

Dependencia del tiempo de reverberación con el tamaño de audiencia en salas de pública concurrencia

Higini Arau.

Dr. Ciencias Físicas. Consultor Acústico.

ESTUDI ACUSTIC H. ARAU. Travesera de Dalt, 118, 3º 1ª. 08024 Barcelona.

Escrito en celebración de mi veinticinco aniversario de pertenencia a la SEA.

Dedicado a mi esposa M. Antonia e hijos Marc, Oriol, Quim y María.

En agradecimiento de su ayuda, cariño y comprensión del mucho tiempo que la Acústica les ha robado de mi compañía.

RESUMEN

Este artículo trata la cuestión del dimensionado de un recinto, de interés en la primera fase del desarrollo de su diseño, hallando la relación que regula la interdependencia del volumen del recinto, el tamaño de la audiencia y el Tiempo de Reverberación que deseamos conseguir de acuerdo a lo establecido por el criterio acústico de utilización de la sala.

1. INTRODUCCION

En el diseño actual de auditorios, en la primera etapa del dimensionado de un recinto, se sigue utilizando como antaño los números empíricos que relacionan el volumen de la sala con el número total de asientos que corresponde al aforo de ocupación del recinto. Con dicha actitud del consultor acústico frente al diseño nos da la impresión que las importantes investigaciones realizadas por L. L. Beranek^{1,11,12} y W. C. Kosten⁹, o no han sido comprendidas adecuadamente, o bien no se sabe cómo utilizarlas en la práctica para dilucidar cuál debe ser la dimensión volumétrica de un recinto en rela-

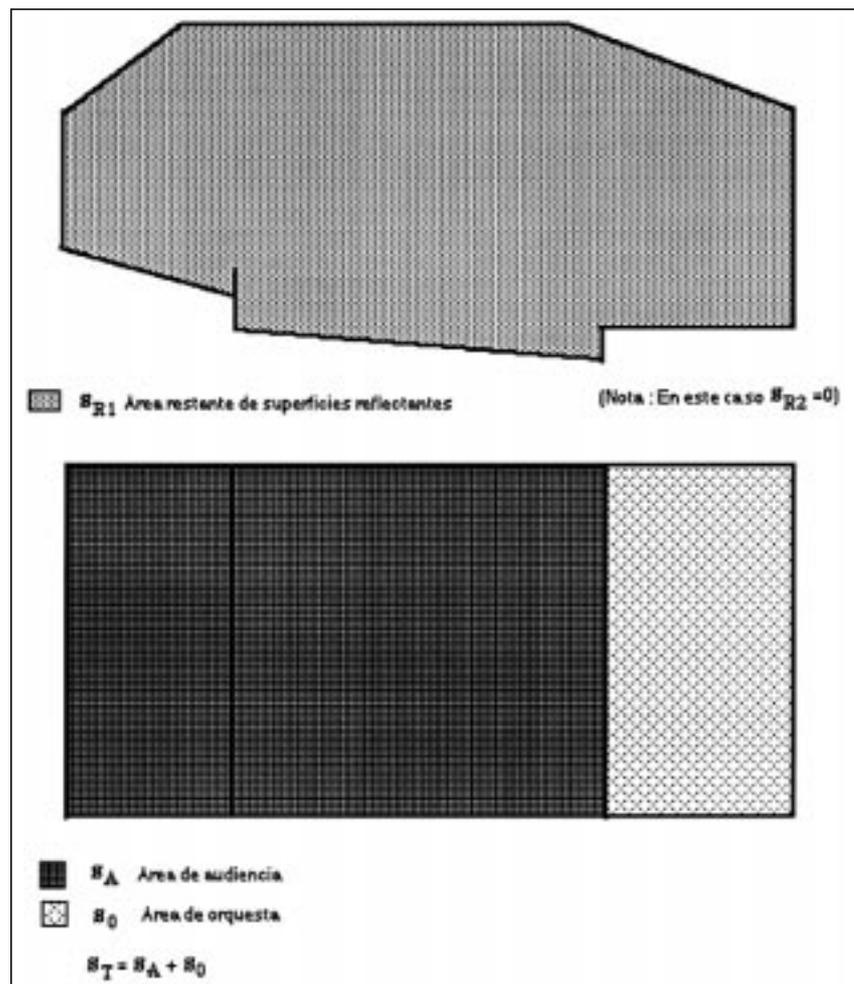


Figura 1. Representación del caso normal.

