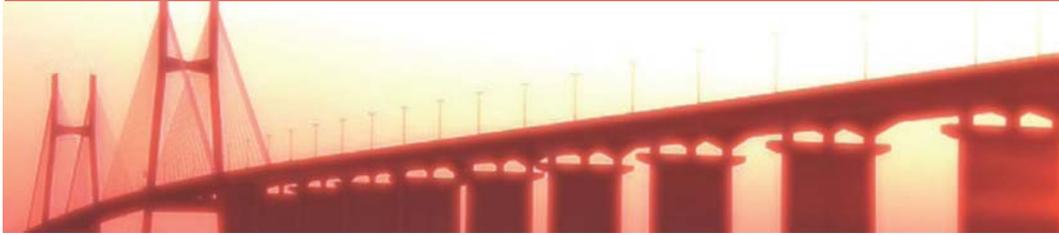


PRIMERAS JORNADAS REGIONALES DE ACÚSTICA AdAA 2009

19 y 20 de noviembre de 2009, Rosario, Argentina



AdAA2009-A001R

Medición y análisis de parámetros acústicos en diez salas de concierto y teatros de Bogotá

Diego Fernando Hidalgo Patiño^(a)

(a) Ingeniería de Sonido, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Buenaventura. Cra 8H No 172-20, Bogotá, Colombia. E-mail: dhidalgo8@yahoo.com

Abstract

The acoustical parameters of rooms are defined by equations or algorithms which describe the relation between objective measurements and subjective evaluations about the acoustical behaviour of a hall. Measurements are carried out according to the ISO 3382 methodology. During the XX century investigations had been made to define the optimal values for different acoustical parameters according to the use of the hall. In this work project measurements were taken in ten theatres and concert halls in Bogotá, Colombia with the aim of determining their acoustical parameters and suggesting the best use for them.

Resumen

Los parámetros acústicos de salas permiten definir valores objetivos del comportamiento acústico de un recinto mediante mediciones cuya metodología está descrita por la norma ISO 3382. A lo largo del siglo XX se han llevado a cabo estudios que permiten relacionar las características subjetivas atribuidas a una sala con las medidas objetivas, definiendo así valores óptimos para los diferentes parámetros acústicos de acuerdo al empleo que se dé a una sala. Con base en lo anterior se realizaron mediciones en diez diferentes salas de la ciudad de Bogotá-Colombia con el fin de establecer sus parámetros acústicos y determinar el mejor uso que a cada una de ellas se puede dar.

1 Introducción

La acústica de salas comprende un complejo sistema de elementos donde no solo intervienen las características arquitectónicas de cada recinto sino también el tipo de presentación escénica que en ellas se desempeñe, además de la aptitud de los intérpretes o artistas quienes estén a cargo del espectáculo. Todos estos factores crean un ambiente único y se encargan de dar la sensación característica percibida por los espectadores, a quienes es dirigido todo el trabajo de realización y serán los evaluadores subjetivos de la calidad en un recinto.

Sin embargo, en muchas ocasiones no es posible determinar la calidad acústica de una sala mediante métodos de calificación subjetivos ya que estos se encuentran sujetos a una opinión personal de lo que se escucha. Por esta razón se hace necesario un método de tipo objetivo que permita relevar las características acústicas de un recinto mediante un lenguaje técnico y que a través de métodos experimentales sea posible establecer algunas de las cualidades más importantes que afectan la impresión subjetiva de una sala.

Los parámetros acústicos son procedimientos matemáticos que permiten realizar la evaluación objetiva de las características de una sala, los cuales han sido el resultado de un extenso trabajo llevado básicamente a lo largo del siglo XX e iniciado principalmente por Wallace Clement Sabine al establecer la ecuación del tiempo de reverberación como un método que determina el comportamiento acústico de un recinto. Posteriormente otros científicos han llevado a cabo estudios prácticos y teóricos con el fin de obtener una valoración de tipo numérica que se correlacione con la impresión subjetiva del hombre, entre ellos se destaca los realizados por Leo L. Beranek quien realizó una investigación en 100 salas de concierto, teatro y ópera del mundo respecto al comportamiento acústico de salas, el cual ha sido base fundamental del presente trabajo (Beranek, 2003).

Básicamente este proyecto se basó en determinar los parámetros que evalúan las condiciones acústicas existentes en diez salas de concierto y teatro en Bogotá. La primera fase consistió en la realización de mediciones de respuesta al impulso en todos los recintos bajo estudio. Posteriormente se llevó a cabo la organización, análisis y clasificación de los datos recopilados al igual que el cálculo de los parámetros de cada una de las salas. Por último se realizó la evaluación y determinación de mejor uso que se puede dar a los recintos bajo estudio.

Con los resultados obtenidos en el presente proyecto se pretende sentar una base de datos que permita conocer el comportamiento acústico de las salas en Bogotá y que además sea un referente para futuras mediciones en diferentes recintos de Colombia, además de concientizar tanto a artistas como a espectadores de la importancia que tiene la acústica de cada uno de los recintos, la cual es única y especialmente apta para cierto tipo de eventos.

2 Definiciones de parámetros acústicos

2.1 Criterios temporales

Este tipo de criterios evalúan el comportamiento del sonido a partir de la cantidad de tiempo audible que permanece en el interior de una sala y hacen referencia subjetiva a la viveza que el recinto es capaz de producir. A continuación se describen los parámetros acústicos pertenecientes a este criterio.

2.1.1 Tiempo de reverberación (RT)

El parámetro más importante para la valoración acústica de un recinto es el tiempo de reverberación y se define como el tiempo en segundos que transcurre desde que el foco

emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora decae 60dB con respecto a su valor inicial.

