina a partir de criterios basados en la experiencia, obtenidos por distintos autores, que en general no coinciden cuando se trata de salas destinadas a la audición de música de distintos tipos (9). Como valores medios de los distintos criterios se pueden dar, a vía de ejemplo, para una sala de 4.000 m³, un tiempo de reverberación de 1,2 seg., si se utilizara como cinematógrafo; 1,3 seg., para ópera; 1,4 seg., para música de cámara; 1,5 seg., para sala de conciertos, y 1,9 seg., para música barroca.

(*) Tiempo de integración del oído: tiempo durante el cual el sistema nervioso del oído queda bloqueado, después de ser excitado.

No ocurre lo mismo en el caso de salas destinadas exclusivamente a palabra, donde el criterio generalmente aceptado es el de Knudsen, representado en la figura 2, en la que se muestra el tiempo óptimo de reverberación (en segundos) en función del volumen en metros cúbicos para una frecuencia de 500 Hz.

La figura 3 permite calcular el tiempo óptimo de reverberación (T) a cualquier frecuencia conociendo el de 500 Hz (T_{500}). Se observa que aquél se debe mantener constante para frecuen-

cias superiores a 500 Hz, mientras que para frecuencias inferiores a ésta, debe encontrarse dentro de la zona rayada. En las salas grandes T/T_{500} puede tener cualquier valor en la zona rayada para frecuencias inferiores a 500 Hz, mientras que para salas pequeñas es preferible que quede en la parte inferior de dicha zona (lo que se obtiene sin más que multiplicar el T_{500} por el factor R correspondiente a cada frecuencia, obtenido de la gráfica 3). Las desviaciones menores del 10 por 100 del valor especificado como óptimo se consideran aceptables.

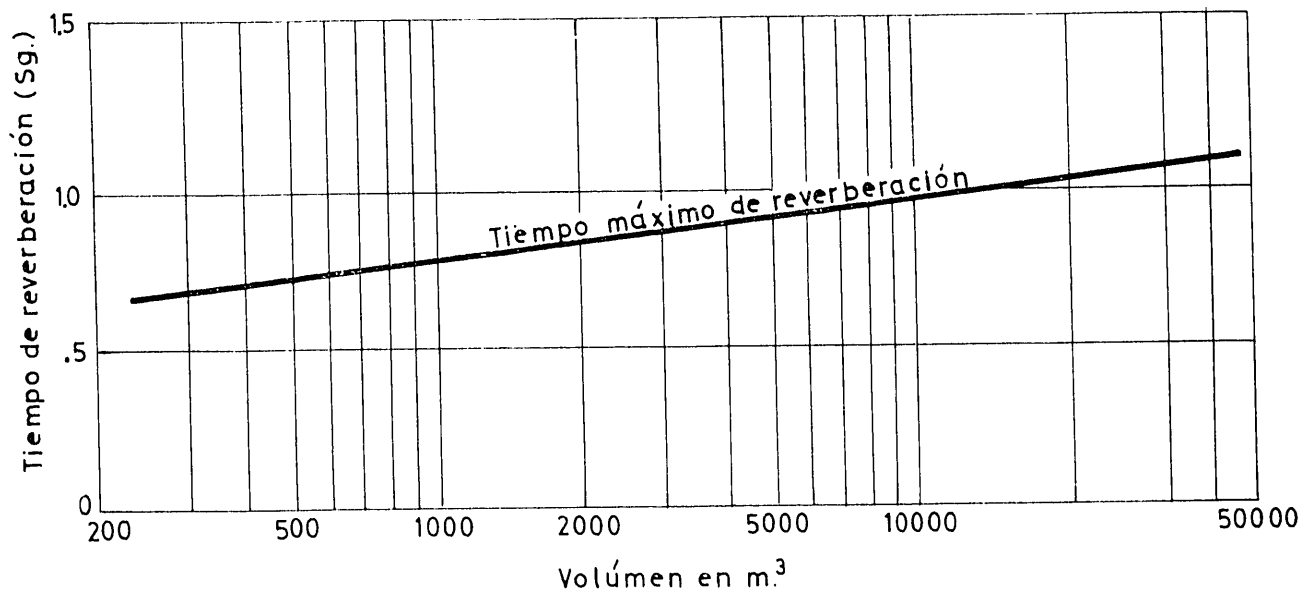


Fig. 2. — Tiempo óptimo de reverberación a 500 Hz, según Knudsen, para salas destinadas a conferencias.

