



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008  
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A205

## Diseño e implementación acústica del Teatro México

Yolanda Carreño<sup>(a)</sup>,  
Guillermo Bolaños<sup>(b)</sup>,  
Paúl Lozada<sup>(c)</sup>.

(a) Profesora en la carrera de Ingeniería en Sonido y Acústica, Universidad de las Américas, Quito, Pichincha, Ecuador, Ingeniería Civil en Acústica, VIPRO, Chile. E-mail: ycarreno@gmail.com

(b) Egresado de Ingeniería en Sonido y Acústica, Universidad de las Américas, Quito, Pichincha, Ecuador. Email: lambdacoustics@mail.org

(c) Egresado de Ingeniería en Sonido y Acústica, Universidad de las Américas, Quito, Pichincha, Ecuador. Email: paullozada\_db@yahoo.com

### Abstract

The rehabilitation project of the Theater Mexico, which years ago had the role of cinema, has the idea to create a space style black box, with the possibility of having different types of scenarios. The theatre is ovoid shaped, all the reflections that outbreaks generate are concentrated in two different spots what translates in a poor distribution in the spectrum, this problem was dealt with materials broadcasters interspersed with absorbent material to keep stable the  $T_{60}$  of the room. The multifunctional use of the hall required  $taT_{60}$  that suits different activities and therefore variable acoustic panels were designed, the project also saw the need for catwalks at 7 meters high, so it was not possible to design a ceiling panels instead were used convex suspended panels. In addition there were various problems in the installing of panels, because the walls of the theatre lost strength in its facade so a metal lath to install them needed to be designed and generated the possibility for all panels are mobile and easy to remove.

### Resumen

El proyecto de rehabilitación del Teatro México, que en años atrás tenía la función de cine, tiene como fundamento esencial crear un espacio con posibilidades de tener una variedad de escenarios en un mismo espacio físico. El concepto por lo tanto fue el generar una "Caja Negra" que permita mayor libertad de expresión escénica. Del punto de vista arquitectónico el teatro es de forma ovoide, lo que ocasionaba concentración de reflexiones en dos focos sonoros distintos y una mala distribución en el espectro. El problema se trató con materiales difusores intercalados con material absorbente para mantener estable el  $T_{60}$  de la sala. El uso multifuncional de la sala requería que el  $T_{60}$  se adapte a las diferentes actividades, para lo cual se diseñaron paneles de acústica variable. Por necesidad del proyecto se requería cominerías a siete metros de altura del piso del teatro, lo que impidió la incorporación de un cielo raso extendido, la solución fue de usar paneles convexos suspendidos desde la estructura de cubierta. La imposibilidad de usar las paredes como elemento de soporte, requirió el diseño de una estructura acero cuadrículado que permitió una eficiente y rápida instalación, permitiendo que todos los paneles sean móviles y relativa facilidad para removerlos.

## **1 Introducción**

El Teatro México en la ciudad de Quito, fue construido en los años 1930 en un sector de la ciudad cuyo nombre fue otorgado como agradecimiento a México por su apoyo en la Guerra de los cuarenta contra el Perú, nombre que se hizo extensible al teatro. Con forma “oval” para lograr un mayor aforo de personas. Su nacimiento se dio como consecuencia de la gran actividad económica que se generaba en el sector, principalmente por la presencia de la estación del ferrocarril. En la década de los sesenta, la declinación del uso de ferrocarril y el remplazo por los grandes transportista terrestres, y el mejoramiento del la trasportación urbana hace que las actividades económicas decaigan llegando a un punto cerca del colapso. En vista de esta situación los moradores del sector solicitaron al I. Municipio Metropolitano de Quito, su intervención. Para el año 2004 el FONSAL (FONDO DE SALVAMIENTO DEL PRATRIMONIO CULTURAL) contrata los estudios integral de rehabilitación así como del sector urbano, conocido como Chimbacalle abarcando a la estación ferroviaria como el Teatro entre otros espacios fabriles abandonados: los arquitectos Guillermo Antonio Bolaños G. y Magdalena Rodríguez T. fueron los encargados de realizar el proyectos de restauración de lugar. La principal idea del proyecto de rehabilitación del recinto era crear un espacio multifuncional bajo los principios de Teatros de Caja de Negra, los cuales son lugares dinámicos, multifuncionales y su característica principal que se pueden generar distintos tipos de escenarios en el mismo espacio. Se quipo con elevadores, el proscenio de nivel variable, cortinaje y butacas retractiles, que permite la reorganización del espacio de una manera versátil y acondicionando al número de espectadores y escenografías. También se instalaron los “cat walks” para poder mover las luces, escenografías a cualquier lugar del Teatro.