El tiempo de reverberación en una sala se encuentra estrechamente ligado con la absorción del sonido generada por los materiales que la componen. Esto fue demostrado por Sabine tras sus estudios realizados en la universidad de Harvard, bajo las cuales definió una expresión matemática que permite determinar en forma aproximada el tiempo de reverberación teórico de un recinto. La ecuación es la siguiente:

$$RT = \frac{0,161V}{A_{tot} + 4mV} . \quad (1)$$

Según investigaciones realizadas por Beranek es posible catalogar a la reverberación, en términos subjetivos, como la directamente responsable de darle al sonido la sensación de plenitud, que en otras palabras se refiere al complemento o puente que un recinto es capaz de producir cuando se provocan dos sonidos sucesivos. Este elemento es de vital importancia para el caso de la interpretación musical ya que se encarga de ligar las notas unas con otras, dando así una impresión subjetiva más placentera, o dicho de otra manera, de dar plenitud entre cada una de las notas.

2.1.2 Tiempo de decaimiento temprano (EDT)

A pesar de que el tiempo de reverberación es un importante indicador del desempeño acústico de un recinto, el resultado obtenido a partir de su medición corresponde principalmente a una respuesta física y global de la sala, donde su relación con respecto a la respuesta subjetiva de una persona en algunos casos es poco comparable.

Tras investigaciones del comportamiento psicoacústico que los seres humanos tienen en relación a la forma como perciben los sonidos se ha determinado el tiempo de decaimiento temprano, el cual se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora decae 10dB. Este parámetro hace referencia a la fase inicial del decaimiento del sonido y según estudios realizados por Beranek es uno de los criterios más aceptados por alto grado de correlación con la respuesta subjetiva respecto a la viveza o cantidad de reflexiones tempranas en una sala.

2.1.3 Calidez (BR) y brillo (br)

Básicamente estos dos parámetros simbolizan la respuesta acústica que presenta una sala con respecto a los sonidos graves y agudos a partir del tiempo de reverberación existente. Para comprender un poco mejor lo anterior se dice que la calidez acústica es referente a la forma como un recinto responde en bajas frecuencias, de tal manera que es percibido como el balance y la riqueza de los sonidos graves. Esto no es fuertemente apreciable en una sala destinada para el uso de palabra ya que el rango de la voz humana no es lo suficientemente grande como para estimular esta clase de sonidos, pero para el caso de la música fácilmente se puede encontrar instrumentos que generen tonos de baja frecuencia tal como lo puede ser un bajo o instrumentos de percusión de gran tamaño entre muchos otros, y que subjetivamente es el encargado de darle cuerpo, base o sustento a la música.

Por su parte el parámetro de brillo en un recinto hace referencia a las cualidades inversas de la calidez acústica, es decir, determina la riqueza de armónicos para altas frecuencias. Dicho de otra manera es un indicador de la forma en que la sala responde a los sonidos agudos los cuales pueden ser producidos por instrumentos como un flautín, un violín

o los platillos y su sonido puede ser percibido como agudo, claro, silbante y en algunos casos estridente.

2.2 Criterios energéticos

Los criterios energéticos se basan a partir del análisis de la energía acumulada por el sonido en un recinto, los cuales son un índice subjetivo de la transparencia o capacidad de distinción del mensaje que recibe el oyente.

2.2.1 Claridad

La claridad es un parámetro que permite relacionar la energía de las reflexiones tempranas incluyendo el sonido directo y las reflexiones tardías. Esta medida permite cuantificar la información que un receptor percibe de forma clara y concisa. Se determina mediante la siguiente expresión:

$$C_t = 10 \log \frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_t^\infty p^2(t) dt} . \quad (2)$$

Los intervalos de tiempo que se utilizan para el desarrollo de la ecuación anterior varían de acuerdo al tipo evaluación que se pretenda llevar a cabo. Si se desea evaluar la claridad del habla o la palabra, se emplea el término C50 denominado precisamente claridad de palabra, el cual se refiere a un intervalo de 0 a 50 milisegundos donde $t=0.05$, mientras que si se quiere evaluar la claridad de las interpretaciones musicales, se utiliza el término C80 denominado claridad musical, que maneja un intervalo de 0 a 80 milisegundos donde $t=0.08$.

De acuerdo con Beranek este parámetro también evalúa subjetivamente el balance del sonido en el interior de una sala ya que la relación entre energía temprana y tardía establece cuan predominante es el campo reverberante, causante de producir un menor entendimiento del mensaje, respecto a las reflexiones primarias encargadas de dar mayor inteligibilidad.

2.2.2 Definición (D50)

La definición es un parámetro de tipo energético que permite relacionar la energía temprana que llega en un intervalo de tiempo con respecto a la energía total que llega al receptor y cuantifica la distinción de sonidos en un receptor. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$D = \frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_0^\infty p^2(t) dt} . \quad (3)$$

Este parámetro, junto con la claridad de palabra (C50), permite evaluar el grado de inteligibilidad sonidos que se producen en una sala cuyo principal empleo es el discurso o el teatro.

2.2.3 Tiempo central (ts)

Este es un parámetro conocido también como centro de gravedad, permite relacionar en unidades de tiempo el punto donde la energía sonora acumulada que llega a nuestros oídos en los primeros instantes de tiempo es equivalente que la energía acumulada el tiempo restante, es decir, establece el punto de equilibrio, medido en tiempo, donde la energía primaria y la secundaria son iguales.