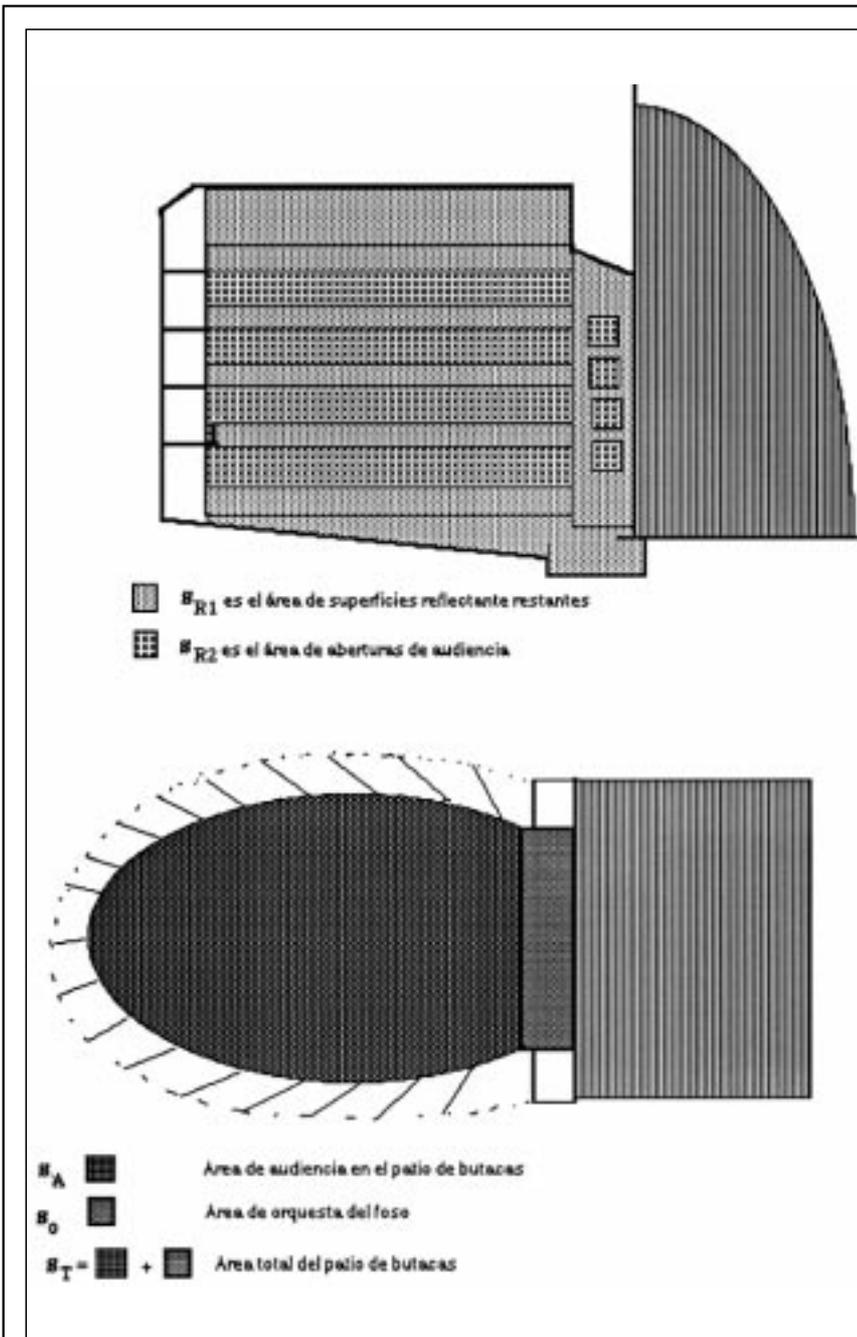


Figura 2. Representación del caso general.

ción al tamaño de audiencia y el tiempo de reverberación T_{MID} que por criterio acústico debe tener la sala en relación a la actividad que se desea desarrollar.

Asimismo en la misma línea, permanece sin contestación la pregunta que se formuló Kosten⁹ en su día acerca de qué debemos hacer con el volumen y el área de asientos de balcones o anfiteatros de salas como: La Scala de Milan.

Delante de los problemas enunciados intentaremos abordar el tema de su solución formal fundamentados en

un desarrollo teórico complementario al de las teorías de sus fundadores.

Así, por tanto, con nuestras fórmulas daremos contestación a la interrelación que existe entre las variables: Volumen: V , tamaño de Audiencia: S_A y Tiempo de Reverberación T_{MID} , bajo la hipótesis, que en la región de las frecuencias medias de 500 a 1000 Hz, no exista en la sala otra absorción que la debida a una audiencia sentada.