## **2 Criterios de diseño.**

### **2.1 Diagnóstico previo del recinto.**

Realizada una visita preliminar al lugar de emplazamiento del Teatro México, aditivamente se percibieron problemas de eco flotante y focalizaciones sonoras producidas principalmente por las superficies limitantes de forma oval enlucidas con cal y arena, cielo raso construido con mortero cemento arena con varilla y el piso de madera en malas condiciones estructurales, y un sector de gradería de madera. La geometría de la sala poseía un volumen de aire interno elevado (superior a los 5000 m<sup>3</sup>), factores que sumados, generaban un campo reverberante alto, efecto peine en todos los sectores e incrementos naturales del NPS en bajas frecuencias lo que afectaba considerablemente a la inteligibilidad de la palabra, con lo que el local no se encontraba en condiciones mínimas para poder llevar a cabo cualquier actividad sonora dentro del mismo. No se realizó ninguna medición acústica de Teatro en ese momento debido al que el proyecto arquitectónico contemplaba un cambio total de la distribución de espacios como geometría del interior de la sala, por lo que se las realizaron una vez que los trabajos de construcción de obra gruesa fueron finalizados. Existen dos zonas principales la primera platea donde se encontraba el escenario y un nivel de graderías con capacidad para 400 personas pero con problemas tanto acústicos como de isóptica por lo que su morfología debió se replanteada.

Las mediciones acústicas fueron ejecutadas con ruido rosa tonos puros por octava desde 125 hasta 4000 Hz, además de un barrido de frecuencias desde 300 a 1000 Hz. Se comprobó que la respuesta de frecuencia de la sala era muy deficiente, ya que de forma natural elevaba el nivel en frecuencias bajas en un promedio de 25 dB con respecto a la nominal, efecto peine en el rango de frecuencias medias y sobre los 10 kHz un decaimiento notable en el espectro de cuarto orden. Las superficies ovals generaban dos focos sonoros en los cuales el NPS era 20

dB mayor que en los sectores aledaños a las paredes limitantes desde los 800 Hz en adelante y por su morfología, modos normales en el rango comprendido entre 60 Hz y 380 Hz distribuidos de forma desigual todos los sectores. El tiempo de reverberación ( $T_{60}$  mid) obtenido a partir de los tonos puros fue de 3,8 s, el cual está muy por encima de los estándares para recintos dedicados a obras donde el mensaje oral es lo más importante.



Figura 2.1.1. Sector de graderías original del teatro.



Figura 2.1.2. Escenario original del teatro

## 2.2 Diseño acústico.

Antes de aplicar cualquier criterio de diseño, fue necesario identificar los problemas existentes y los susceptibles de ser generados dentro del teatro, de acuerdo a las actividades que se lleven a cabo dentro de él.

Como primer punto, está el problema de *Modos Normales de Vibración*, que no son otra cosa que las frecuencias naturales asociadas a las estructuras que se encuentran dentro del recinto y que pueden entrar en resonancia cada vez que una fuente sonora ubicada dentro del teatro radie con una frecuencia igual o parecida a la de uno o varios de estos modos. En este caso la estructura comenzará a vibrar por efecto de resonancia, elevando en forma no deseada el Nivel de Presión Sonora ( $L_p$ ) en dichas bandas de frecuencia. El fenómeno de los Modos Normales sólo se transforma en “problema”, cuando dichos incrementos de nivel ( $L_p$ ) aparecen sólo para ciertas frecuencias y no de manera homogénea en el espectro. Ahora, como las estructuras tienen una gran masa, las frecuencias naturales asociadas a ellas son bajas y por lo tanto este fenómeno en términos generales, sólo es preocupante hasta 300 Hz, también considerando la sensibilidad del oído.

La solución a los problemas citados, se propuso diseñar y construir absorbentes de baja frecuencia, llamados Resonadores (porque funcionan también bajo el principio de la resonancia) una vez que el recinto este finalizado en su totalidad ya que estos dispositivos tienen un rango de acción muy limitado.