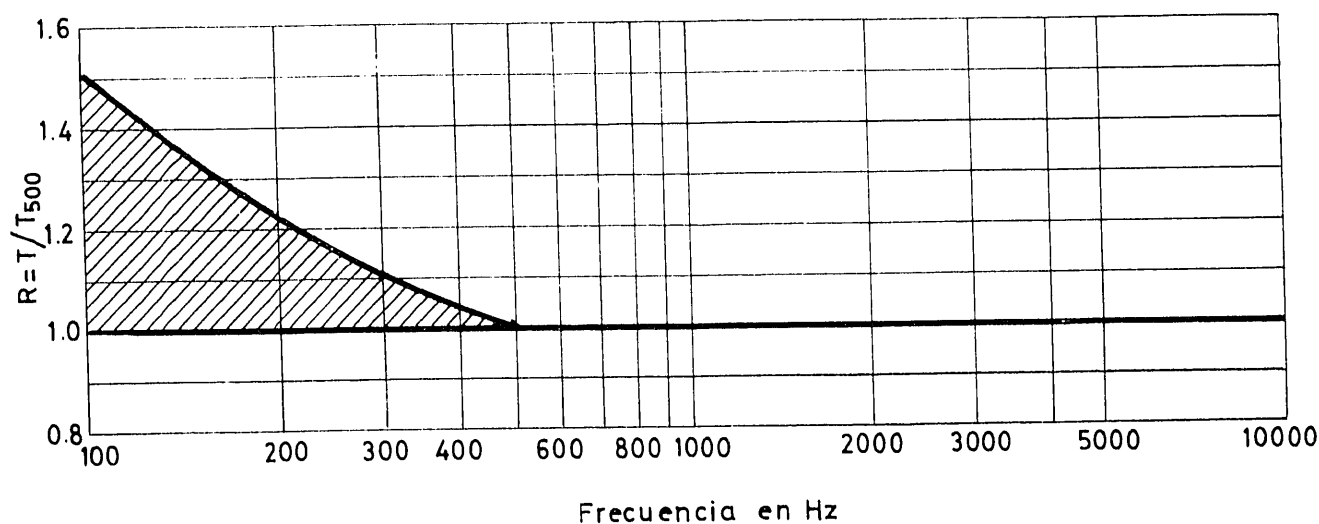


Fig. 3. — Curva para el cálculo del tiempo de reverberación en función de la frecuencia, a partir del tiempo óptimo de reverberación a 500 Hz calculado según la figura 2.

II. Características acústicas de las aulas.

Medida del tiempo de reverberación de diversas aulas.

Se han realizado medidas acústicas en tres aulas típicas de la Escuela, cuyos aforos son de 50, 100 y 250 alumnos, y cuyos volúmenes respectivos son 210, 436 y 820 m³, aproximadamente (figs. 6, 9 y 10).

Para medir el tiempo de reverberación medio de una sala bastaría con disponer de una fuente de sonido no selectiva, pero de un amplio espectro en frecuencias (como un disparo de pistola, por ejemplo), y de un sistema receptor compuesto por un micrófono de calidad con su sistema amplificador conectado a un registrador gráfico de niveles en el que quede registrado la variación del nivel de presión sonora en función del tiempo.