Como muy bien insinuó Kosten⁹ pueden haber dos tipos de distribuciones de audiencias sentadas.

Un tipo de distribución sería como la del Musikverein Saal e incluso el Boston Symphony Hall, que tiene una audiencia muy importante sentada sobre el patio de butacas y una pequeña audiencia colocada en anfiteatros poco profundos colocados a gran distancia del techo, de forma que podemos admitir no exista encajonamiento de audiencias.

Este para nosotros sería el caso que denominaremos **normal**, que se halla representado en la figura 1, y en el que consideraremos sea del todo cierto o no, que toda la audiencia se halla como colocada sobre la superficie principal del suelo. Esto quiere decir que el área de audiencia de los anfiteatros, si existe alguno, se sumará a la gran área de audiencia del patio de butacas.

El otro tipo de distribución de audiencias sería, como ocurre en la mayoría de salas de ópera, o bien en teatros, en que existe una audiencia en el patio de butacas pero además otra audiencia muy numerosa sentada en balcones, o palcos de anfiteatros, de forma que su profundidad es aproximadamente igual a su altura, por el que podemos entender se está produciendo el encajonamiento de la audiencia.

En este tipo de salas si las observamos, como los arquitectos las dibujan, veremos que las paredes son aberturas de audiencia separadas por los petos de las barandas de los palcos, que sirven de protección por un lado y por otro para producir reflexiones del sonido. A este caso le denominaremos **caso general** (ver figura 2).

Así tenemos que para obtener la conversión del caso general al caso normal sólo deberemos hacer desaparecer las aberturas de audiencia reemplazándolas por paredes.

Así por tanto en lo que sigue nos dedicaremos a estudiar el decremento de reverberación que se produce en una sala por ocupación de los asientos, en general tapizados, con el objeto de hallar las relaciones prácticas que nos permitirán deducir la interdependencia que debe existir entre el volumen de recinto, el tamaño de audiencia y el tiempo de reverberación que se estima óptimo para la actividad que se desea desarrollar. Para ello efectuaremos primero un recordatorio de los Tiempo

de Reverberación óptimos que se estiman adecuados para cada actividad y posteriormente efectuaremos un análisis de la teoría del caso general, antes enunciado, debido a que el caso normal se obtiene de forma muy simple a partir de los resultados calculados para aquél caso.

2. TIEMPO DE REVERBERACION OPTIMO

Muchos investigadores y consultores acústicos^{3,4,5,6,7} han establecido y usado respectivamente el criterio de Tiempo de Reverberación óptimo que depende del volumen de la sala y de la actividad que se pretende desarrollar. Este criterio generalmente se ha referido al valor medio del Tiempo de Reverberación de las frecuencias de 500 y 1000 Hz, para sala ocupada por audiencia, que normalmente se le ha denominado T_{MID} .

A continuación emitimos unas fórmulas que expresan el T_{MID} en función de su volumen y actividad de uso y que han sido obtenidas por ajuste potencial a partir de los gráficos elaborados por L. Cremer³.

Concierto

$$T_{MID} \text{ óptimo máximo} = 0.60 \cdot V^{0.1325}$$

$$T_{MID} \text{ óptimo mínimo} = 0.4225 \cdot V^{0.1331}$$

Opera

$$T_{MID} \text{ óptimo máximo} = 0.509 \cdot V^{0.1335}$$

$$T_{MID} \text{ óptimo mínimo} = 0.396 \cdot V^{0.1273}$$

Salas de lenguaje: Teatro, Conferencia...

$$T_{MID} \text{ óptimo máximo} = 0.368 \cdot V^{0.1505}$$

$$T_{MID} \text{ óptimo mínimo} = 0.264 \cdot V^{0.1394}$$

La búsqueda en el diseño del Tiempo de Reverberación que le corresponde a cada recinto en relación a su actividad de destino es esencial para que complementariamente se cumplan, como es requisito primordial, las magnitudes energéticas de audibilidad del sonido^{3b}: C_{80} , $D(\%)$, $L_i(10)$..., si deseamos que la sala tenga el comportamiento acústico que se le solicita.

Así por tanto, en la primera fase de diseño, cuando se está intentando averiguar la forma que tendrá la sala, por

aproximación entre la razón estética y la acústica, será básico definir con bastante precisión el dimensionado del recinto en función del T_{MID} óptimo que se desea conseguir y el aforo de audiencia que pretendemos haya en la nueva sala.