Se puede considerar al tiempo central como un indicativo del grado de nitidez del sonido para los diferentes puntos en una sala, donde su relación se encuentra estrechamente ligada con el tiempo de decaimiento temprano (EDT) y la claridad. De acuerdo con experimentaciones realizadas, se ha concluido que cuanto mayor sea el valor de este parámetro, menor es la nitidez del sonido generada por la sala desmejorando así la claridad de la palabra ya que las primeras reflexiones que arriban a los oídos (responsables de un mejor entendimiento del mensaje) tienen poca energía y son fácilmente enmascaradas por la energía secundaria.

2.3 Criterios espaciales

Se obtienen a partir del análisis de las reflexiones laterales que llegan al oyente y se encargan de evaluar la impresión de espacialidad provocada por la sala.

2.3.1 Correlación cruzada interaural (IACC)

Este parámetro se encarga de determinar la correlación de los sonidos que llegan a cada uno de los oídos obteniéndose un indicativo del grado de similitud existente entre las dos señales, siendo este uno de los más efectivos indicadores de la calidad acústica de una sala según Beranek ya que emula el sonido que llega a los oídos de un oyente. La evaluación de este parámetro se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$IACC(\tau) = \max_{t_1} \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) p_R(t + \tau) dt}{\left(\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) p_R(t + \tau) dt \right)^{1/2}} \quad (4)$$

Los tiempos de evaluación t_1 y t_2 en la ecuación se definen de acuerdo al criterio espacial que se busque valorar. Para el caso en que se busca la calificación “temprana” ($IACC_E$), se utiliza el tiempo $t_1=0.005$ y $t_2=0.08$, luego para el caso de la estimación “tardía” ($IACC_L$) se emplea $t_1=0.08$ y $t_2=1$.

Desde el punto de vista subjetivo, la evaluación temprana de este parámetro es un indicativo de la amplitud aparente de la fuente, es decir, el efecto que produce un recinto cuando una fuente sonora aparenta tener una amplitud diferente de la que realmente tiene cambiando así la impresión de tamaño. Por su parte la correlación cruzada interaural tardía evalúa la envolvente de la sala, que se refiere al grado en que las reflexiones sonoras tardías son capaces de rodear al oyente generando en él una sensación en que la reverberación es homogénea o que proviene de todas las direcciones de la sala.

3 Metodología

Para llevar a cabo las mediciones en cada una de las salas bajo estudio se implementó la metodología propuesta por la norma ISO 3382:1997, donde se establecen los criterios de instrumentación, posicionamiento, condiciones de sala y procesamiento de la información.

La fuente sonora empleada para la realización de las mediciones es de tipo omnidireccional (dodecaédrica) cuyos altavoces que la conforma son de referencia DAS CL-8, los cuales poseen un sistema de dos vías con una respuesta en frecuencia de 50Hz a 20kHz, una sensibilidad de 90dB a 1W/1m, una impedancia nominal de 8ohm y una potencia RMS de 60W de acuerdo con el fabricante.

El micrófono utilizado corresponde a la referencia Behringer ECM8000, cuya cápsula de condensador electret de 1/2" pulgada brinda las características de tipo omnidireccional y respuesta en frecuencia aproximadamente plana a lo largo del espectro entre 15Hz a 20kHz (ver figura 1), lo cual se ajusta a los requerimientos solicitados por la norma. La sensibilidad descrita por el fabricante es de -60dB, con necesidad de alimentación de corriente directa de entre 15V a 48V a una impedancia de 600Ohm.

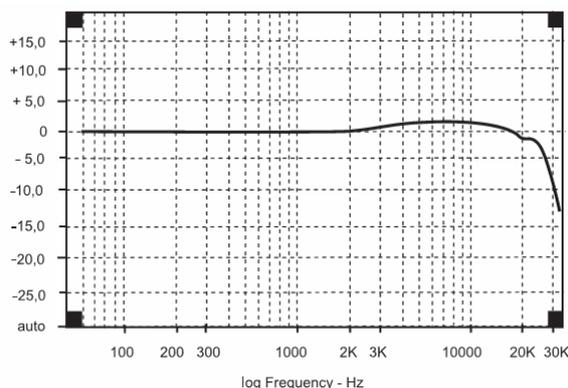


Figura 1. Respuesta en frecuencia de micrófono Behringer ECM800.

Para la realización de mediciones de espacialidad se emplea una cabeza binaural elaborada en madera con orificios laterales para ubicar micrófonos referencia AKG CK 61-USL con patrón polar tipo cardiode, un rango dinámico de 134dB, una relación señal ruido de 81dB, impedancia de 150ohm y una respuesta en frecuencia de 20 Hz a 20 kHz (ver figura 2).

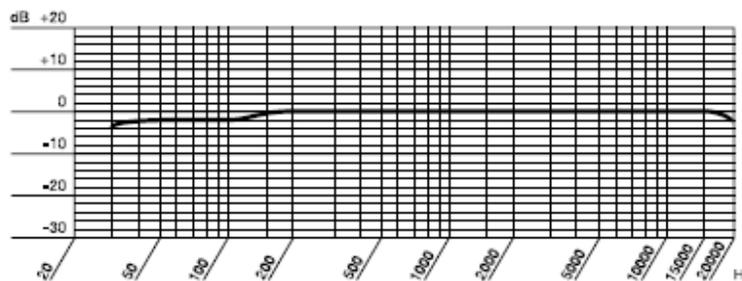


Figura 2. Respuesta en frecuencia de micrófono AKG CK 61-USL.