Las medidas del tiempo de reverberación a una sola frecuencia no son suficientes, en general, para determinar las características reverberantes de un recinto para otra frecuencia distinta, puesto que el comportamiento de los materiales absorbentes presentes en él suelen ser selectivos con la frecuencia (entre estos "materiales selectivos" debe incluirse al público), siendo ésta la causa de que se excite acústicamente al recinto para varias frecuencias normalizadas. Según normas internacionales, las frecuencias de emisión deben ser: 125, 250, 500, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz, por ser las más representativas del margen audible, ya que cubren enteramente el espectro de la palabra y el más significativo de la música.

Si para excitar el recinto se utilizan tonos puros continuos, en su interior se establecerá un campo de ondas estacionarias, lo que conduciría a medidas erróneas, condicionadas por las situaciones del emisor y receptor. Para paliar este inconveniente se utiliza en la emisión tonos puros modulados en frecuencia (tonos ululados), o mejor aún, ruido blanco filtrado en tercios de octava (*) que se sintoniza sucesivamente en las frecuencias centrales mencionadas anteriormente.

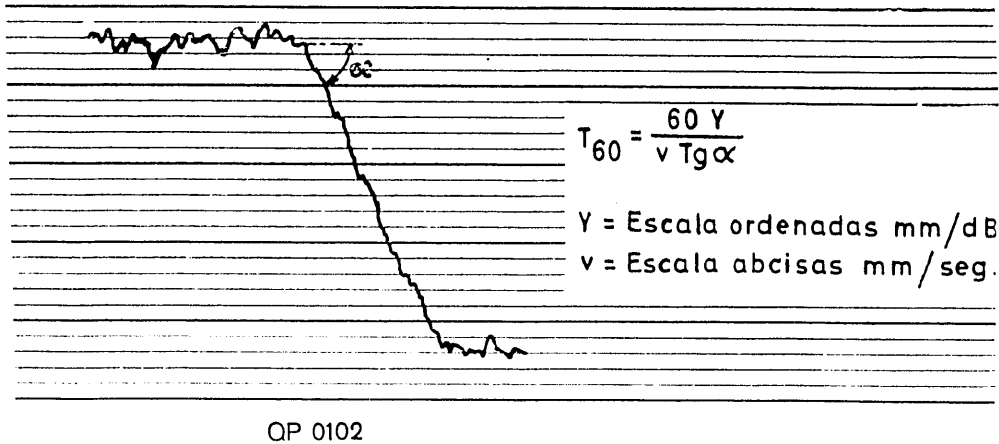
(*) El ruido blanco puede definirse como un ruido cuya energía por hercio es constante dentro del margen de frecuencia considerado.

Octava: a) intervalo entre dos sonidos cuyas frecuencias centrales estén en relación doble; b) Intervalo entre dos tonos de frecuencia f_n y $2f_n$. El intervalo en octavas entre dos frecuencias cualesquiera es el logaritmo en base 2 de la relación entre ellas.

Para la recepción y detección del sonido reverberado, además del micrófono y su preamplificador, se suele conectar a continuación un filtro de tercios de octava, que tiene como misión aumentar el margen dinámico del sistema receptor al disminuir el ruido de fondo ambiental (o exterior), ya que el nivel de ruido de fondo es proporcional al margen de frecuencias considerado. El sistema detector y registrador debe consistir en un instrumento de gran velocidad de inscripción, al objeto de no enmascarar y poder seguir fielmente la curva de amortiguamiento de la energía acústica, cuando la señal de excitación deja de emitirse. El amortiguamiento de la energía acústica en el interior de un recinto con buena difusión y ausencia de ondas estacionarias sigue una ley exponencial. Si el registro de dicha curva se realiza logarítmicamente (como es el caso de los registradores gráficos preparados para la medida de niveles en decibelios), la exponencial se transformará en una línea recta, como sucede en la figura 4, que muestra una medida del tiempo de reverberación para un punto situado en el interior de un aula mediana para una excitación de ruido blanco filtrado en tercios de octava, cuya frecuencia central corresponde a 4.000 Hz. En dicha figura se puede comprobar, sin ninguna dificultad, que el tiempo de reverberación es de 0,9 seg, sabiendo que la velocidad de desplazamiento del papel fue de 30 milímetros por seg⁻¹, y que cada división del papel corresponde a 2 dB.