3. DESARROLLO TEORICO

Imaginemos que tenemos un recinto que se ajusta a la descripción efectuada para el **caso general**, ver figura 2, caso típico de salas de ópera. En este caso mirando la sala desde su interior tenemos la impresión de que los balcones o bien los palcos de anfiteatros, forman parte de las paredes. Así, por tanto, observamos que en realidad las paredes se hallan constituidas por aberturas de audiencia, que determinan un área total S_{R2} . Por otro lado los petos de las barandas y las restantes áreas de pared no contenidas en el interior de las cajas de cada balcón, o anfiteatro, más el área del techo que en conjunto definen un área total S_{R1} .

Supongamos ahora que el Tiempo de Reverberación medio T_{MID} , para sala con audiencia ocupando asientos, de acuerdo con Kosten⁹, es:

$$T_{MID} = 0.162 V/S_T \alpha_{eqMID}, \quad (1)$$

con

$$\alpha_{eqMID} = \alpha_T + (S_{R1} / S_T) \alpha_{R1} + (S_{R2} / S_T) \alpha_{R2}, \quad (2)$$

que es el coeficiente de absorción equivalente medio de las frecuencias de 500 y 1000 Hz.

donde:

V es el volumen de aire total del recinto incluyendo el de los balcones. (El volumen de la caja de escenario no debe incluirse como es admitido por Knudsen¹⁰.)

S_T es el área total formada por el área de audiencia del patio de butacas (y palcos no encajados) S_A más el área restante del suelo que incluye al del foso de músicos S_O en el caso de ópera.

En el área de audiencia S_A tenemos incluidos, como admitieron Beranek y Kosten, los pasillos de anchura no superior a 1.5 m.

α_T es el coeficiente de absorción de la audiencia ocupando asientos (*).

α_{R1} es el coeficiente de absorción

de las paredes restantes, que son opacas y reflectantes (*).

α_{R2} es el coeficiente de absorción de las superficies de abertura de los balcones o palcos de anfiteatros (*).

(*) Valor medio de las frecuencias de 500 y 1000 Hz.

A la proporción existente entre el área total de abertura de audiencia respecto al área total del patio de butacas S_T la llamaremos β : $\beta = (S_{R2} / S_T)$.

Así el **caso normal**, ver figura 1, lo obtendremos al desaparecer las aberturas de audiencia del caso general, porque se sustituye por pared, por lo que será $\beta = 0$, V el volumen del recinto, S_{R1} el área total de las paredes del recinto incluido el techo y S_T será el área de audiencia S_A más el área de la orquesta S_O .

Así por tanto, para el caso general, admitiendo que todo el sonido que penetra por las aberturas de los balcones, o palcos de anfiteatros, es absorbido por la audiencia que allí se ubica, es decir, que se verifica aproximadamente que $\alpha_{R2} = \alpha_T$, obtendremos a partir de (2) la siguiente expresión:

$$\alpha_{eqMID} = \alpha_T (1 + \beta) + (S_{R1} / S_T) \alpha_{R1}, \quad (3)$$

Escribiendo ahora α_T en función del número de audiencia n que ocupa asiento en butacas tapizadas, entre un valor comprendido entre 0, sala sin audiencia, y N sala totalmente llena; y teniendo en cuenta que la audiencia introduce un incremento de absorción α_s en relación a cuando el asiento se halla vacío, y también que esta absorción es incrementada un 10%, por efecto arista, de acuerdo a Beranek¹², tenemos:

$$\alpha_T = \alpha_{T0} + n (S_A / N) (1 / S_T) \cdot 1.1 \alpha_s, \quad (4)$$

donde:

α_{T0} es el coeficiente de absorción del área de asientos sin audiencia;

Reescribiendo la expresión (3) en función de este nuevo α_T tendremos:

$$\alpha_{eqMID} = \alpha_{T0} (1 + \beta) + (1 + \beta) n (S_A / N) (1 / S_T) \cdot 1.1 \alpha_s + (S_{R1} / S_T) \alpha_{R1}, \quad (5)$$

Por lo que a partir de (1) y (5) podemos deducir la siguiente expresión

del Tiempo de Reverberación que se halla expresada en función del número de audiencia n que va ocupando asientos:

$$T(n) = 0.162 V / (S_T [\alpha_{T0} (1+\beta) + (1+\beta)n (S_A / N)(1/S_T) \cdot 1.1\alpha_s + (S_{R1} / S_T) \alpha_{R1}]) \quad (6)$$

Expresión que transcribimos a continuación de forma más abreviada:

$$T(n) = k / k_1 + k_2 n \quad (7)$$

donde es:

$$k = 0.162 V/S_T$$

$$k_1 = \alpha_{T0} (1+\beta) + (S_{R1} / S_T) \alpha_{R1}$$

$$k_2 = (1+\beta) (S_A / N)(1/S_T) \cdot 1.1\alpha_s$$

Así tenemos que $T(n=0)$ sería el Tiempo de Reverberación de la sala con asientos sin audiencia y $T(n=N)$ representará el caso contrario de Tiempo de Reverberación T_{MID} de una sala con asientos todos ocupados.