El sistema de procesamiento y almacenamiento de la información se lleva a cabo mediante un sistema de computadora conectada a una interfaz de audio referencia M-Audio Fast Track Pro la cual cuenta con dos entradas y salidas de características full dúplex, una relación señal ruido de -101dB, distorsión armónica de 0,005% y respuesta en frecuencia de 20Hz a 20kHz a +/- 0.1dB. El almacenamiento de la información para su posterior análisis, se lleva a cabo por medio de una computadora portátil, la cual cuenta con el plug-in de prueba Aurora 4.0 para la obtención de la respuesta al impulso y los valores de parámetros acústicos.

El procedimiento general que se utilizó para el desarrollo de la fase de medición en cada uno de los recintos bajo estudio corresponde a una cobertura normal en estado de ocupación vacío donde los puntos de fuente sobre el escenario fueron como mínimo dos para todos los casos, mientras que el número de posiciones de receptor no fueron menores a los establecidos por la norma ISO 3382 en función del número de sillas que posee el recinto tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Número mínimo de posiciones de receptor en función del número de sillas de acuerdo con norma ISO 3382.

Numero de sillas	Número mínimo de posiciones de micrófono
500	6
1000	8
2000	10

La obtención y evaluación de la curva de respuesta al impulso fue realizada mediante el método de la respuesta al impulso integrada, empleando como señal de prueba un barrido tonal de 50Hz a 16kHz, donde todo el almacenamiento y procesamiento de la información fue realizado por una computadora con el plug-in de prueba Aurora 4.0. La cantidad de muestras tomadas por cada punto de recepción a lo largo de la zona de público fueron de tres por cada posición de fuente.

El flujo de señal para obtener el registro de audio en cada punto de la sala es mostrado en la Figura 3, donde la señal de prueba es emitida desde la salida de la computadora, cuyo voltaje debe ser elevado a nivel de línea por medio de un preamplificador, luego pasa hacia la etapa de potencia y finalmente se envía la señal hacia el altavoz, que en este caso es la fuente omnidireccional. Posteriormente la señal emitida por el altavoz es recibida por el transductor de entrada, siendo en este caso el micrófono omnidireccional, el cual se encarga de enviar la señal hacia la entrada de audio de la computadora para su almacenamiento y procesamiento. Este procedimiento debe llevarse a cabo simultáneamente, por lo cual se emplea una interfaz de audio con características full dúplex, que a su vez se encarga de elevar los niveles de voltaje de la señal de entrada y salida.

Una vez realizadas las mediciones para cada uno de los puntos señalados se procesa la información para obtener la respuesta al impulso mediante la deconvolución entre las señales de muestra y registrada. Posteriormente la información es filtrada, obteniéndose una respuesta al impulso para cada banda de octava normalizada a las cuales se aplica luego la integral inversa en el tiempo con el fin de conseguir la curva de decaimiento y finalmente determinar cada uno de los parámetros acústicos asociados.

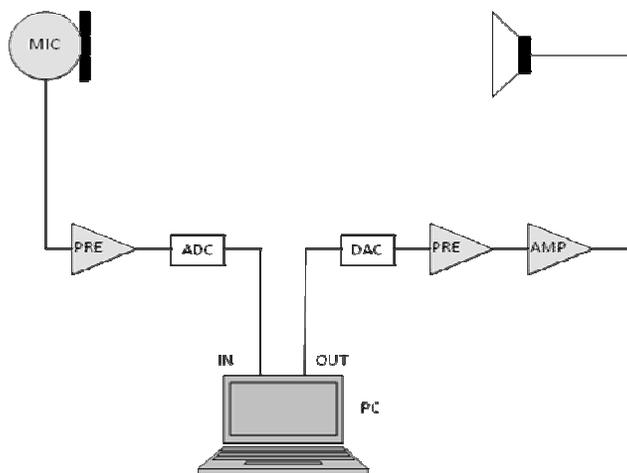


Figura 3. Esquema de flujo de señal empleado para mediciones.

Para definir los valores recomendados de los diferentes parámetros acústicos se ha tomado como referencia las investigaciones realizadas por los autores citados en referencias bibliográficas, de los cuales se destaca principalmente el trabajo realizado por Beranek tras evaluar los parámetros acústicos en más de cien salas de concierto, teatro y ópera a lo largo del mundo, comparando sus resultados con atribuciones subjetivas por parte de músicos, expertos y aficionados logrando establecer así un rango específico bajo el cual las salas pueden ser clasificadas con un mejor desempeño de acuerdo a su empleo.

A continuación se presentan los valores recomendados para salas en estado de ocupación vacío con un volumen entre 2000m³ y 10000m³, y un número de sillas entre 500 y 2000, de acuerdo con el criterio establecido por los diferentes autores citados en las referencias bibliográficas.

3.1 Valores recomendados para salas de teatro y palabra

Tabla 2. Valores recomendados para salas de teatro y palabra.

Parámetro acústico	Valor recomendado
Tiempo de reverberación medio (RT_{mid})	0,7 a 1,2 seg
Claridad de palabra (C_{50Avr})	Mayor a 2 dB
Definición (D_{Avr})	Mayor a 0,5

3.2 Valores recomendados para salas multipropósito

Tabla 3. Valores recomendados para salas multipropósito.

Parámetro acústico	Valor recomendado
Tiempo de reverberación medio (RT_{mid})	1,4 a 1,8 seg
Tiempo de decaimiento temprano medio (EDT_{mid})	1,5 a 1,9 seg
Claridad de palabra (C_{50Avr})	0 a 2 dB
Claridad de musical ($C80\ 3$)	0 a 3 dB
Definición (D_{Avr})	0,4 a 0,5
Correlación cruzada interaural temprana ($IACC_{E3}$)	0,3 a 0,42

3.3 Valores recomendados para salas de repertorio sinfónico

Tabla 4. Valores recomendados para salas de repertorio sinfónico.