Otro factor y dado que el recinto se va a usar como cine y teatro eventualmente, la Inteligibilidad de la Palabra juega un papel bastante importante. Cuando en un recinto no se logra una inteligibilidad óptima, ocurre que el mensaje oral no es comprendido o se comprende parcialmente. Esto se debe generalmente, a un excesivo campo reverberante dentro de la sala y a un refuerzo deficiente del sonido directo por parte de las primeras reflexiones (aquellas que ocurren en un tiempo inferior a 50 ms. Un error frecuente es reforzar el sonido directo con fuentes sonoras adicionales, que lejos de solucionar el problema, ayudan a agravarlo aun más, porque si bien es cierto el campo directo aumenta, el reverberante también lo hace y como resultado, sólo se logra un incremento desmedido del *Nivel de Presión Sonora* ( $L_p$ ).

Para solucionar a este tipo de problemas se logra con paneles reflectantes distribuidos especialmente en los muros laterales y techo del recinto, de manera de generar primeras reflexiones útiles, que refuercen de forma natural al sonido directo. Asimismo, deben distribuirse por toda la sala, paneles absorbentes para mantener un tiempo de reverberación óptimo.

Respecto a la Pérdida de Energía en Frecuencias Altas (comprendidas entre 500 y 4000 Hz (rango de frecuencias medias) y de 4 a 20 kHz. (rango de frecuencias altas)), esta se debe a las grandes dimensiones del recinto, su forma y la alta direccionalidad del sonido en dicho rango (contrario a lo que ocurre en bajas frecuencias) y que hace que el frente de ondas se atenúe muy rápidamente con la distancia que debe recorrer para llegar a los oyentes. Auditivamente el problema se percibe como la sensación de estar en una sala “poco brillante” o “apagada” y la solución es elevar la sonoridad (capacidad de la sala de reforzar o elevar el  $L_p$  total en forma natural para cierto rango de frecuencias) de estas frecuencias mediante Paneles Difusores especialmente diseñados para ello.

Los difusores son un tipo especial de panel reflectante, que funciona en base al rompimiento del frente de ondas incidente sobre ellos, en múltiples frentes ondulatorios de menor nivel ( $L_p$ ), redistribuyendo la energía reflejada en el tiempo y el espacio, debido a las múltiples irregularidades propias del panel. Para el caso del Teatro México, se proponen Difusores tipo QRD (de Residuo Cuadrático) unidimensionales, que se caracterizan por

difundir sonido en un rango de frecuencias de tres octavas a partir de la frecuencia de diseño, es decir, si la frecuencia de diseño es de 1 kHz. por ejemplo, la difusión óptima que ofrece el panel abarca desde 1 hasta 8 kHz. Considerando las deficiencias (determinadas de manera teórica) que presenta el recinto en frecuencias medias y altas, es que se proponen, como frecuencias de diseño 850 Hz y 3.5 kHz. La primera frecuencia de diseño apunta especialmente al refuerzo natural del rango de frecuencias asociadas a la voz humana (comprendido entre 500 a 4 kHz), teniendo en cuenta que la sala presenta problemas de disminución de sonoridad a partir de 800 Hz por lo que apunta al refuerzo de frecuencias altas propiamente tal como la anulación de focalizaciones sonoras debido a su forma cóncava.

El Tiempo de Reverberación o  $T_{60}$  mide el decaimiento de la energía sonora en un recinto. Se dice que si dicho decaimiento es rápido, la sala se considera más bien “seca” es decir, con muy poca energía reverberante. En caso contrario, la sala se considera “viva”. Desde el punto de vista acústico, ambos extremos son igualmente malos porque el exceso de reflexiones irá en desmedro de la inteligibilidad de la palabra por ejemplo y en cambio si la sala es muy seca, el sonido directo se atenúa rápidamente y se hacen necesarias muchas más fuentes sonoras para lograr un nivel aceptable dentro de él. Por otra parte, el ser humano no está acostumbrado a escuchar sólo sonido directo y la sensación auditiva es bastante molesta. Los tiempos de reverberación recomendados (según criterios internacionales de diseño) para los distintos tipos de uso del teatro varían desde 0,7 ms a 1,3 ms. Ellos se logran distribuyendo correctamente tanto paneles reflectantes como absorbentes por todo el recinto y por supuesto, ofreciendo la posibilidad de reducir o aumentar el  $T_{60}$  mediante paneles móviles que sean capaces de cambiar sus características reflectantes/absorbentes por completo.