La figura 5 muestra un diagrama de bloques, resumen de los sistemas emisor y receptor empleados en las medidas. El sistema emisor está formado por un generador de ruido blanco de 20 a 20.000 Hz, un filtro de tercios de octava, un amplificador de potencia y un altavoz de doce pulgadas. En el sistema receptor, el primer elemento consiste en un micrófono de condensador (calibrado y con un gran margen lineal de respuesta en frecuencia), seguido de su preamplificador, un filtro de tercios de octava y un registrador gráfico de nivel (de detección logarítmica) como elemento lector.

La medida del tiempo de reverberación se debe hacer en varios puntos de la sala (siempre suficientemente lejos de las paredes reflectantes), ya que, en general, la difusión no es suficientemente grande para que el nivel de energía acústico sea independiente del punto de medida, y después promediar los resultados.



QP 0102

Fig. 4. — Curvas de decrecimiento de la energía sonora en un aula de 436 m³, correspondientes a una frecuencia de 4 KHz (ruido blanco filtrado). Abscisas: velocidad desplazamiento del papel, 30 mm/seg. ¹; ordenadas: 2 dB por división.

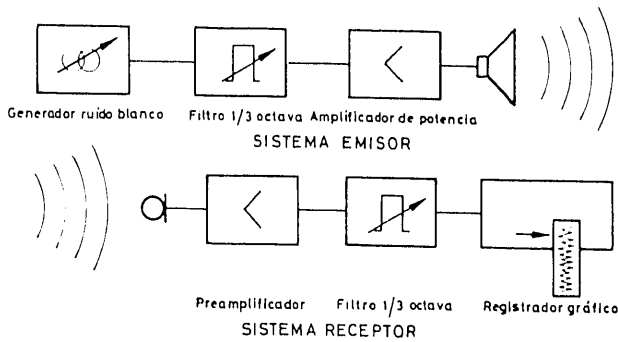


Fig. 5. — Diagrama de bloques de los sistemas emisor y receptor utilizados para las medidas del tiempo de reverberación.

Así, en el aula pequeña, se tomaron medidas en 4 puntos, 5 en la mediana y 6 en la grande. La situación de estos puntos cubría convenientemente el área de los asientos de los alumnos.

También se han realizado medidas con diversas posiciones de la fuente emisora; desde la posición en una esquina del aula, posición

en que generalmente están dispuestas las mesas de los profesores (excelente desde el punto de vista de las medidas acústicas, ya que de esta forma se excitan la mayoría de las resonancias propias de la habitación), hasta otras posiciones que el profesor utiliza normalmente, como es frente al encerado.

Resultados.

1. Aulas pequeñas.

En la tabla I se presentan los tiempos medios de reverberación de la sala pequeña (figura 6) medidos para distintas frecuencias y cuatro posiciones del micrófono receptor, estando vacía y con un 50 por 100 de alumnos. En la misma tabla se presentan los tiempos óptimos en vacío, según los criterios de Knudsen, obtenidos a partir de ábacos similares a los de la figura 2.

