

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS QUE MIDEN LA CALIDAD DE SALAS DE CONCIERTOS

PACS: 43.55.Fw

Alicia Giménez Pérez, Albert Marín Sanchis, Antonio Sanchis Sabater, José Romero Faus, Salvador Cerdá Jordá, M^a Dolores Jorge Vanacloy.
Grupo de Acústica Arquitectónica, Ambiental e Industrial, (A.A.A.I.). Laboratorio de Acústica Industrial, (L.A.I.).

Universidad Politécnica de Valencia.

Camino de Vera 14. Edificio D4-D5 Bajo. Apartado de Correos 22012
46080 Valencia

Tel: 963 877 524, 963 877 007 ext 5242, Fax: 963 879 529

E-mail: agimenez@fis.upv.es, amarin@fis.upv.es, asanchi@fis.upv.es, romerof@arrakis.es,
cerdaj@uv.es, mdjorge@dib.upv.es.

ABSTRACT

In the study and design of concert and lecture halls, the rooms intended for listening are of maximum complexity due to sound transmission process and response of listeners to the perceived sound. In the case of music halls, this complexity increase caused by different requirements of each type of music for an optimum hearing. In the last years, several investigators have been interested in the study of the correlation between objective measures and subjective evaluations. This has originated a great number of parameters for the determination of quality acoustics of designed rooms. In this work we expose the current state of the art of these studies.

RESUMEN

En el estudio y diseño acústico de recintos, las salas destinadas a la audición musical son de máxima complejidad por el propio proceso de transmisión sonora y fundamentalmente por la respuesta de los oyentes a la señal percibida que, en el caso de la música se ve acrecentada por las exigencias diferentes de cada tipo de música para una óptima audición. En los últimos años diferentes investigadores se han interesado por el estudio de la correlación entre las medidas objetivas y las valoraciones subjetivas dando lugar a un gran número de parámetros para la determinación de la calidad acústica de las salas de conciertos. En este trabajo exponemos la evolución de estos estudios hasta el estado actual de los mismos.

LA ACÚSTICA EN SALAS DE CONCIERTOS

La calidad acústica de un lugar de escucha depende de características diversas (volumen, superficie, forma, coeficiente de absorción, direccionalidad y emplazamiento de la fuente, etc.) que, junto a las propiedades perceptivas del oído humano establecen los dos caminos para abordar el problema:

- Estudio físico
- Estudio psicológico

Estudio físico por el que se analiza el proceso de transmisión sonora en la sala, dependiente de factores característicos del recinto, factores inherentes a la propagación sonora y factores determinantes sobre la fuente y *estudio psicológico* en el que intervienen las características del canal auditivo humano, de comportamiento complejo puesto que depende de variables difícilmente cuantificables.

Para el primer análisis es preceptivo el conocimiento de las características de la fuente emisora y en “*Salas de Conciertos*” se complica extraordinariamente por la dependencia de la fuente música de múltiples factores como son el emplazamiento de la orquesta, número de ejecutantes, así como la disposición y tipos de instrumentos con sus espectros correspondientes. Por todo ello, el cálculo se realiza con fuente de geometría y direccionalidad estándar. En el estudio psicológico se establecen criterios subjetivos de calidad mediante diferentes parámetros que cuantifican la sensibilidad del oído humano a la señal percibida como nivel, frecuencia y duración de la señal.

No cabe duda que en el estudio y diseño acústico de recintos, la mayor complejidad la tienen las salas destinadas a la audición musical. No existen fórmulas magistrales que permitan asegurar, “a priori”, su calidad acústica. Complejidad que se ve acrecentada porque cada tipo de música tiene unas exigencias acústicas específicas y diferenciadas y además la falta de un lenguaje común y universal entre los diferentes colectivos involucrados, (músicos, acústicos y audiencia).