Efectuando un desarrollo de Taylor de primer orden, hallando la variación de $T(n)$ respecto a n (número de asientos ocupados), entre el caso de una sala en que ningún asiento se halle ocupado y el de ocupación total de los asientos, obtenemos la siguiente expresión:

$$T(n=0) = T(n=N) + [\partial T(n) / \partial n]_{n=N} (0 - N) \quad (8)$$

La aproximación efectuada se halla justificada sobre la base de que el efecto de la absorción introducido sobre el asiento vacío provoque una pequeña variación del Tiempo de Reverberación.

Así por tanto de la expresión (7) aplicada en (8) se obtiene el siguiente resultado:

$$\Delta T = N (K_2 / K) [T(N)]^2 \quad (9)$$

en donde es: $\Delta T = T(0) - T(N)$

Si ahora llamamos ϵ a la variación relativa del Tiempo de Reverberación, que se produce entre sala vacía y llena de audiencia, $\epsilon = \Delta T / T(N)$, y substituyendo los valores k y k_2 , dados en (7), y teniendo en cuenta la fórmula (1), donde $T_{MID} = T(n=N)$ cuando los asientos de la sala se hallan totalmente ocupados por audiencia, se deduce fácilmente:

$$V/S_A = 6.75 \cdot (\alpha_s / \epsilon) \cdot (1+\beta) \cdot T_{MID} \quad (10)$$

Esta es la expresión del **caso general** que relaciona el volumen, el tamaño de audiencia y el Tiempo de Reverberación.

Así por tanto tenemos que la expresión que regula el dimensionado del recinto para el **caso normal**, en el que se cumple $\beta = 0$, será:

$$V/S_A = 6.75 \cdot (\alpha_s / \epsilon) \cdot T_{MID} \quad (11)$$

Experimentalmente hemos hallado, de nuestra propia experiencia de diseño de diversas salas de todo tipo, un valor de $(\alpha_s / \epsilon) \approx 1.09$, que también se ha justificado aproximadamente como valor medio de veintidos salas investigadas por Beranek [1], [3], que se indican en el apéndice 1. Así por tanto substituyendo valores en las expresiones (10) y (11) obtenemos los siguientes resultados finales.

$$V/S_A = 7.361 \cdot (1 + \beta) \cdot T_{MID} \quad (12)$$

caso general,

$$V/S_A = 7.361 \cdot T_{MID} \quad (13)$$

caso normal,

Cualquier otra sala que no cumpla con los casos puros descritos deberá resolverse intentando adaptarse al modelo más parecido.

4. EJEMPLOS DE APLICACION Y VALIDACION DE LA TEORIA

1) Supongamos por ejemplo que deseáramos diseñar una sala de conciertos que tuviera un tamaño de audiencia $S_A = 1390 \text{ m}^2$ y un tiempo de reverberación $T_{MID} = 1.8$, entonces por aplicación de la fórmula (13) calcularemos que el volumen de aire de la sala debe ser $V = 18416.9 \text{ m}^3$, que sería un caso similar al Boston Symphony Hall'.

2) Por ejemplo en Lleida nosotros ayudamos a diseñar el Auditorio Enrique Granados de los Arquitectos R. Artigues y R. Sanabria. El volumen de este recinto es $V = 8000 \text{ m}^3$ y el tamaño de audiencia es $S_A = 561 \text{ m}^2$, aplicando la fórmula (13) calculamos que el T_{MID} de diseño era $T_{MID} = 1.93 \text{ s}$, mientras que el medido finalmente, usando el método impulsional de Schröder fue $T_{MID} = 1.87 \text{ s}$. Este valor fue el valor medio experimental de nueve puntos del recinto que se muestra en la figura 3.