TABLA I

Tiempos de reverberación de un aula pequeña: en vacío, con el 50 por 100 de los alumnos y óptimo, según el criterio de Knudsen.

f (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
T ₆₀ (vacío)	0,80	0,81	0,77	0,79	0,79	0,81
T ₆₀ (al 50 por 100 de aforo)	0,76	0,66	0,62	0,61	0,68	0,70
T ₆₀ óptimo	≤ 0,97	≤ 0,79	0,69	0,69	0,69	0,69

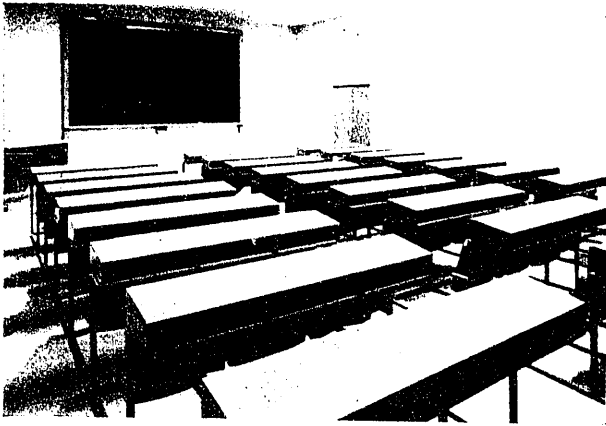


Fig. 6. — Aula "pequeña". Volumen aproximado: 210 m³.

El objeto de la segunda serie de medidas, con público presente, consistió en comprobar las absorciones introducidas por personas adultas sentadas, dadas por Knudsen en su obra, y cuyo cuadro resumen se presenta en la tabla II, a partir del cual se puede predecir aproximadamente el tiempo de reverberación de un local en función del número de personas que lo ocupen.

TABLA II

Unidades de absorción de una persona adulta sentada en función de la frecuencia.

f (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
S α (m ²)	0,23	0,33	0,39	0,43	0,46	0,46

Se puede apreciar una gran concordancia entre los datos obtenidos experimentalmente y los calculados teóricamente, partiendo de la hipótesis de que prácticamente el suelo y los pupitres no introducen absorción alguna (el suelo es de terrazo y los pupitres metálicos), con lo cual, al sentarse los alumnos no introducen ningún efecto de "sombra" sobre éste. La validez de esta hipótesis queda patente cuando se calcula la absorción total de la sala en vacío y con el 50 por 100 de alumnos, para 500 Hz, partiendo de los datos experimentales y con ayuda de la expresión de Sabine:

$$\text{Absorción total } (S\alpha)_{\text{vacío}} = 0,161 \times 211/0,77 = 44,12$$

$$\text{Absorción total } (S\alpha)_{50\%} = 0,161 \times 211/0,62 = 51,79$$

Restando ambas cantidades se obtiene la absorción real introducida por los alumnos = $(S\alpha)_{50\%} - (S\alpha)_{\text{vacío}} = 10,67$ unidades de

absorción. Según el criterio de Knudsen, para 25 personas se obtendría una absorción a 500 Hz de: $25 \times 0,39 = 9,75$ unidades. Así, pues, conocidos los tiempos de reverberación de un aula vacía puede calcularse con buena aproximación, con ayuda de la tabla II, los tiempos de reverberación en función del número de personas que la ocupan. La concordancia obtenida nos permite fiarnos del método teórico para las aulas grandes, ya que no es fácil realizar medidas con un 50 por 100 de alumnos y conseguir un silencio absoluto durante treinta o cuarenta minutos, cuando se somete al auditorio a un ruido blanco filtrado en tercios de octava con niveles de emisión de 80 dB o superiores. Al no permanecer en silencio el ruido de fondo aumenta de tal forma que enmascara la medida perdiendo fiabilidad.

En la figura 7 se presenta en línea de puntos la variación del tiempo de reverberación medido en función de la frecuencia para el aula pequeña; en vacío y con un 50 por 100 del afo-