A lo largo de las últimas décadas se han hecho grandes esfuerzos para relacionar las preferencias subjetivas sobre la calidad acústica de una sala, con una serie de parámetros objetivos (medibles) y aunque en la actualidad nos encontramos lejos de conseguir una perfecta correspondencia entre las valoraciones objetivas y subjetivas, el progreso en este sentido es notorio.

Por otra parte, el margen de los valores recomendados para cada parámetro no se ha establecido como fruto de profundos estudios matemáticos, sino que se ha fijado siguiendo un proceso totalmente empírico. Tal proceso ha consistido en analizar un gran número de salas de conciertos y en determinar los valores de sus parámetros acústicos más representativos. Los valores correspondientes a aquellos recintos considerados unánimemente como excelentes desde el punto de vista acústico, han sido elegidos como patrones.

En este trabajo, con las bases anteriormente indicadas, exponemos la evolución de los estudios sobre Salas de Conciertos que han dado lugar al gran número de parámetros evaluadores hasta llegar al estado actual de los mismos.

PARÁMETROS EVALUADORES

Esta complejidad en el estudio de salas de conciertos ha dado lugar a la creación de diferentes líneas de investigación que analizamos a continuación.

Si el estudio de los criterios de evaluación de salas se hace cronológicamente comenzaríamos por *Sabine*, para el que el único parámetro válido es el **TIEMPO DE REVERBERACIÓN**. Ante esto cabe preguntarse cuántos parámetros son necesarios y suficientes. Para respondernos a esta pregunta estudiamos la evolución de tres grupos de investigadores pioneros en el campo de la investigación acústica y psicoacústica entre los años 70 y 80, pertenecientes a las escuelas de **DRESDEN**, con investigadores como *Reichardt, Schmidt, Shultz, Cremer, Kürer, GOTTINGEN* con *Gottlob, Siebrasse, Eysholdt y Schroeder* y **BERLÍN** con *Lehman y Wilkers* y acústicos como *Ando, Barron, Beranek, Fricke, Gade, Hidaka, Haan, Marshall y Okano* entre otros.

Los grupos e investigadores mencionados estudiaron parámetros diferentes, justificando la mayor importancia de los mismos sin abandonar el criterio temporal, cuyo parámetro fundamental, TIEMPO DE REVERBERACIÓN de *Sabine*, dejan de considerarlo como único y proponen nuevos parámetros temporales que están correlacionados con la impresión subjetiva.

Sus conclusiones para la obtención de las cualidades subjetivas buscadas se establecen en tres criterios:

- **Criterios energéticos** para el estudio de la cualidad llamada **TRANSPARENCIA** cuyo significado para la audición de la música está en la percepción separada de tonos en el tiempo y de instrumentos tocados simultáneamente
- **Criterios temporales** que cuantifican la cualidad denominada **REVERBERACIÓN**, representativa del grado de viveza de la sala
- **Criterios espaciales** para el cálculo de parámetros que proporcionen la **IMPRESION** y **SENSACION DE ESPACIO**, sentirse envuelto por el sonido, y tener la sensación de sala pequeña y de estar junto a la fuente sonora

Criterio Energético

El primer parámetro energético introducido por Thiele en 1953, fue la **DEFINICIÓN (D)**, (Deutlinchkeit). Este parámetro como relación entre la energía temprana que llega en un intervalo de tiempo con la energía total, fue estudiado posteriormente variando estos intervalos por *Schroeder-Gottlob-Siebrasse* y *Wilkens-Lehmann* existiendo diferencias en el rango óptimo de variación.

Beranek y *Shultz* por su parte definieron el parámetro "HALLMASS" independientemente, *Reichard* y *Schmidt* propusieron el parámetro "HALLABSTAND" como relaciones energéticas directas y reverberada para diferentes intervalos, desechándose los mismos al no establecer concordancia con las preferencias subjetivas en salas como la "*Philharmonic Hall*", *Lincolnd Center*.