Parámetro acústico	Valor recomendado
Tiempo de reverberación medio (RT_{mid})	De 1,9 a 2,4 seg
Tiempo de decaimiento temprano medio (EDT_{mid})	De 2 a 2,5 seg
Claridad de musical ($C80\ 3$)	De -3 a 0 dB
Calidez (BR)	De 1,1 a 1,45
Brillo (Br)	Mayor a 0,87
Correlación cruzada interaural temprana ($IACC_{E3}$)	De 0,29 a 0,35
Correlación cruzada interaural tardía ($IACC_{L3}$)	De 0,12 a 0,15
Tiempo central (ts_{Avr}) (para un RT_{mid} entre 1 y 2 seg)	De 72 a 144ms

4 Presentación y análisis de resultados

Las salas en las cuales se llevó a cabo el presente estudio son las siguientes:

Centro Cultural Gabriel García Marquez (CCG) – Volumen: 1030m³, Capacidad: 305.

Teatro Astor Plaza (AP) - Volumen: 9300m³, Capacidad: 1114 sillas.

Teatro Montessori (TM) - Volumen: 3879m³, Capacidad: 600 sillas.

Teatro Leonardus (TLe) - Volumen: 2111m³, Capacidad: 312 sillas.

Teatro ECCI (ECCI)¹ - Volumen: 3233m³, Capacidad: 628 sillas.
 Centro Cultural Gimnasio Moderno (GM) - Volumen: 4950m³, Capacidad: 572 sillas.
 Auditorio Virgilio Barco (VG) - Volumen: 3360m³, Capacidad: 410 sillas.
 Teatro Libre de Chapinero (TLi) - Volumen: 7023m³, Capacidad: 662 sillas.
 Auditorio Fabio Lozano (FL) - Volumen: 6650m³, Capacidad: 608 sillas.
 Auditorio León de Greiff (LG) - Volumen: 10052m³, Capacidad: 1619 sillas.

A continuación se presentan los resultados de los parámetros acústicos para sus valores únicos o medios obtenidos a partir de las mediciones en cada una de las salas, los cuales se han clasificado de acuerdo criterios temporal, energético y espacial:

4.1 Parámetros acústicos de criterio temporal

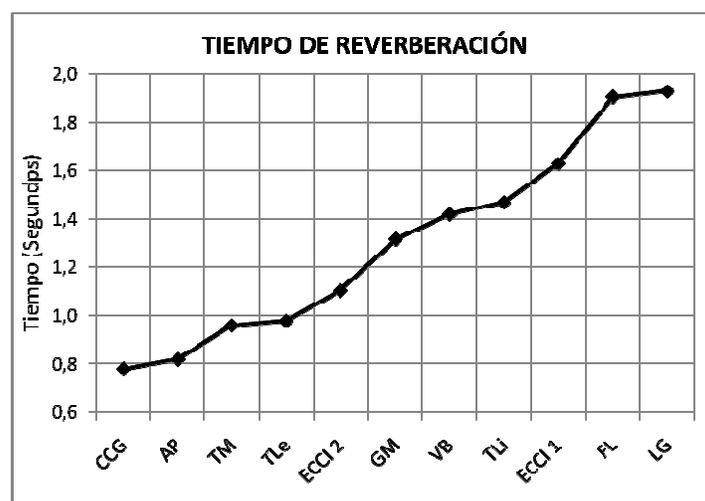


Figura 4. Resultados obtenidos de tiempo de reverberación.

Tal como se puede observar en la Figura 2 se han ordenado las salas de acuerdo al parámetro de reverberación de menor a mayor valor, donde las primeras cinco salas de izquierda a derecha presentan valores correspondientes a una sala cuyo mejor uso es para eventos teatrales y de palabra, las siguientes cuatro salas (GM, VB, TLi y ECCI1) tienen valores correspondientes a un recinto de corte multipropósito, mientras que las salas restantes presentan resultados para el desarrollo de repertorio sinfónico.

¹ Se informa que el teatro ECCI cuenta con sistema de acústica variable, por lo cual se realizaron dos mediciones para los diferentes estados de la sala que se enuncian como ECCI 1 (sin silletería) y ECCI2 (con silletería y concha acústica).



Figura 5. Resultados obtenidos de tiempo inicial de decaimiento.

De acuerdo con los valores establecidos para el parámetro de tiempo inicial de decaimiento, únicamente las salas FL y LG presentan valores óptimos para salas de tipo multipropósito.

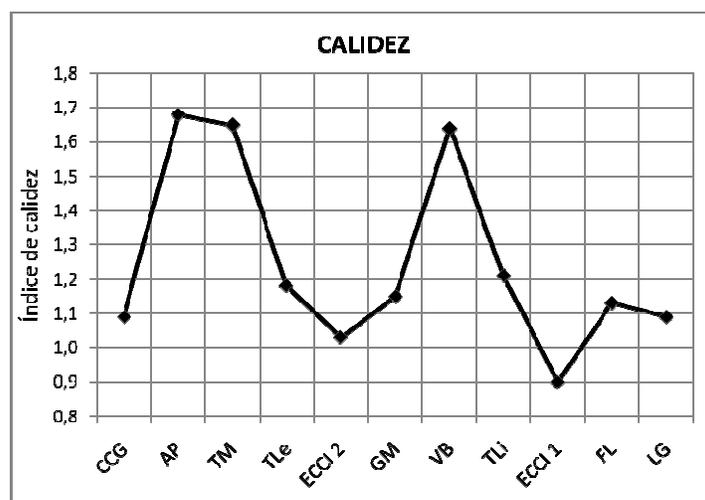


Figura 6. Resultados obtenidos de calidez acústica.