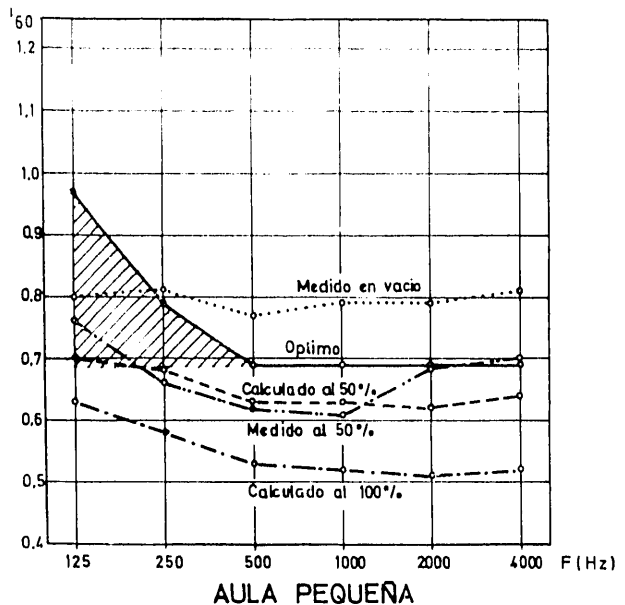


Fig. 7. — Tiempos de reverberación de un aula "pequeña".

ro; en línea discontinua se representa la misma situación, pero calculada según el procedimiento descrito más arriba y, por último, en trazo continuo el tiempo de reverberación óptimo, según el criterio de Knudsen. De esta figura se deduce que existe una buena concordancia entre los tiempos de reverberación medios y los calculados teóricamente cuando el aula está ocupada en un 50 por 100 (dispersión de las medidas entre ambas $< 0,06$ seg en los respectivos tiempos de reverberación. Así mismo se comprueba que la inteligibilidad es óptima cuando el aforo es del 50 por 100; cuando el aforo es del 100 por 100, solamente se conservará una buena inteligibilidad si el profesor eleva el volumen de voz, ya que en ese caso existirá demasiada absorción. Creemos que estas afirmaciones están de acuerdo con la experiencia del personal docente.

2. Aula mediana.

En la figura 8 se presentan los tiempos medios de reverberación, de un aula mediana (figura 9), medidos para distintas frecuencias y cinco posiciones del micrófono receptor. También se incluyen los valores calculados para distintas capacidades. En ella se puede apreciar que para una asistencia del 50 por 100 se obtendrá una buena inteligibilidad. No ocurrirá lo mismo cuando esté ocupada en su totalidad, ya que el nivel sonoro emitido por una persona

sin forzar la voz será insuficiente, dadas las características de la sala. Se ha comprobado que en este tipo de aulas el constructor ha recurrido al refuerzo electroacústico, compuesto por un micrófono, un amplificador de potencia y una columna de altavoces, como solución para disminuir este inconveniente.

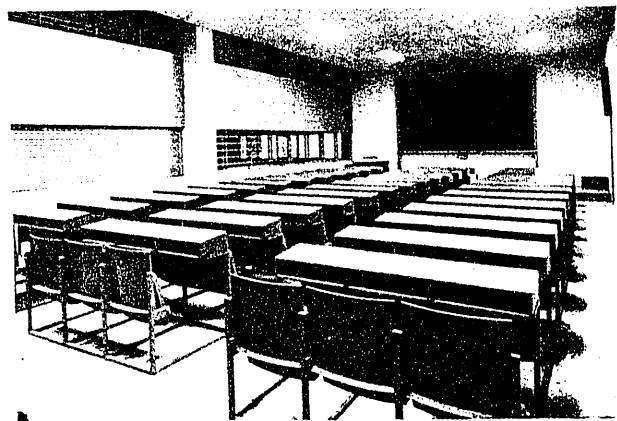


Fig. 9. — Aula "mediana". Volumen aproximado: 436 m³.