Reichardt-Abel Alin-Schmidt en su búsqueda de un parámetro que cuantificara el límite entre lo deseable y no deseable, definen la **CLARIDAD**. *Reichardt-Lehman-Wilkens*, correlacionan los valores medidos de este parámetro con la respuesta subjetiva. *Gottlob-Siebrasse-Schroeder* estudian este parámetros variando los intervalos de tiempo y *Reichardt-Lehmann* determinan la dependencia de este parámetro con la situación en la sala. *Cremer* recomienda el cálculo para cada banda de frecuencia entre 125 y 4000 Hz y por su parte *Beranek* recomienda un valor medio (music average) entre 500, 100 y 2000 Hz, evitándose siempre valores superiores a 1 para sala vacía, *Marshall* sin embargo propone un rango más amplio para salas llenas

Un parámetro definido por *Eysholdt* común a las escuelas de **Berlin** y **Gottingen** que cuantifica el balance espectral es la **DENSIDAD ESPECTRAL (S)**, dependiente del tipo de música, composición de la orquesta y preferencias del director y para el que es difícil fijar el intervalo óptimo de variación.

Otra aproximación sobre relaciones energéticas para salas de conciertos, la realizó *Jordan* al proponer un nuevo parámetro **BALANCE DE ENERGIA PRIMARIA** (Early Energy Balance, EEB) , no estableciendo valores óptimos y de un amplio rango de variación.

Cremer-Kürer plantean el **TIEMPO DE GRAVEDAD (t_s)**, parámetro energético-temporal que pondera según el tiempo de llegada las componentes individuales de la energía. Este parámetro es utilizado por investigadores como *St. An*, *Wilkens-Lehmann* como cuantificador del límite brusco entre energía temprana y tardía.

Lehmann como una medida del grado de amplificación de la sala propone la **SONORIDAD (G)** (Strength Factor), *Beranek* establece su valor óptimo y su cálculo como promedio en sala vacía para frecuencias medias.

Criterio Temporal

La reverberación fue hasta hace unos años la característica fundamental para la calificación y diseño de salas. A principios del siglo XX *Sabine* definió el tiempo de reverberación como parámetro único para la acústica de salas, pero ante la posibilidad de predicción de este

parámetro, acústicos y arquitectos investigaron tanto las propiedades absorbentes de los materiales como diferentes formas y geometrías, creándose nuevos conceptos más subjetivos y considerando al tiempo de reverberación como un parámetro más entre otros. Su determinación ha sido abordada por numerosos investigadores *Eyring, Norris, Millington, Pujolle, Costen, Atal, Schroeder, Ando, Gerlach y Kuttruff* entre otros, que han propuesto diferentes expresiones de cálculo para el tiempo de reverberación, sin embargo se han creado otros parámetros temporales más subjetivos que éste.

A partir del análisis de la curva sonora, se han estudiado diferentes parámetros que puedan correlacionarse óptimamente con la impresión subjetiva medidos en diferentes salas y ensayados en modelos a escala reducida y en auditorios a escala real. *Atal-Schroeder-Sessler* estudiaron la relación entre el tiempo de reverberación subjetivo y el proceso de descenso sonoro proponiendo diferentes intervalos para el descenso de la señal sonora, (-5,-25), (-5,-35), (-10,-25) dB. *Jordan* propone y cuantifica el **TIEMPO DE ASCENSO** (Rise Time, TR), y el **INDICE DE INVERSION** (Inversion Index, II), éste último como una indicación de balance entre el escenario y la audiencia en general o zonas concretas de ella. *Schroeder* utiliza la **PENDIENTE DE LA CURVA DE ASCENSO** (Steepness, *S*) para diferentes valores de nivel sonoro. Todos estos parámetros tienen sus seguidores, sin embargo en la actualidad, el criterio más aceptado por su alto grado de correlación con la respuesta subjetiva es el que cuantifica el **PRIMER TIEMPO DE DESCENSO** (Early Decay Time, EDT) que corresponde a un descenso de 10 dB. Como parámetro temporal mayoritariamente utilizado, numerosos investigadores han cuantificado sus valores óptimos existiendo diferencias en sus propuestas en base a estudios por modelización, (*Eysholdt, Gottlob, Kohlrausch*), por la respuesta de la audiencia, (*Barron*) o bien tomando como base la abundante relación de resultados sobre salas calificadas por *Beranek*. Existe un vacío por la falta de propuestas de valores óptimos de la reverberación a frecuencias bajas y altas que se “resuelve” con diversos coeficientes multiplicadores de los valores a medias, tomando como base los resultados de *Beranek*.