Los valores de calidez son muy variables respecto a cada sala ya que depende de la relación del tiempo de reverberación en frecuencias bajas y medias, teniéndose en todos los casos, a excepción de la sala ECCI 1 valores por encima de la unidad, lo cual representa un mayor tiempo de reverberación en bajas frecuencias que en medias.

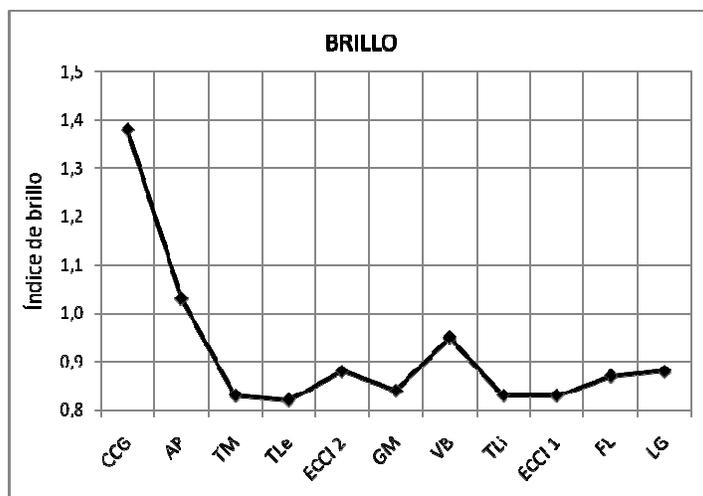


Figura 7. Resultados obtenidos de brillo acústico.

Los resultados obtenidos para el parámetro brillo es más constante con relación a la calidez, donde, en la mayoría de los casos, se obtuvo valores por debajo de la unidad ya que el tiempo de reverberación en altas frecuencias es menor que en medias.

4.2 Parámetros acústicos de criterio energético

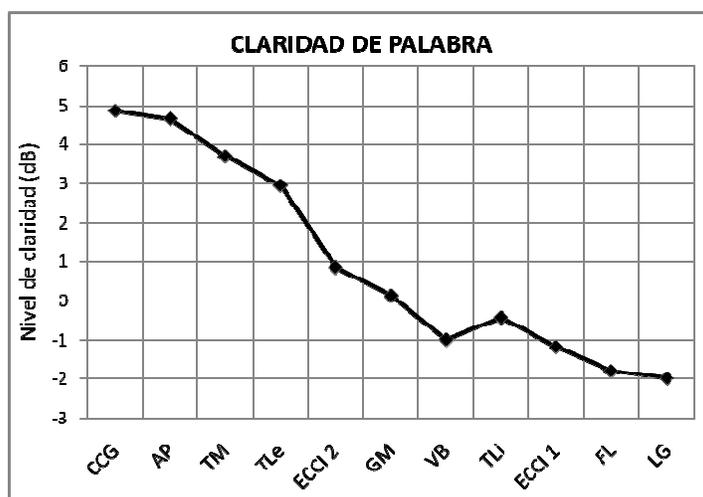


Figura 8. Resultados obtenidos de claridad de palabra.

En términos generales se tiene que la claridad de palabra posee valores óptimos para las seis primeras salas de la Figura 6 lo cual se debe a los bajos tiempos de reverberación que ellas presentan en donde hay mayor cantidad de reflexiones tempranas (evaluadas entre 0 y 50ms) que tardías (posteriores a 50ms).

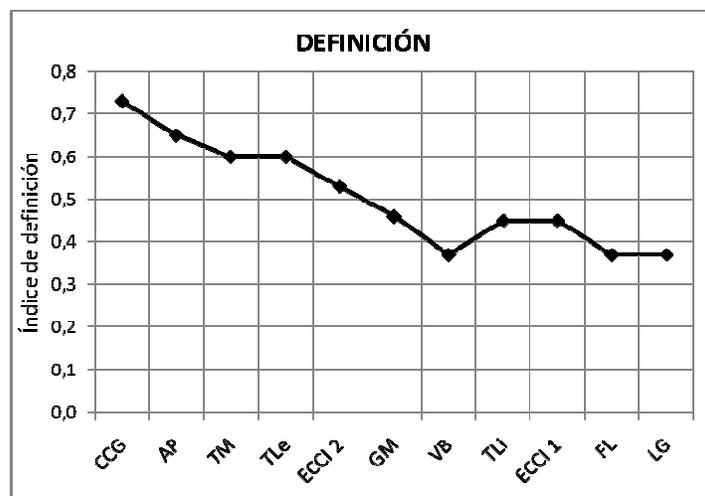


Figura 9. Resultados obtenidos de definición.

De acuerdo con los resultados graficados en la Figura 7 se puede observar que el comportamiento de la curva tiene una misma tendencia al parámetro Claridad de palabra debido a que describen un criterio semejante, donde también se ha presentado resultados favorables para las primeras seis salas.

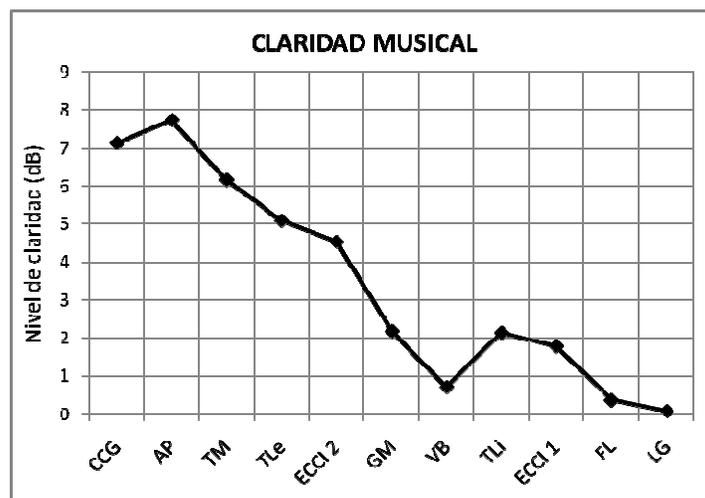


Figura 10. Resultados obtenidos de claridad musical.