3) Por ejemplo el Musikverein Saal tiene $V = 15000 \text{ m}^3$ y $S_A = 985 \text{ m}^2$ a

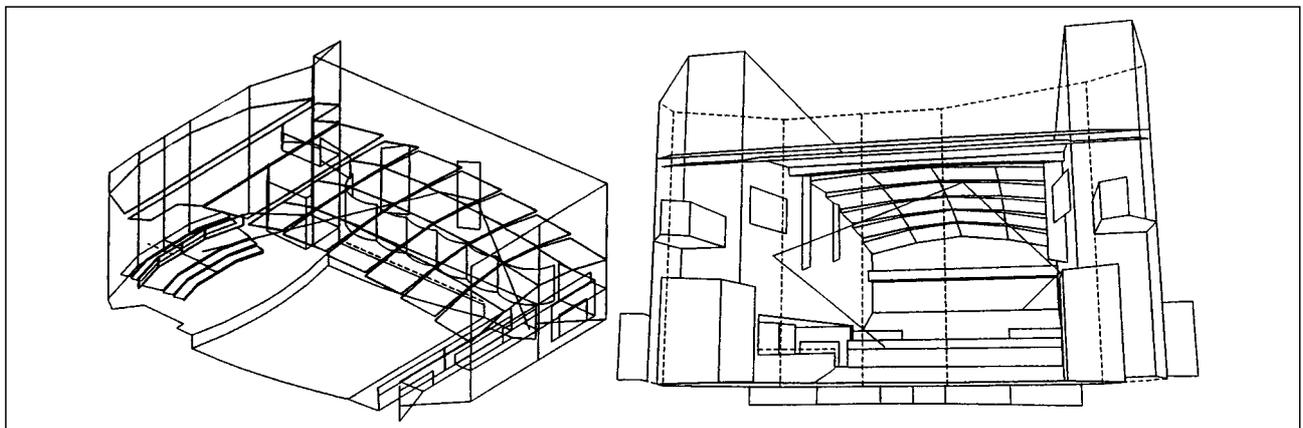


Figura 3. Auditorio Enrique Granados de Lleida.

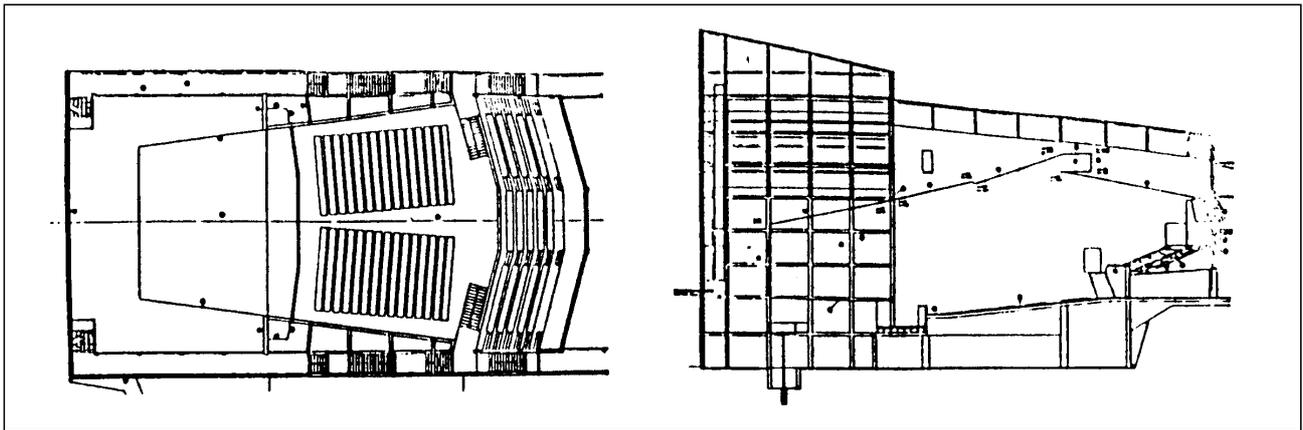


Figura 4. Auditorio de Sant Cugat del Vallés.

partir de (13) se calcula un $T_{MID} = 2.07$ s, siendo el resultado experimental¹ $T_{MID} = 2.05$ s.

4) La sala La Chaux-de-Fonds en Suiza tiene un volumen $V = 7870$ m³ y un área de audiencia de $S_A = 650$ m². A partir de (13) se calcula un $T_{MID} = 1.64$ mientras que el valor experimental determinado¹ es: $T_{MID} = 1.7$ s.