Otras cualidades acústicas fundamentales son la **CALIDEZ** o **TIMBRE** (Bass Ratio, BR) y el **BRILLO** (Br), calificadoras de la respuesta de la sala a bajas frecuencias el primero, y la riqueza en armónicos el segundo; según *Wilkens y Beranek* se cuantifican a partir de los valores de RT a medias. Otro parámetro fundamental y estadísticamente independiente según *Ando*, es el **TIEMPO ENTRE EL PRIMER SONIDO DIRECTO Y LA PRIMERA REFLEXIÓN** (Initial Time Delay Gap, t_i), asociado a la valoración de la intimidad acústica para *Beranek y Barron* aunque el significado de esta cualidad es diferente para ambos. Otras cualidades como la **TEXTURA** o la **CURVA DE ENERGÍA REFLEJADA ACUMULADA** (Reflective Energy Cumulative Curve, RECC) propuesta por *Toyota* pero sin valores recomendados, aumentan la “confusión” en la elección de los parámetros mínimos y suficientes para abordar el estudio de salas de conciertos.

Criterio Espacial

La impresión espacial, es función directa de las reflexiones tempranas y para investigadores como *Marshall, Barron, Sten, Bradley y Ando* entre otros, esta cualidad podría ser el atributo fundamental para la calificación de una sala. Los factores más significativos e influyentes sobre ella tales como la procedencia, secuencia y ángulo de llegada de las reflexiones tempranas, son ponderados de forma distinta por los diferentes investigadores. El estudio de la geometría, dimensiones, proporciones (*Gottlob, Barron*), secciones transversales (*Marshall*) y formas de techo (*Schroeder*) en las salas de conciertos, junto a la creación de parámetros objetivos cuantificadores de esta cualidad para proporcionar una buena impresión espacial, marcan la tendencia de las investigaciones más recientes.

Barron-Marshall proponen el **GRADO DE IMPRESION ESPACIAL** (SI) para cuantificar la importancia de las reflexiones laterales tempranas, estudiando estos efectos subjetivos con música de *Mózar*t en cámara anecoica. El grupo de **DRESDEN** propone el parámetro **INDICE DE RESPUESTA DE UNA SALA** (RR). Este parámetro será desplazado por otro más interesante, propuesto por *Barron-Marshall* denominado **FACTOR DE ENERGIA LATERAL** (L) con una propuesta de valores óptimos que difieren respecto a los indicados por *Jordan*.

Midiendo la respuesta impulsiva de la sala con un "dummy-head" (cabeza-simulada), que correlaciona la señal en los dos oídos, se han definido dos parámetros el **GRADO DE CORRELACION** (Korrelationsgrad, K) y la **CORRELACIÓN CRUZADA INTERAURAL** (Interaural Cross Correlation, IACC).

El primero fue definido por *Gottlob* y el segundo por *Ando*, que es mayoritariamente aceptado por todos los investigadores, mide el grado de similitud existente entre las señales que llegan a los dos oídos. Actualmente se trabaja con dos índices de correlación cruzada propuestos por *Hidaka* y *Okano*. Estos difieren en el intervalo considerado para la señal. El **IACC_E** corresponde a los 80 primeros milisegundos desde la llegada del sonido directo y está relacionado con la impresión espacial y el **IACC_L** se calcula a partir de los 80 milisegundos y es indicativo de la difusión en la sala.