El comportamiento de la claridad musical posee una tendencia semejante a la claridad de palabra sin embargo los resultados favorecen a las seis últimas salas de la Figura 8, ya que en ellas existe una mayor cantidad de reflexiones tardías que subjetivamente generan un mayor placer en la escucha de la una interpretación musical.

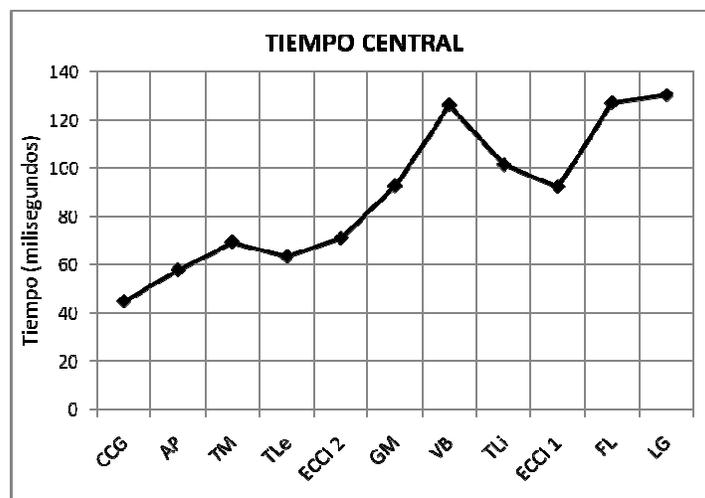


Figura 11. Resultados obtenidos de tiempo central.

Debido a que el tiempo central es un parámetro descriptivo para salas de interpretación musical, se tiene resultados favorables para las seis últimas salas de la Figura 9 al igual que para el caso del parámetro de claridad musical.

4.3 Parámetros acústicos de criterio espacial

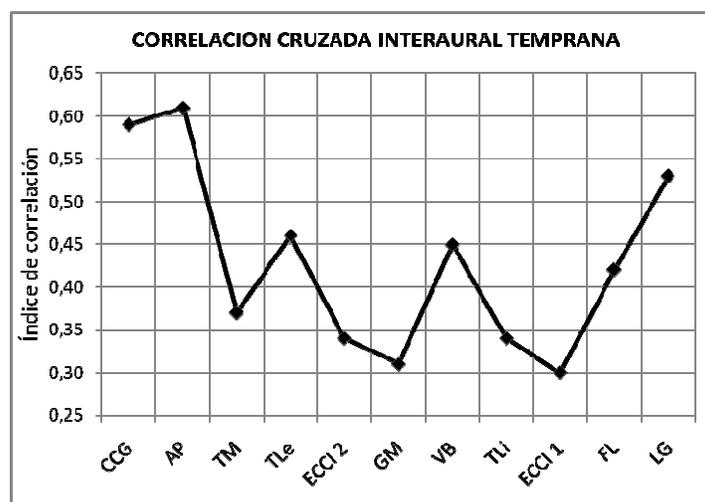


Figura 12. Resultados obtenidos de correlación cruzada interaural temprana.

Como es posible observar en la Figura 10 cerca de la mitad de las salas poseen valores de correlación cruzada interaural temprana dentro del margen óptimo para el desarrollo de eventos musicales, donde se debe tener en cuenta que este es un parámetro que califica la amplitud aparente de la fuente y que entre mayor disimilitud entre los dos puntos receptores mayor es la impresión subjetiva de espacialidad.

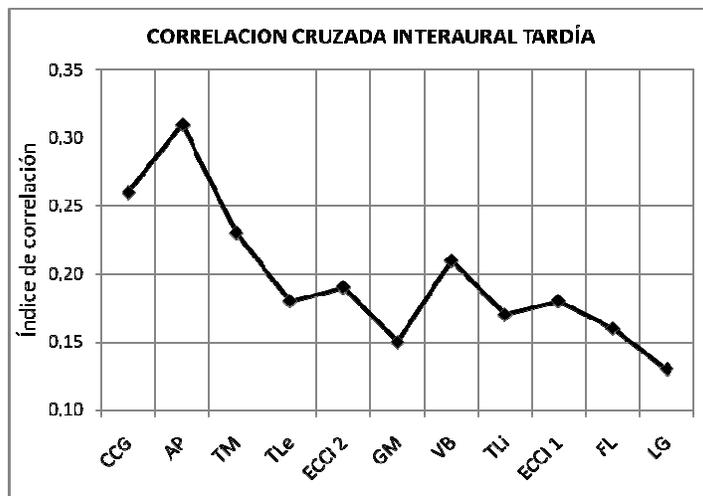


Figura 13. Resultados obtenidos de correlación cruzada interaural tardía.

De acuerdo con los valores obtenidos en la Figura 11 se tiene que únicamente las salas GM y LG poseen valores óptimos para la correlación cruzada interaural tardía, donde se debe tener en cuenta que a través de este parámetro se evalúa el grado de envolvente de una sala para el caso de interpretaciones musicales.