Las focalizaciones de sonido aparecen cuando se tienen superficies cóncavas dentro de un recinto, como es el caso del teatro México, dada su forma ovalada. Para solucionar este problema, se propone el uso de difusores en el escenario y en la pared posterior correspondiente a la cabina de control, que no sólo cumplen con la tarea de elevar el  $L_p$  en los rangos de frecuencias para los cuales están diseñados, sino que además ayudan a romper paralelismos entre muros y en este caso, romper con la geometría cóncava que presenta el teatro.

Respecto a la falsa coloración de la voz, esta se produce principalmente, por la presencia de grandes superficies reflectantes. En un teatro, donde la inteligibilidad de la palabra es primordial, es necesario contar con paneles reflectantes que generen primeras reflexiones útiles hacia el público, sin embargo para evitar el problema de la coloración inadecuada de la voz, es que se proponen paneles convexos tanto en los muros laterales como en el techo del recinto.

Por último, el Teatro México tiene tradición histórica en el sector como sala de cine, sin embargo su restauración contempla otros usos aparte de este, como son el de sala de eventos, sala de concierto, teatro y teatro caja negra. Desde la perspectiva de la acústica, la Multifuncionalidad del Espacio supone la versatilidad en el diseño de dispositivos, donde la acústica variable dentro del recinto, surge como la gran alternativa.

La acústica variable tiene como función proporcionar en un mismo recinto, ambientes acústicos distintos, es decir, que una misma sala pueda tener un nivel de reverberación muy alto o muy bajo de acuerdo a la actividad que se desarrolle dentro, sólo con la instalación de paneles móviles que satisfagan dichas necesidades y que tengan la característica de ser muy fáciles de manejar y mantener. Para el teatro México, se han diseñado paneles móviles reflectantes/absorbentes, los cuales van fijos a los muros y que usan un sistema de puertas correderas de modo que cuando estas se abren, el panel funciona como absorber de energía a partir de 1000 Hz y cuando se cierran, el panel actúa como panel reflectante.

### 2.3 Construcción e instalación.

. El proyecto necesitaba un cambio total del cielo raso como del techo que por el abandono que sufrieron las instalaciones su rigidez como comportamiento estructural presentaban gran deterioro ya que en su mayoría era construido en madera. El proyecto contemplaba la instalación de una estructura metálica de soporte así también de planchas de poliuretano expandido de 10 cm de espesor de cielo raso, pero por efectos de aislación sonora como de acondicionamiento acústico se debe instalar un cielo raso fonoabsorbente, el elegido para este proyecto fue Black Theater de 5 cm, el cual por medio de un enrejado metálico estilo americano el cual fue sujetado directamente a la estructura metálica debido a que el peso de este material no es considerable, para evitar cualquier efecto de resonancia entre este y las placas del techo se lo hizo lo más irregular posible respetando las medidas determinadas en el proyecto de diseño.

Continuando con este sector, los paneles reflectores convexos fueron construidos en policarbonato blanco de 3 mm de espesor con una tapa de madera para dar rigidez, estabilidad y soporte a los paneles, estos fueron sujetados de igual manera directamente a la estructura metálica por medio de cable de acero y ganchos, estos fueron colocados bajos en nivel de los “cat walks” a tres diferentes alturas con la funcionalidad de reforzar el sonido directo con primera reflexiones en todos los sectores del teatro y evitar la aparición de sombras acústicas.

Para las paredes se propuso la instalación de difusores QRD de 850 Hz, en busca de materiales que cumplan con requerimientos de seguridad se escogió madera MDF tratada con retardante a la acción del fuego, lo que ocasionó que los paneles poseen un gran peso lo cual al momento de analizar las estructuras del teatro se observó que era necesario la implementación de un sistema de sujeción externo ya que los muros presentaban daños en las partes exteriores colindantes con el teatro ya que el paso de los años los habían hecho arenosos, lo cual hizo que sea imposible sujetar cualquier dispositivos a los mismos, en búsqueda del mejor sistema de sujeción se acordó la instalación de una estructura metálica de soporte soldadas a las columnas principales del teatro para montar sobre estos mediante ganchos los paneles y evitar cualquier contacto directo con las paredes. Para controlar el tiempo de reverberación se instaló material absorbente intercalando a las series de difusores en todo el teatro con franjas de espesor variable, estas fueron construidas en un sistema de soporte en madera recubierta con tela ignífuga para dar un acabado interno sobresaliente. Debido a que la altura de las paredes en ciertos sectores del teatro son mayores a 7 m, se construyen paneles modulares de 2 m de altura, para que pueden ser colocados en forma de columnas en la estructura metálica con ayuda de poleas para su ubicación y colocación.