Otros parámetros como el propuesto por *Haan* y *Fricke* denominado **INDICE DE DIFUSIÓN** (Durface Diffusivity Index, SDI) que se determina a través de una inspección visual de la sala, por tanto carece, por tanto, de carácter objetivo y medible.

Criterio relativo al escenario y orquesta

Los objetivos acústicos descritos y los parámetros que se han indicado, se han centrado exclusivamente en la sala. Trataremos ahora los correspondientes al escenario y la orquesta.

Marshall-Gottlob-Alrutz realizan un exhaustivo estudio sobre la acústica en el escenario y en base a las experiencias sobre diferentes salas, indican las cualidades deseables a obtener en el escenario. *Gade* propone dos parámetros, el **SOPORTE** (Support, ST) que valora el confort como solista y el **NIVEL DE CONJUNTO** (Early Ensemble Level, EEL) que se refiere al confort de acople de conjunto. Por su parte *Beranek* define estas cualidades y rango de variación para los parámetros.

ESTADO ACTUAL

El gran número de parámetros propuestos por diferentes investigadores para determinar la calidad acústica de salas de conciertos, ha desarrollado diferentes formas de abordar el estudio, según los atributos fundamentales que se consideren.

Para la escuela de *Göttingen* tres son los parámetros a tener en cuenta: el **INDICE DE CORRELACIÓN CRUZADA INTERAURAL (IACC)**, el **TIEMPO DE REVERBERACIÓN (RT)** y la **CLARIDAD (C)**. *Yamamoto* y *Suzuki* siguiendo las técnicas de esta escuela miden la **CLARIDAD (C)**, la **FUERZA (G)** y la espacialidad por el **IACC**. *Marshall* y *Barron* se inclinan fundamentalmente por la impresión espacial medida por el **FACTOR DE ENERGÍA LATERAL (L)** y el **IACC**. Sin embargo, de todos los investigadores que podríamos enumerar, destaca la propuesta de *Ando* para el que de todos los parámetros indicados en el apartado anterior, sólo cuatro de ellos son estadísticamente independientes, es decir, la variación de cada uno de ellos no afecta al resto. Estos son: el **INDICE DE CORRELACIÓN CRUZADA INTERAURAL (IACC)**, **PRIMER TIEMPO DE DESCENSO (EDT)**, **SONORIDAD (G)**, y el **TIEMPO ENTRE EL PRIMER SONIDO DIRECTO Y LA PRIMERA REFLEXIÓN (t_i)**. *Beranek* por su parte ha verificado más recientemente que existen dos parámetros más a los indicados por *Ando* que también son estadísticamente independientes, el **TIMBRE o CALIDEZ (BR)** y el **ÍNDICE DE DIFUSIÓN (SDI)**.

A partir de estos parámetros "independientes" se califica globalmente la Sala de Conciertos. La decisión trascendente a tomar para ello es dar el peso específico adecuado a cada uno de dichos parámetros. La razón o no a los criterios anteriores está en la respuesta subjetiva de los oyentes, investigación que se está llevando a cabo por gran número de investigadores en diferentes salas repartidas por todo el mundo como: *Hidaka*, *Beranek*, *Barron*, *Sémidor*, *Warusfel*, *Shield-Cox*, *Kimura-Sekiguchi* y *Morimoto* entre otros.

REFERENCIAS

Dado el alto número de investigadores sobre el tema que nos ocupa, indicamos a continuación parte de las referencias bibliográficas que han servido de base para el estudio anterior.