3. Aula grande.

En la figura 10 se muestran los tiempos medios de reverberación en un aula grande (figura 11), medidos a distintas frecuencias con el aula vacía. A partir de estos resultados se han calculado, como se ha indicado anteriormen-

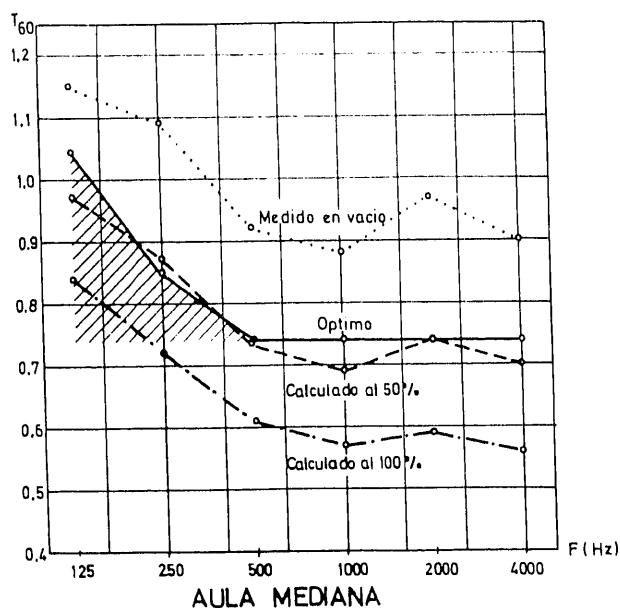


Fig. 8. — Tiempos de reverberación de un aula "mediana".

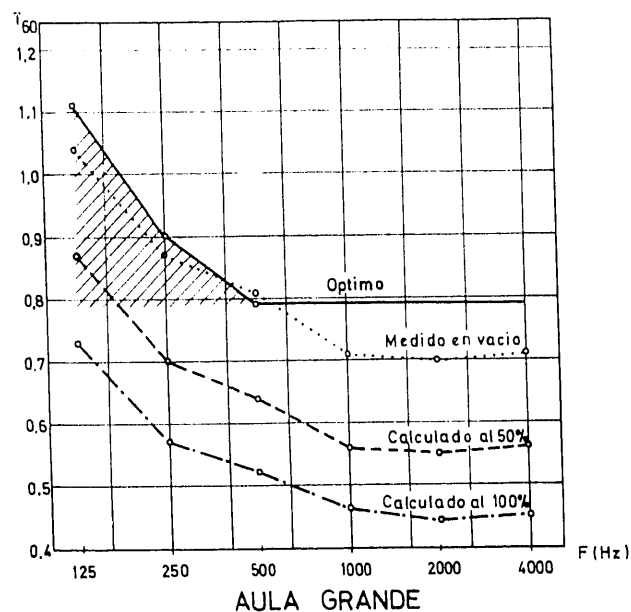


Fig. 10. — Tiempos de reverberación de un aula "grande".

te (*), los tiempos de reverberación para varios aforos. En la misma figura se ha dibujado el tiempo de reverberación óptimo para este volumen, al objeto de poder establecer comparaciones.

va a medida que se va llenando. Estas aulas se han "corregido" mediante un refuerzo electroacústico (con dos columnas acústicas) con objeto de obtener niveles lo suficientemente altos para que la inteligibilidad sea buena.