5) En Sant Cugat hemos diseñado, con Artigues-Sanabria, una sala polivalente dedicada a música sinfónica, ópera y teatro. En el caso de la configuración para música sinfónica el volumen es $V = 9386$ m³ con un tamaño de audiencia de $S_A = 558$ m², por lo que el T_{MID} calculado usando (13) era 2.29 s. Lo que significaba que teníamos que añadir una absorción adicional que compensara el exceso de reverberación que a priori estimamos se podía producir. Realizada la obra bajo estas directrices se obtuvo, para el caso de versión sinfónica, un $T_{MID} = 1.89$ s.

6) Por ejemplo el Auditorio Henry and Edsel Ford tiene un volumen $V = 17800$ m³ y $S_A = 1850$ m². El T_{MID} calculado por (13) es $T_{MID} = 1.31$ s y el experimental¹ es 1.45 s.

7) Otro caso, es el del Auditorio Lauretià of Sant Julià de Lòria de Andorra, en donde asistimos en el diseño a los Arquitectos P. Riera y J. M. Gutierrez (ver figura 5).

El volumen es $V = 3095$ m³ y $S_A = 348$ m², el T_{MID} calculado (13) es $T_{MID} = 1.21$ s mientras que el valor experimental es $T_{MID} = 1.25$ s.

8) Consideremos ahora el Eastman Theater, Rochester New York. El volumen es $V = 23950$ m³ y $S_A = 1905$ m², el T_{MID} calculado por (13) es $T_{MID} =$

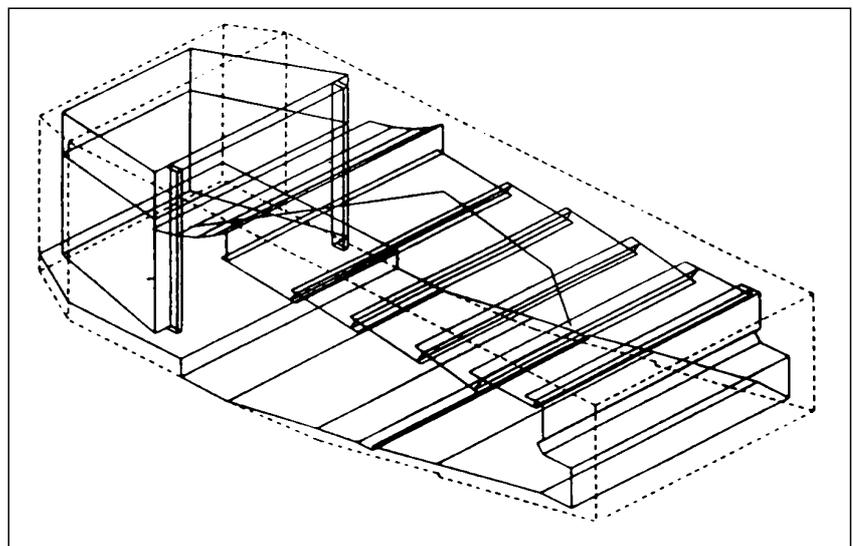


Figura 5. Auditorio-Teatro Lauretià de Sant Julià de Lòria.

$=1.71$ s mientras que experimental¹ es $T_{MID} = 1.65$ s.

9) La Scala de Milan tiene un volumen $V = 11245$ m³ y $S_A = 715$ m², $S_T = 1050$ m² y $\beta = 0.73$, por tanto el T_{MID} calculado aplicando (12) es $T_{MID} = 1.23$ s y el experimental¹ $T_{MID} = 1.2$ s.

10) El antiguo Liceu de Barcelona (ahora destruido) tenía un volumen $V = 13423$ m³ y $S_A = 639.64$ m², $S_T = 739.6$ m², con un $\beta = 1.16$, así el T_{MID} calculado usando (12) es $T_{MID} = 1.32$ s siendo experimental determinado (año 1992) $T_{MID} = 1.3$ s.

5. CONCLUSIONES

Las fórmulas prácticas elaboradas a partir de la primera teoría aquí expuesta, que se basa en los hallazgos de Beranek y Kosten, son muy útiles para la

predicción del T_{MID} cuando se conocen el volumen y el tamaño de audiencia. Sin embargo si se desea diseñar una sala, para un tamaño determinado de audiencia, en el que el Tiempo de Reverberación T_{MID} se halle de acuerdo al que especifica el criterio acústico según su uso de actividad, entonces nuestras fórmulas nos permitirán averiguar el volumen que la sala debe tener.

Y si la sala sometida a estudio fuera una dedicada a la ópera, o sea un recinto del caso general, entonces deberemos ajustar cuidadosamente S_A del patio de butacas y el área de aberturas de audiencia expresado por la relación β , en relación al volumen que deseamos obtener para que el Tiempo de Reverberación T_{MID} se ajuste al óptimo que por criterio deseamos conseguir.