- ALRUTZ-SCHROEDER, Acústica, 50. 1982
 ANDO, Acustica, 50. 1982--- "Concert Hall Acoustics", Springer Verlag N.Y., 1985
 ANDO-GOTTLÖB, JASA, 65.1979
 ATAL-SCHROEDER-SESSLER, 5 Congress International d"Acoustique. Liege. 1965
 BARRON, "The Effects of Early Reflections on Subjective Acoustical Quality in Concert Halls"
 Thesis. Southampton. 1974
 Acustica 66, 1988
 "Auditorium Acoustics and Architectural Design", E & FN Spon, Londres 1993
 BARRON-MARSHALL, Journal of Sound and Vibration, 77. 1981
 BERANEK, "Music, Acoustics and Architecture", Wiley N.Y., 1962
 JASA 92 (1), 1992
 "Concert and Opera Halls: How They Sound", ASA, N Y, 1996.
 BERANEK-SCHULTZ, Acústica, 51 1965
 BRADLEY, JASA 96 (6), 1994
 EYSHOLDT, "Subjektive Untersuchungen und Digitalen Nachbildungen von Schallfeldern aus
 Konzertsälen", Thesis. Göttingen. 1976
 EYSHOLDT-GOTTLÖB, DAGA-76, Heildeberg. 1976
 9 International Congress on Acoustics., Madrid. 1977
 FURDUJEFF, ICA-V. 1965
 GADE, 11 ICA, Paris. 1983
 Acoustical survey of eleven European concert halls. The Acoustics Laboratory,
 Technical University of Denmark, 1989
 Investigations of musicians rooms acoustic conditions in concert halls. The Acoustics
 Laboratory, Technical University of Denmark, 1989, Acustica 69, 1989
 GOTTLÖB, "Vergleich Objektiver Akustischer Parameter mit Ergebnissen Subjektiver
 Untersuchungen aus Konzertsälen" Thesis, Göttingen. 1973
 GOTTLÖB-SIEBRASSE-SCHROEDER, DAGA-75
 HIDAKA-BERANEK, JASA 107 (1) 2000
 HIDAKA-BERANEK-OKANO, J.A.S.Jp, 10,1989 – 122 Meeting JASA, 1991.
 JORDAN, Applied Acoustics, 2, 1969--Applied Acoustics,18, 1975--Applied Acoustics,14, 1981-
 Applied Acoustics, 15, 1982
 "Acoustical Design in Concert, Halls and Theatres" App. Sciences Pub., London 1980
 KIMURA-SEKIGUCHI, J.A.S.Jp, 32, 1976
 KUTTRUFF, "Room Acoustics", Applied Science Publishers LTD, London, 1992
 LEHMAN, "Über die Ermittlung Raumakustische Kriterium und derer Zusammenhang mit Sgjektiven
 Beurteilungen der Hörsamjkeir", Thesis, Berlín. 1976
 MARSHALL, Architectural Science Review 1968 -- Journal of Sound and Vibration, 5. 1967--
 Journal Sound and Vibration, 7. 1968—JASA, 96(4), 1994
 MARSHALL-GOTTLÖB-ALRUTZ, JASA, 64.1978
 MORIMOTO, J.A.S.Jp, 10,1989
 OKANO,-BERANEK- HIDAKA, JASA 98 (3)1995 -- JASA 104 (1)1998
 POLACK, 11 ICA.. París, 1983
 REICHARDT-SCHMIDT- ABDEL ALIM-SCHMIDT- LEHMANN, Acústica,17,1966 /48,1975/84,1981
 SÉMIDOR ,Proccedings of the Institute of Acoustics, Vol 19, (3), 1977
 SÉMIDOR-SIGNORET-JOUENNE-JOANNE, Journal de Physique III (2), 1992
 SCHROEDER, JASA, 37.1965-- JASA, 40.1966-- JASA, 41.1967-- JASA, 65.1979
 SCHROEDER-GOTTLÖB-SIEBRASSE, JASA, 56, 1974
 SHIELD-COX, Acustica-Acta Acústica, Vol 85, 1999
 STØM, "A New Tool in Acoustical Design", ELAB Akustik Lab, Trondheim, Norway. 1977.
 TOYOTA, JASA 84(1), 1988
 WARUSFEL-JULLIEN , Journal de Physique III (2), 1992
 WILKERS, "Mehrdimensionale Beschreibung Subjektiver Beurteilungen der Akustik von
 Konzertsälen", Thesis, Berlin. 1975