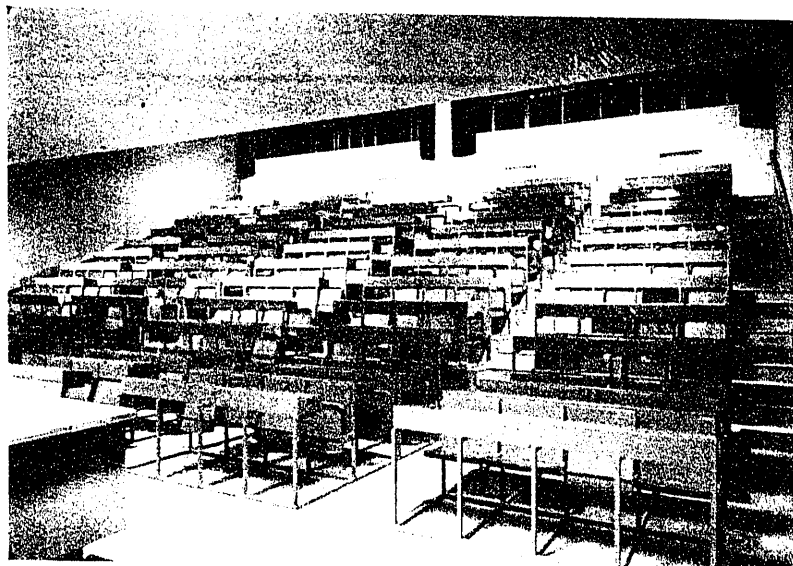


Fig. 11. — Aula "grande". Volumen aproximado: 820 m³; capacidad: 250 alumnos.

De estos resultados se deduce que al aula es muy absorbente y que el tiempo óptimo de reverberación es superior al medido con el aula completamente vacía. La situación se agrava

(*) Para estos cálculos se ha tenido en cuenta la absorción acústica del linóleo que recubre el suelo y las gradas. Esta corrección es muy pequeña.

Conclusiones.

En general, todas las aulas son "secas"; es decir, tienen exceso de absorción, proporcionada sin duda por el techo absorbente y no por las paredes recubiertas de corcho, que en las aulas grandes cumple su misión como elemento decorativo o de fácil limpieza, pero no

como elemento acústico. Conviene recordar que la valoración del análisis realizado en este artículo se ha efectuado partiendo del criterio de Knudsen, que es un producto elaborado de medias estadísticas de diferentes criterios. Resumiendo:

En las aulas pequeñas se puede disfrutar de una buena audición cuando están ocupadas en su 50 por 100. Al 100 por 100, la condición seguirá siendo buena con tal que el profesor eleve un poco el volumen de la voz.

Las aulas medianas presentarán una buena inteligibilidad para un aforo del 50 por 100 y un volumen de voz normal, pero cuando estén ocupadas al 100 por 100 exigirán forzar la voz del profesor para aumentar el nivel sonoro de forma que no se pierda inteligibilidad. El defecto puede subsanarse en estos casos con el equipo electroacústico.

En las aulas grandes, la inteligibilidad es

buena sin forzar la voz estando vacías; para un auditorio que ocupe el 50 por 100 del aula será preciso forzar el volumen de la voz. Si el aula está llena conviene recurrir al refuerzo electroacústico si se quieren conseguir buenos niveles de inteligibilidad.

En todas ellas se lograría mejorar la inteligibilidad, disminuyendo y distribuyendo la superficie de material absorbente y cuidando la geometría acústica de las mismas, ya que en ninguna se aprecian pantallas o reflectores que refuercen el sonido directo emitido por el locutor, defecto mucho más acusado en las aulas grandes, donde ni el volumen ni la geometría del techo son los adecuados.

Para obtener un criterio más eficaz de las condiciones acústicas de las aulas debería completarse el estudio con un test de inteligibilidad. Para ello haría falta un auditorio previamente seleccionado mediante audiometrías.

BIBLIOGRAFIA

1. SABINE: *Collected Papers on Acoustics*, Harvard University Press., 1922.
2. EYRING: *J. Acoust. Soc. Am.*, 1, 217, 1930.
3. SETTE: *J. Acoust. Soc. Am.*, 4, 193, 1932.
4. MILLINGTON: *J. Acoust. Soc. Am.*, 4, 69, 1932.
5. LOCHNER and BURGER: Optimum reverberation time for speech rooms based on hearing characteristics". *Acustica*, 10, 394, 1960.
6. HAAS: "Über den einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache". *Acustica*, 1, 1951.
7. KNUDSEN: *Acoustical designing in Architecture*. John Wiley & Sons., 1950.
8. YOUNG: *J. A. S. A.*, 31, 912, 1959.
9. M. R. SCHROEDER: "Computer models for concert hall acoustics". *A. J. P.*, 41, 461, 1973.