Los paneles de acústica variable fueron construidos con marco de madera triplex, superficies reflejantes convexas de policarbonato negro de 3 mm y material fonoabsorbente de 2,5 cm, con sistema de puerta corredizas utilizando rieles en sus extremos, para asegurar un corrector uso de estos dispositivos como su durabilidad, se diseñó un sistema automatizado para la abertura como cierre de los mismos mediante el uso de aire comprimidos y pistones, permitiendo dar a los paneles dos posiciones fijas asegurando un buen desempeño durante su uso, al igual que los difusores, estos paneles debieron ser montados sobre la estructura metálica.

### **3. Criterios de aislación acústica.**

Las paredes del teatro eran los únicos elementos que se conservarían de la estructura original, construida en ladrillo y con un espesor promedio de 80 cm, presentaban coeficientes de transmisión sonora muy pequeños por lo que no se planteo ningún tipo de modificación a los mismos. Además se considero que una vez construida la obra se emplazarían corredores a lo largo de toda la periferia de la estructura, lo que aumentaría naturalmente la aislación de los muros laterales.

Con respecto al techo, el proyecto contemplaba el cambio total de este, para lo que se propusieron planchas metálicas inyectadas con poliuretano expandido de alta densidad formando una placa de 10 cm de espesor, con el objetivo de atenuar el ruido y vibraciones que pudieran ser susceptible de ingresar o salir del teatro durante su funcionamiento y que pudieran generar molestias en el interior como en zonas alledañas que se encuentran habitadas. El espesor de las planchas se determinó considerando espectro de ruido molesto principalmente entre 50 y 300 Hz, y sobre todo la disponibilidad de material en el mercado ecuatoriano.

Otro espacio que se vio modificado fue el sector de graderías, en el cual se propuso que la losa sea de hormigón armado, sobre la cual se colocaron dos capas de madera triplex de 12 mm con material elastómero en su parte inferior para amortiguar cualquier transmisión estructural y sobre esta capa, colocar la madera de revestimiento interno que por efectos de diseño fue duela de eucalipto. En el área bajo las graderías el cliente quería realizar una sala de reuniones, dada que esta queda en la parte frontal del escenario y formaba una cavidad de aire hacia que se reforzaren de formar natural frecuencias bajas por efecto de resonancia, para poder dividir ambos espacios acústicamente y con la limitante de utilizar materiales de obra gruesa (ladrillo, bloques de hormigón), se diseñó una partición modular con alma de estructura metálica de 5 cm de espesor, rellena de lana de vidrio para evitar cualquier resonancia interna que desmedre el comportamiento acústico de la misma, sobre ambas caras de la misma se planteó la instalación de MDF de 2,5 cm de espesor con caucho de 8 mm en el sector que tenía contacto con la estructura metálica.

#### 4. Resultados.



Figura 4.1. Vista frontal escenario, en los laterales se ubican paneles acústica variable.