Después de varios años de investigación y de uso profesional de estas

fórmulas podemos constatar que su uso en la predicción del dimensionado de una sala, siempre nos ha proporcionado resultados satisfactorios.

La sencillez del aspecto formal de las expresiones (12) y (13) y su alto valor en la aplicación práctica, hace que su uso se halle mucho más justificado desde el punto de vista teórico que el empleo de los números empíricos que relacionan el volumen con el número de asientos, sin obtener a partir de ellos ninguna información del T_{MID} que se esima obtener. Además como mínimo nuestros resultados son coherentes con los hallazgos de Beranek, de que la relación del volumen con la audiencia debe realizarse a través de su área de ocupación. Como asimismo también creemos hemos dado respuesta de alguna manera a la pregunta que se formuló Kosten, y que quedó sin contestación:

¿Qué pasa con el volumen y el área de asientos de balcones tales como la Scala de Milan, Brussels, Royal Albert Hall?.

APENDICE 1

En esta sección, en la Tabla I, escribimos el valor de (α_s / ϵ) calculado a partir de la expresión (11) y los datos de las salas analizadas por Beranek [1][3].

Case	V / S _A	T _{MID}	α_s / ϵ
Chicago Aire	11.805	1.70	1.028
Berlin MHS	12.973	1.65	1.164
Stuttgart	12.308	1.62	1.125
Cleveland	12.975	1.7	1.130
Turku	12.886	1.6	1.193
Liverpool	10.465	1.5	1.033
London RFH	11.167	1.5	1.103
Brussels	9.615	1.4	1.017
Buffalo	9.343	1.3	1.064
Viena MVS	15.22	2.05	1.099
Cambridge	11.65	1.5	1.150
Glasgow	12.828	1.9	1.000
Boston	13.482	1.8	1.109
Bristol	11.746	1.7	1.023
La Chaux de Fonds	12.107	1.7	1.055
Basel	14.189	1.7	1.236
Zurich	13.028	1.6	1.206
Leipzig	11.712	1.55	1.119
Lenox	14.842	2.05	1.072
Jerusalem	11.542	1.75	0.977
Tel Aviv	12.470	1.55	1.191
Detroit	10.340	1.55	0.988
Valor medio			1.09

Tabla 1. Datos de veintidos salas.

El valor medio (α_s / ϵ) calculado, redondeado a dos decimales, coincide con el determinado en base a nuestra propia experiencia, que para un valor

medio de $S_0 / S_A = 0.136$ de las 22 salas descritas, significa que $\alpha_{eqMID} = 1.06$, tiene un valor casi coincidente con el indicado por Kosten⁹.

REFERENCIAS

1. BERANEK L. L. (1962) *Musics, Acoustics & Architecture*. John Wiley & Sons Co Ltd.
2. FURRER W. (1964) *Room and Building Acoustics and Noise Abatement*. London Butterworths.
3. CREMER L. - MULLER H. - SCHULTZ T. J. (1982) *Principles and Applications of Room Acoustics*. Vol. 1. Appl. Sci. Publisher.
4. RETTINGUER M. (1977) *Acoustic Design and Noise Control* Vol. 1. Chemical Publishing Co.
5. DAY B. F., FORD R. D. & LORD P. (1969) *Building Acoustics*. Elsevier Publishing Co. Ltd.
6. PARKIN P. H., HUMPHREYS H. R. & COWELL J. R. (1979) *Acoustics, Noise and Buildings*. Faber & Faber.
7. LORD P. & TEMPLETON D. (1986) *The Architecture of Sound*. The Architectural Press: London.
8. BARRON M. and LEE L. J. (1988) "Energy Relations in Concert Auditoria. I. J. Acoust. Soc. Am. 84, 618-628.
9. KOSTEN C. W. (1965/1966) New Method for the calculation of the Reverberation Time of Halls for Public Assembly. *Acústica*. Vol 16, nº 6, 325-330.
10. KNUDSEN V. O. & HARRIS C. M. (1950) *Acoustical Designing in Architecture*. John Wiley & Sons Inc.
11. BERANEK L. L., (1960) Audience and Seat Absorption in Large Halls. *J. Acoust. Soc. Am.* 32, nº 6, 661-669.
12. BERANEK L. L., (1969) Audience and Chair absorption in Large Halls. II, *J. Acoust. Soc. Am.* 45, nº 1, 13-19.