5 Conclusiones

La asignación del mejor uso a las salas bajo estudio se realiza teniendo en cuenta la mayor cantidad de correspondencias entre los valores derivados de las mediciones y los recomendados en las tablas 2, 3 y 4, con lo cual se han obtenido los siguientes resultados:

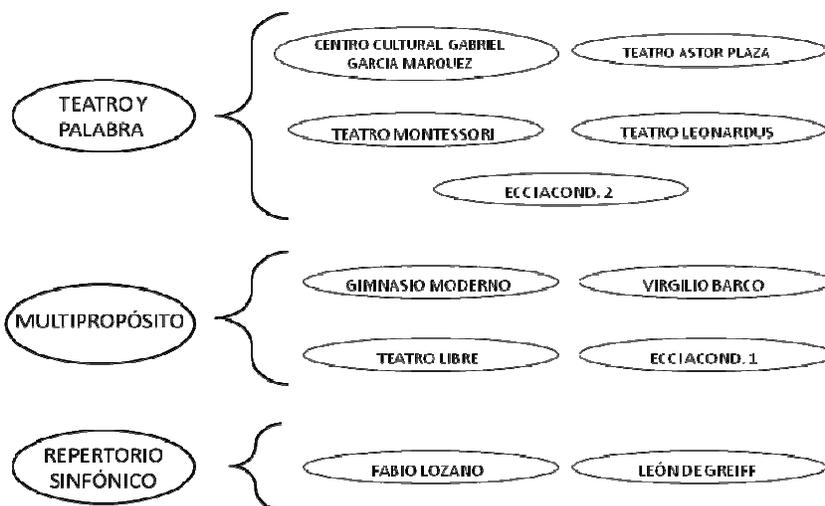


Figura 14. Asignación de mejor empleo a cada sala bajo estudio.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que cerca del cincuenta por ciento de las salas existentes en la ciudad de Bogotá son aptas para el desarrollo de eventos teatrales y de

palabra, mientras que cerca del cuarenta por ciento tienen características para la realización de eventos multipropósito y el diez por ciento restante para repertorio sinfónico.

Por último, a manera de resumen, se presenta una tabla que contiene todos los valores obtenidos a partir de las mediciones realizadas en las salas bajo estudio:

Tabla 5. Resumen de parámetros acústicos en las salas bajo estudio.

PARÁMETRO AUDITORIO	Volumen (m ³)	Nº sillas	T20 _{Mid} (Seg)	T30 _{Mid} (Seg)	EDT _{Mid} (Seg)	ts _{Avr} (ms)	C50 _{Avr} (dB)	D50 _{Avr}	C80 ₃ (dB)	IACC _{E3}	IACC _{L3}	BR	Br
Centro cultural García Márquez	1030	305	0,77	0,79	0,74	44,99	4,85	0,73	7,13	0,59	0,26	1,09	1,38
Teatro Astor plaza	9300	1114	0,82	0,82	0,71	57,92	4,65	0,65	7,73	0,61	0,31	1,68	1,03
Teatro Montessori	3879	600	0,95	0,97	0,85	69,47	3,69	0,6	6,16	0,37	0,23	1,65	0,83
Teatro Leonardus	2111	312	0,98	0,98	0,99	63,48	2,95	0,6	5,09	0,46	0,18	1,18	0,82
Teatro ECCI 2	3233	628	1,1	1,11	0,95	71,1	0,86	0,53	4,54	0,34	0,19	1,03	0,88
Centro Cultural Gimnasio Moderno	4950	572	1,31	1,32	1,35	92,73	0,14	0,46	2,19	0,31	0,15	1,15	0,84
Auditorio Biblioteca Virgilio Barco	3360	410	1,42	1,42	1,59	126,41	-0,98	0,37	0,72	0,45	0,21	1,64	0,95
Teatro Libre de Chapinero	7023	662	1,47	1,47	1,43	101,5	-0,42	0,45	2,15	0,34	0,17	1,21	0,83
Teatro ECCI 1	3233	628	1,62	1,64	1,42	92,4	-1,17	0,45	1,79	0,3	0,18	0,9	0,83
Auditorio Fabio Lozano	6650	608	1,9	1,91	1,82	127,32	-1,79	0,37	0,37	0,42	0,16	1,13	0,87
Auditorio León de Greiff	10052	1619	1,92	1,94	1,9	130,48	-1,97	0,37	0,09	0,53	0,13	1,09	0,88

Referencias

ISO, 3382, Acoustics — Measurements of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters, 1997, segunda edición.

Beranek, Leo Leroy (2003). “Concert halls and opera houses”, Springer, New York, USA.

Kuttruff, Heinrich (2000). “Room acoustics”. Spon press, London, England.

Carrión Isbert, Antoni (2001). “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”. Grupo editor Alfaomega, Barcelona, España.

Everest, Alton (2001). “Master handbook of acoustics”. McGraw Hill, New York, USA.

Recuero López, Manuel (1999). “Acústica arquitectónica aplicada”. Paraninfo, Madrid, España.

Recuero López, Manuel (1999). “Ingeniería acústica”. Paraninfo, Madrid, España.

Marshall, Long (2006). “Architectural Acoustics”. Elsevier, San Diego, California, USA.

Llinares J., Llopis A., Sancho J. (2008), “Acústica arquitectónica y urbanística”. Limusa, Barcelona, España.

Yoichi, Ando (1998). “Architectural acoustics”. Springer, New York, USA.

Gimenez perez, Alicia; Martin sanchis, Albert; Sanchis sabater, Antonio; Romero faus, José; Salvador cerda, Jordá y Vanacloy, Dolores (2003). “Estudio de la evolución de

parámetros acústicos que miden la calidad de las salas de conciertos”. TecniAcustica, Valencia, España.