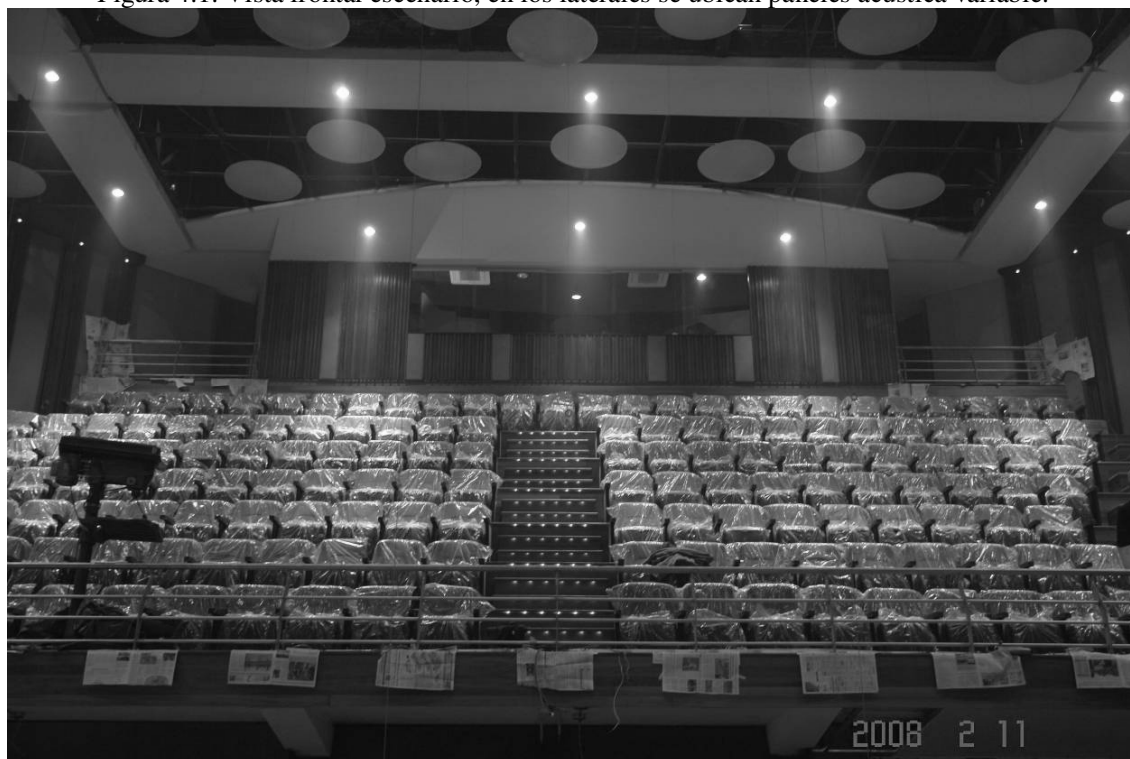


Figura 4.2. Vista frontal graderíos, en los laterales y pared difusores intercalados con material absorbente, cielo raso paneles reflectores convexos.



Culminadas las obras de intervención del proyecto acústico se realizó un análisis del comportamiento acústico final de la sala para cuantificar los resultados y poder realizar modificaciones principalmente en el sector de bajas frecuencias ya que ningún tipo de resonador fue instalado anteriormente. Existe un factor que no ha impedido realizar la medición final ya que en el sector frente a la bodega se prevé la instalación de sillas retráctiles que hasta la actualidad no han sido instaladas, pero para tener una idea preliminar de cuál sería el comportamiento acústico se realizaron mediciones de las cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Debido a un cambio del volumen interno como uso de diferentes materiales acústicos, la respuesta en bajas frecuencias se vio modificada teniendo un nivel promedio de 10 dB sobre la nominal con picos en frecuencias de 80, 100 y 125 Hz. El teatro cuenta con un sin número de cortinas entre ellas el ciclorama, cortina de fondo, cortina de boca de escenario una vez que todas ellas se encontraban desplegadas las frecuencias picos presentaban un menor pico por lo que la acústica del local obtuvo un balance adecuado en este sector que en obras musicales es de gran importancia y no se presenta ningún enmascaramiento en medias frecuencias.

Los difusores de 850 Hz colocados en las paredes limitantes mejoraron la respuesta de frecuencia del teatro eliminado el efecto peine y los focos sonoros, con esto se pudo lograr una respuesta casi homogénea en todos los sectores con variaciones de nivel no mayores a los 5 dB, por otro lado los difusores de 2.5 KHz. mejoraron considerablemente la sonoridad de altas frecuencias haciendo que el espectro presente una distribución balanceada en todas sus octavas.

Mediante la utilización de material fonoabsorbente tanto en paredes como en cielo raso, aparte de mitigar cualquier incidencia de ruido externo molesto que acompañados de los paneles de acústica variable se logró controlar el  $T_{60}$  de la sala en un rango que varía entre 1 y 1,4 "s", el cual brinda a la sala de una gran adaptación para presentaciones teatrales como musicales con una sonoridad homogénea en ambos tipos de presentaciones, que con la instalación de las butacas faltantes se predice una variación no mayor a los 2 ms, que no presentará ningún problema acústico futuro.

La prueba final de teatro se llevó a cabo el día 17 de agosto del 2008, cuando se realizó la inauguración oficial por parte de Ilustre Municipio Metropolitano de la ciudad Quito al cual acudieron un total de 700 espectadores y la presentación de Música Sinfónica, Vocal Sampling, música contemporánea y presentaciones de artes corporales, auditivamente tanto el espectro como el  $T_{60}$  presentaron un balance homogéneo y cálido en los sectores de platea como graderíos dotando a este escenario de una acústica muy versátil, y acogedora haciendo que el espectador se sienta parte activa de las actividades ejecutadas.

### Referencias

- Carrión, Antoni; (1998). "Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos". Edicions UPS, Barcelona, España.
- Miyara, Federico; (2000) "CONTROL DE RUIDO". Laboratorio de Acústica y Electroacústica, Argentina.